Copyright © 2014 by NTNU Institutt for Marin teknikk
& Fagbokforlaget Vigmostad & Bjørke AS
All Rights Reserved

ISBN: 978-82-321-0441-3

Grafisk produksjon: Skipnes Kommunikasjon AS
Omslag: Bjarne Stenberg
Layout og førtrykk: Bjarne Stenberg

De fleste forfatterene er professorer ansatt ved Institutt for marin teknikk, Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, NTNU. Redaktør har vært Leif Lundby, tidligere fakultetsdirektør for Fakultet for marin teknikk, NTNU

Initiativ til boken kommer fra et samarbeidsforum for "Studieprogram for marin teknikk, NTNU og Maritimt næringsliv i Norge". Hovedhensikten med en slik bok skulle være å inspirere, motivere og rekruttere elever til å velge fordypning i realfag i videregående skoler "i tide". Både forumet og "Stiftelsen Norsk Maritim Kompetanse" har gitt betydelig økonomisk støtte til bokprosjektet

Boken understøttes av hjemmesiden
www.marin.ntnu.no/havromsteknologi

Elever ved videregående skoler kan delta med selvkonstruerte skipsmodeller i nasjonal konkurranse, www.oceanspacerace.no. Denne foregår årlig i Havlaboratoriet ved Marinteknisk Senter, Trondheim

Spørsmål om denne boken kan rettes til:
Fagbokforlaget
Kanalveien 51
5068 Bergen
Tlf.: 55 38 88 00 Faks: 55 38 88 01
e-post: fagbokforlaget@fagbokforlaget.no
www.fagbokforlaget.no

Materialet er vernet etter åndsverkloven.
Uten uttrykkelig samtykke er eksemplarfremstilling bare tillatt når det er hjemlet i lov eller avtale med Kopinor.

Havromsteknologi

Et hav av muligheter

Forfattere
Jørgen Amdahl
Stig Berge
Fredrik Dukan
Anders Endal
Jørgen Hals
Håvard Holm
Geir Johnsen
Tobias King
Carl Larsen
Leif Lundby
Torgeir Moan
Dag Myrhaug
Jonas Odland
Bjørnar Pettersen
Sverre Steen
Asgeir Sørensen
Per Werenskiold
Vilmar Æsøy

Redaktør
Leif Lundby

Innhold

Forord

0 Et hav av muligheter
Framtidige utfordringer i havromsteknologien
Anders Endal, Geir Johnsen, Tobias King, Leif Lundby og Asgeir Sørensen

1 Havrommet og havmiljøet
Dag Myrhaug og Bjørnar Pettersen

2 Oppdrift og stabilitet
Håvard Holm

3 Motstand og framdrift
Håvard Holm og Sverre Steen

4 Materialteknologi
Stig Berge

5 Krefter og bevegelser for marine konstruksjoner
Carl Martin Larsen

6 Marine konstruksjoners styrke
Jørgen Amdahl

7 Mekanisk og elektrisk energi til havs
Leif Lundby og Vilmar Æsøy

8 Styring og regulering
Håvard Holm og Asgeir Sørensen

9 Skip og skipsfart
Tobias King, Leif Lundby og Vilmar Æsøy

10 Olje- og gassutvinng til havs
Carl Martin Larsen, Torgeir Moan og Jonas Odland

11 Livet i havet
Anders Endal og Geir Johnsen

12 Fiskeri- og havbruksteknologi
Anders Endal

13 Fornybar energi til havs
Jørgen Hals og Leif Lundby

Vedlegg

Oversikt over medlemsbedrifter i "Samarbeidsforum Marin"

Forord

Formål
Et av formålene med boka er å vise hvor viktig det er å beherske realfagene i den videregående skolen for å løse utfordringer knyttet til den videre miljømessige og teknologiske utviklingen av samfunnet vårt. Vi håper at at boka kan tenne en gnist hos elever i den videregående skolen, slik at de får lyst til å velge fordypning i realfag og senere studier i teknologi.

Boka viser også at det er forbausende hvor langt man kan komme når det gjelder å utføre interessante tekniske beregninger "bare" med dagens pensum i matematikk og fysikk i den videregående skolen. Med andre ord er disse fagene vesentlig mer anvendbare enn elever selv ofte er klar over. De bør derfor kunne være interessante valgfag i mange sammenhenger.

Boka egner seg godt som støtte for elever i videregående skoler som tar faget Teknologi og forskningslære og som vil rette dette faget mot virksomheter til havs.

Havromsteknologi vil dessuten være interessant også for flere andre målgrupper enn elever i den videregående skolen.

Tilgjengelig på internett. Stoffet er omfattende, og ikke alt er nødvendigvis like interessant for alle. Boka er tilgjengelig på internett (http://www.marin.ntnu.no/havromsteknologi), og de enkelte elever/skoler kan derfor velge ut de temaene som er mest relevante for lokale forhold, ressurser og interesser.

Pedagogisk framstilling. I arbeidet med boka er det blitt lagt stor vekt på gode pedagogiske opplegg. Den inneholder derfor mange illustrasjoner, beregningseksempler og oppgaver. Noen av oppgavene er vanskeligere enn andre, men er tatt med som utfordringer for spesielt interesserte. Noen oppgaver baseres på bruk av programmer og annen informasjon fra internett.

Grunnlag for praktiske prosjekter. Stoffutvalget egner seg godt i kombinasjon med en rekke interessante, praktiske prosjekter, noe som ifølge fagplanene for Teknologi og forskningslære er en viktig del av faget. Eksempler på flere slike prosjekter vil senere bli beskrevet i oppslag på internett og samlet i en egen bok. Foreløpig viser vi til prosjektet "Den unge skipsdesigneren" som er lagt ut på internett under samme adresse som nevnt foran. Dette er et prosjekt hvor elevene i grupper på to eller tre skal designe et skip ved hjelp av et nettbasert, profesjonelt data-

Ungdom i de fleste kystkommuner har blitt "flasket opp" med den enorme rollen som virksomhetene til havs spiller

program. Deretter skal de bygge en modell av skipet. Denne skal utrustes med batteridrevet, fjernstyrt framdrifts- og styresystem. Modellen skal prøves i vann, og den beste modellen ved de enkelte skolene kan delta i en *landsomfattende konkurranse ved Marinteknisk Senter i Trondheim i mars hvert år.* Vinnergruppen kåres delvis på grunnlag av den prosjektrapporten de leverer.

Hvorfor fokusere på havromsteknologi? Studiematerialet gir engasjerende og omfattende kunnskaper om en teknologi hvor *Norge er verdensledende.* Norges lange kyst og rike havområder har gjort virksomheter knyttet til havet til den viktigste bærebjelken i norsk næringsliv.

Norge ligger i verdenstoppen innen marin vitenskap, marin teknologi og marin næringsvirksomhet. Dette har skapt meget sterke næringsklynger med internasjonal slagkraft. Disse klyngene omfatter en utrolig lang rekke bedrifter innenfor

- marin transport
- energiproduksjon til havs (både ved hjelp av fossil og fornybar energi)
- matproduksjon (fiske og havbruk)

Disse tre teknologibransjene skaper mer enn 50 % av landets eksportinntekter og 40 % av verdiskapingen i landet. De er også viktige for for energiproduksjon, matproduksjon og varetransport i verden. For ungdom må det være spennende å skaffe seg gode kunnskaper på disse områdene.

Dessuten er det meget viktig at virksomhetene på havet og i havrommet *blir bærekraftige.* Dette krever at det utvikles ny kunnskap og ny teknologi i framtida, noe som bare kan skje ved hjelp av innsats fra dagens ungdom.

Gjennom det skisserte undervisningsopplegget åpnes det videre opp for et interessant kontaktnett hvor både Norges Rederiforbund og viktige bedrifter innen det maritime næringslivet er med.

"Den unge skipsdesigneren": Konkurranse om beste design av et skipsskrog samler hvert år i mars 3—400 elever fra hele landet. Konkurransen foregår i Havbassenget ved Marinteknisk Senter, NTNU i Trondheim.

Forfattere og bidragsytere. Forfatterne har stort sett vært professorer i undervisningsstillinger ved Institutt for marin teknikk, NTNU. Disse framgår av kapitteloversikten foran. Andre har bidratt ved å skrive om spesielle delemner.

Én person bør nevnes og takkes for en rekke verdifulle kommentarer og råd i flere sammenhenger, nemlig Stian Erichsen som var professor og en nestor ved Institutt for marin teknikk, NTNU.

Det rettes også en takk til Ann-Johanne Bjørgen og Charlotte Bye-Melom ved biblioteket ved Marinteknisk senter for all hjelpsomhet i forbindelse med litteratursøk og lignende.

Takk til elever og lærere. Vi takker flere elever og lærere for viktige råd og kommentarer under arbeidet med boka.

Initiativtakere til boka. I 2005 ble det opprettet et "Samarbeidsforum for Institutt for marin teknikk, NTNU og Maritimt næringsliv". Hovedformålet var å øke rekrutteringen av dyktige og motiverte studenter generelt og jenter spesielt. Den første styringsgruppen besto av følgende "ildsjeler" fra næringslivet og instituttet: Arnold Hansen (leder), Eva Kristensen, Gjert Wilhelmsen, Yngvil Eriksson Åsheim, Carl Martin Larsen, Magnus Rasmussen og Asgeir Sørensen. Uten den entusiastiske støtten som disse ga til ideen om å lage ei bok primært beregnet på videregående skoler, ville den foreliggende boka aldri blitt påbegynt eller fullført. Leif Lundby ble utpekt til redaktør. Også etterfølgende ledere for samarbeidsforumet, Bjørn Pedersen og Per Magne Einang, har hele tiden gitt bokprosjektet entusiastisk og verdifull støtte.

Finansiering. Instanser som har gitt økonomisk støtte til bokprosjektet og til gjennomføring av konkurransen "Den unge skipsdesigneren", er følgende:

- Samarbeidsforum Marin (årlige bidrag fra medlemsbedrifter, oversikt over medlemsbedriftene bakerst i boka)
- stiftelsen Norsk Maritim Kompetanse
- Sør-Trøndelag Fylkeskommune
- Tekna
- Renatesenteret
- NTNU ved prorektor
- Nærings- og handelsdepartementet
- Naturfagsenteret

Uten all den ovennevnte støtten ville verken selve bokprosjektet, kursing av lærere, eller konkurransen "Den unge skipsdesigneren" blitt gjennomført i sin nåværende form. Alle de nevnte bidragsytere takkes på det varmeste.

Forbedre utgave. Denne boka er en utvidet og forbedret versjon av den foreløpige utgaven som ble trykt for to år siden for å avhjelpe et akutt behov. Denne nye utgaven vil få en vesentlig bredere distribusjon enn den forrige.

Trondheim, juni 2014

Leif Lundby
(redaktør)

Forfattere: Anders Endal, Geir Johnsen, Tobias King,
Leif Lundby og Asgeir J. Sørensen

Framtidige utfordringer i havromsteknologien

Et hav av muligheter

Også for deg

Havromsteknologi

Innhold

Utfordringer og muligheter....2
Globale megatrender....4
Norge er allerede i dag en stormakt til havs,....6
og skal i neste tiår bli verdensledende i havrommet....7
Skipsfart og skipsoperasjoner i framtiden –
mer miljøvennlige, men også mer krevende....8
Olje- og gassutvinning i framtiden – eventyret
fortsetter....12
Fiskeri og havbruk i framtiden – om få år vil fisk
bli Norges nest viktigste eksportvare....14
Fornybar energi fra havet i framtiden....16
Havromskartlegging og overvåking av marine
ressurser og miljø....18
Marin mineralkartlegging og utvinning i framtiden....20
Muliggjørende teknologier....21
Alt dreier seg om kunnskap....22
Et fagområde med mange muligheter....23
Hva er bærekraftig utvikling? Visjon !
Referanser....24

NTNU
Institutt for marin teknikk

Utfordringer

Menneskeheten står ovenfor store utfordringer, som global oppvarming, en økende verdensbefolkning og mangel på naturressurser

Med store utfordringer kommer også store muligheter, blant annet muligheten for deg til å utgjøre en betydelig forskjell

og muligheter

I dette kapittelet skal vi se inn i krystallkulen, og der vil vi se at disse mulighetene ligger i havet

Globale megatrender

Klima og miljø

Klimaforandringer er ikke noe du kan kjenne på kroppen fra år til år. Men forandringene er et faktum og blir mer og mer målbare ettersom teknologien utvikler seg med presise kartleggings- og overvåkingssystemer. Det ventes en økning av klimagassutslipp på 20 prosent innen 2020 og forskere har konkludert med at dramatiske klimaforandringer er uunngåelig de neste 30—50 årene. Konsekvensene vil være alvorlige, havnivået kan stige så mye som 1,8 meter innen århundret er omme, og vi står ovenfor økende grad av ekstremvær.

Utfordringen med klimaforandringer er todelt, man må tilpasse seg forandringene som allerede er irreversible og samtidig kutte utslippet av drivhusgasser for å hindre enda større skade for framtidige generasjoner. Hvorvidt man snakker om økende havnivå, ekstremvær eller issmelting, er kunnskap innen havromsteknologi sentralt.

Mat

Verdens befolkning kommer til å øke fra 7 mrd. i 2012 til 9 mrd. i 2044. Den grønne revolusjon på 1960-tallet la grunnlag for en sterk økning i kornproduksjonen, noe som bidro til at antallet underernærte i verden avtok. Men den ble også grunnlaget for industrielt landbruk, med økte vannbehov, kraftig bruk av kunstgjødsel, fossil energi og sprøytemidler. Artsmangfoldet er sterkt redusert. 90 % av matproduksjonen i verden kommer fra 15 planter og 8 dyrearter. Forurensning og erosjon ødelegger årlig landbruksareal tilsvarende det totale arealet av Benelux-landene. I dag stiger antall underernærte igjen, og flere dør av feilernæring. Klimaendringer med tørke og smelting av isbreer i Himalaya påvirker vannføringen i elvene. Vanning av jordbruksarealer med grunnvann i USA, India og Kina har ført til at disse reservoarene tømmes. Tilgangen på mineraler til kunstgjødsel er svært begrenset.

I havet er det rikelig med areal, vann og næringssalter. Havet vil derfor bli stadig viktigere for produksjon av biomasse til mat, fôr og energiproduksjon.

Energi

Å skaffe nok energi på en miljøvennlig måte og til overkommelig pris også for U-land, er en av menneskehetens største utfordringer. De neste 10 årene ventes verdens energibehov å øke med nesten 20 prosent, mest på grunn av vekst i land som Kina og India. Dette behovet vil nok dessverre først og fremst bli dekket av fossile brensler.

Det neste tiåret er kritisk, det er nå man må ta det første skrittet mot utbygging av fornybar energi i stor skala. Store ressurser brukes på forskning innen biodrivstoff, solenergi og kjernekraft. Utbygging av vindkraft er allerede underveis og kan utgjøre 8 prosent av verdens energiproduksjon innen 2020, spesielt på grunn av de stabile vindforholdene man får i offshore vindturbinparker [0.3]. I tillegg er det muligheter til å utnytte bølger og havstrømmer til produksjon av energi.

Råvaremangel

Med flere U-land som nærmer seg levesettet i dagens I-land, får vi en økende konkurranse om verdens råvarer. Med dagens utvinning av råvarer vil vi i 2020 trenge 2 planeter for å opprettholde levemåten vår. I dag mister vi skogområder på rundt 130 000 kvadratkilometer i året. Dette er et område tilsvarende arealet til Hellas, og mangel på ferskvann ventes å dominere internasjonal politikk de neste tiårene. Alternative energiløsninger krever ofte sjeldne jordmetaller til bruk i blant annet elektriske motorer, batterier og solceller. Disse metallene er det stor etterspørsel av allerede i dag, og er en ressurs som ikke kommer til å vare evig. Økt utvinning av metaller fra havbunnen vil derfor bli interessant i framtiden. [0.3]

Transportbehov

Utslipp fra transport av folk og varer er en av hovedårsakene til global oppvarming og helseskadelig lokal luftforurensning. Skipet er motoren i verdenshandelen. Sammenlignet med transport på vei, jernbane og i luft er maritim transport mest effektiv og miljøvennlig, målt i kostnader og utslipp per kg fraktet gods. Dette transportbehovet ventes å øke kraftig i de neste tiårene, samtidig er en økende del av verdensbefolkningen avhengig av personbil til transport. Spørsmålet er om vi i framtiden kan dekke disse transportbehovene samtidig som vi kutter forbruket av fossile brensler.

Norsk havromsteknologi
i 2010

Norge er allerede i dag en stormakt til havs

Kjernevirksomheter (næringer):

Skipsrelatert virksomhet (skipsfart, skipsoperasjoner, skipsbygging og skipsutstyr)

100 000 sysselsatte
71 milliarder kr i eksportverdi

Omfatter virksomhet som dreier seg om norskeide/norskdrevne **skip**:
- Transport til havs (nærskipsfart og utenriks, deepsea skipsfart)
- Assistanse til operasjoner til havs, særlig i offshorevirksomheten
- Virksomheter som knytter seg til et skip før det begynner å seile (design, bygging, produksjon og montering av utstyr, osv).

Olje- og gassutvinning

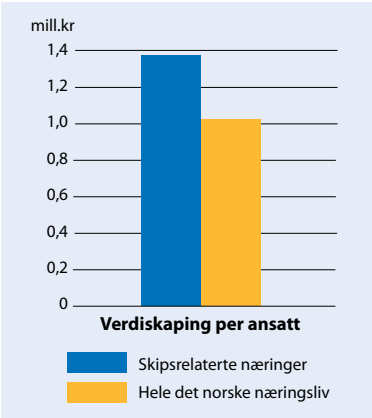
120 000 sysselsatte
481 milliarder kr i eksportverdi

Vi tenker da på utvinning av jordolje og naturgass fra den norske kontinentalsokkelen, altså Nordsjøen, Norskehavet og Barentshavet. Vi ser at det dreier seg om enorme verdier. Eksportverdien utgjorde 64 % av landets totale eksport og er hovedårsaken til at Norge hvert år har en meget gunstig handelsbalanse og har blitt et av verdens rikeste land.

Fiskeri og havbruk

13 000 sysselsatte
54 milliarder kr i eksportverdi

Dette er den tredje største gruppen av varer og tjenester som Norge eksporterer. Alle de tre største gruppene kan altså knyttes til landets virksomhet til havs. Havbruk er en virksomhet som ekspanderer enormt, slik at "fisk" vil bli den nest største gruppen om få år. Samlet sett utgjør de tre gruppene i dag nesten 80 % av landets eksport.

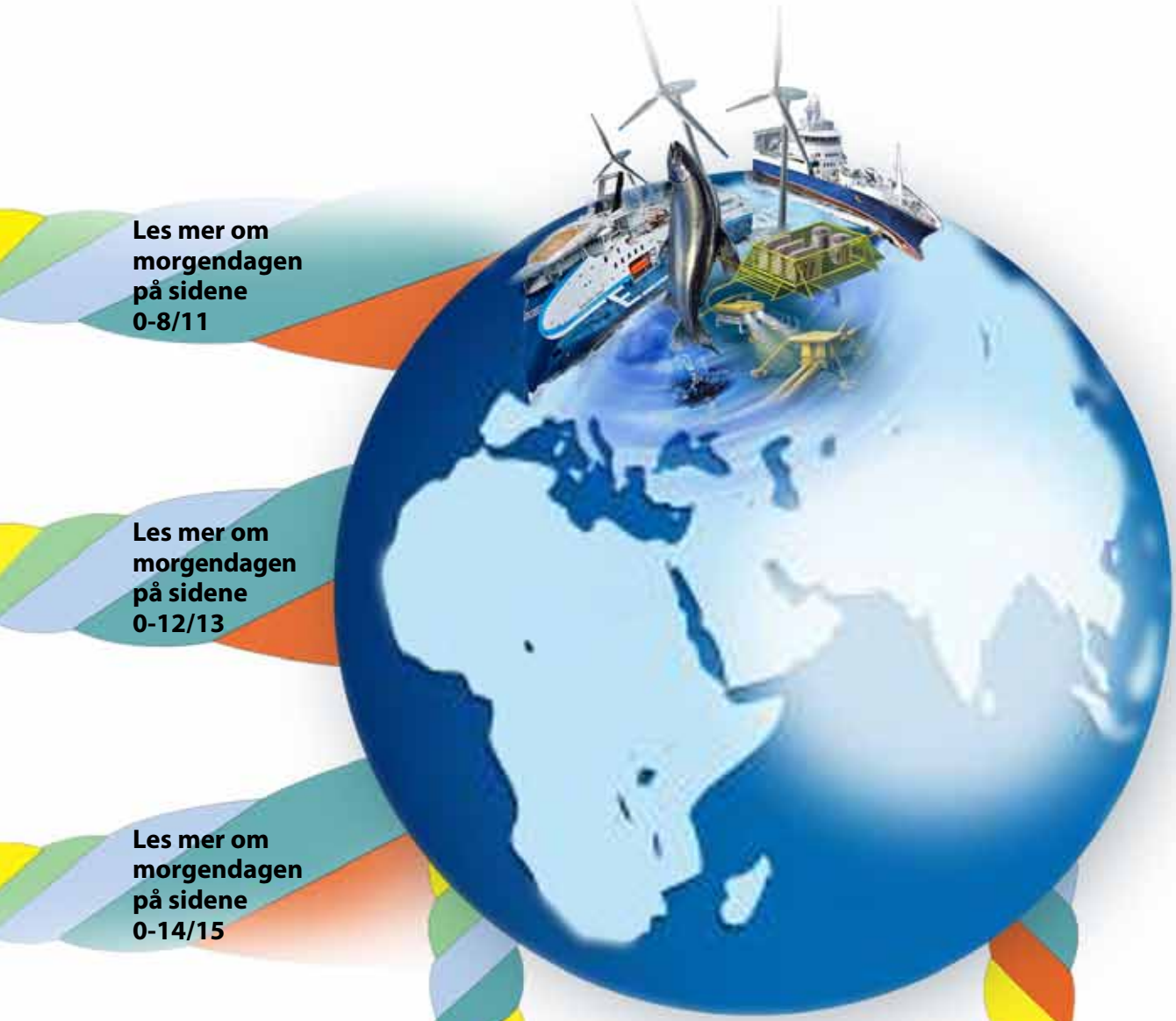


Kunnskapsbaserte næringer

Bak hver av de tre næringene står en vrimmel av relevante bedrifter som sammen danner såkalte næringsklynger. Vi symboliserer derfor næringene med tau, bygget opp av flere fibre. Bedriftene karaktriseres av at de er kunnskapsbaserte og at de dermed krever stor kompetanse hos ansatte. Dette medfører blant annet at verdiskapingen per ansatt blir høyere i disse næringene enn for resten av norsk næringsliv. Næringene er også globale i sine operasjoner, med aktiviteter i alle verdensdeler.

Figuren til venstre gjelder for skips- og skipsrelatert virksomhet i 2009, fra [0.8].

Norge skal i neste tiår bli verdensledende i havrommet



Les mer om morgendagen på sidene 0-8/11

Les mer om morgendagen på sidene 0-12/13

Les mer om morgendagen på sidene 0-14/15

Nye virksomheter (Les mer på sidene 0-16/20)

Fornybar energi fra havet

Havkartlegging og overvåking

Kilder (se side 0-24)

Framtidig utvikling, som beskrevet på etterfølgende sider, er basert på følgende kilder:

- Strategiplan fra Institutt for marin teknikk, NTNU [1]
- Maritim 21 [0.2]
- DNV Technology Outlook 2020 [0.3]
- Verdiskaping basert på produktive hav i 2050 [0.6]

Skipsfart og skipsoperasjoner i framtiden -mer miljøvennlig, men også mer krevende

Skipsdesignere står overfor noen spennende tiår. Høye drivstoffpriser, internasjonale regler som begrenser utslipp, og åpning av et nytt og rikt havområde i nord, gjør at havromsingeniørene må vende tilbake til tegnebrettet.

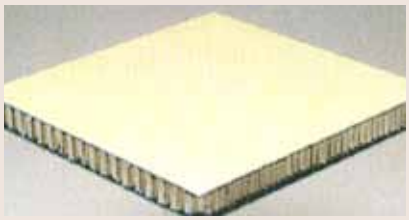
Spredte eksempler på hva den framtidige utvikling kan medføre for skip og skipsfart er vist på sidene 0-8/9/10/11.

Skipsfarten blir mer brenseløkonomisk og miljøvennlig

Selv om skipet oftest er det mest miljøvennlige transportalternativet, står skipsbransjen for 2 til 3 prosent av verdens utslipp av CO_2 og for store deler av den lokale luftforurensningen i form av partikler og gasser som NO_x og SO_2. Som vi ser i de følgende eksemplene, finnes det flere alternativer for å redusere et skips drivstofforbruk.

Optimaliserte skrogformer og radikalt nye konsepter med f.eks. hulrom i skrogets bunn, fylt med luft, reduserer friksjonsmotstanden mot vannet.

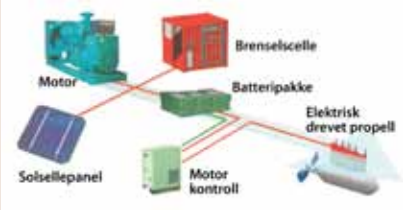
Nye balastsystemer. Bruk av ballastvann forbedrer skipets styrke, stabilitet og sjøegenskaper i ulastet tilstand, men øker brenselsforbruket og utgjør en trussel for havets økologiske systemer.



Laminater bestående av metaller og fiberarmerte materialer, kan redusere tyngden på skipsskroget og dermed også brenselsforbruket.

Optimalt propulsjonssystem reduserer energitapene i systemet. Ulike kombinasjoner av konvensjonelle propeller, podder, elektrisk og mekanisk propulsjon kan skreddersys til ulike skipstyper og gir gode virkningsgrader over et større driftsområde.

Slankt skrog reduserer framdriftsmotstanden. Seil og solcellepaneler gir tilskudd av fornybar energi til framdriften



Mange skipstyper kombinerer elektrisk og mekanisk energi, kall det gjerne en "seilende Prius". Dette gir gode virkningsgrader og lavt brenselsforbruk over et stort driftsområde. Det er også mulig å koble på andre energiprodusenter, som f.eks brenselsceller og solpaneler.

Seil og kite er andre eksempler på bruk av fornybar energi til skipsdrift. For 150 år siden foregikk all verdenshandel med seilskip. På tide å prøve igjen? Kan vi se for oss en renessanse der gamle løsninger kombineres med ny teknologi?

Skipsoperasjonene i olje/gassvirksomheten blir mer krevende

De to viktigste anvendelsene av skip:

- Skipsfart, det vil si transport av gods, varer og mennesker
- Skipsoperasjoner, det vil si assistanse fra havoverflaten av operasjoner som er nødvendige for utbygging og produksjon i olje- og gassvirksomheten. Disse blir vesentlig mer krevende etter hvert som aktiviteten stadig flyttes nordover og til større dyp. Dette gjelder både antall skip som deltar og kompleksiteten av operasjonene

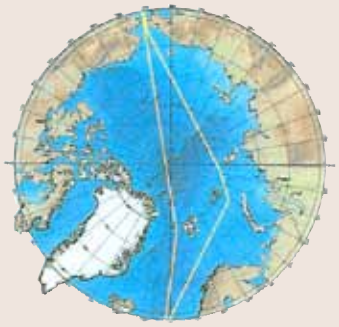
Den norske offshoreflåten vil vokse ytterligere. Høyteknologiske serviceskip av alle typer med topp, avansert utstyr kan settes inn i krevende operasjoner i de fjerneste og vanskeligste farvann.

Nordområdene åpner seg for oss veldig fort

På grunn av global oppvarming kan Arktis være isfri allerede om noen år. Det vil si at vinterisen vil være under ett år gammel og dermed relativ enkel å bryte seg gjennom. Den generelle utfordringen er å gjøre inntoget i Arktis så forsvarlig som mulig. Derfor må vi utvikle kunnskap, teknologi og regelverk som setter oss i stand til å operere i krevende farvann med ekstrem kulde, mørke og langt fra infrastruktur på land.

Beredskap av isbrytere blir viktig. Sideveis isbryting gir en bredere råk.

Skipsoperasjoner i Arktis vil kreve skip med nytt design. Kanskje blir de lukket slik at de fleste arbeidsoperasjonene kan foregå innendørs? Hvordan lage gode skrogformer som fungerer godt i is og åpent farvann?



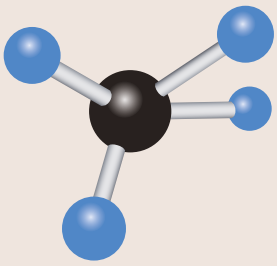
Et skip som seiler fra Yokohama til Rotterdam over Arktis i stedet for om Suezkanalen, kan spare 35 % av brenselsforbruket.

Det kan også bli aktuelt å frakte LNG over polhavet.

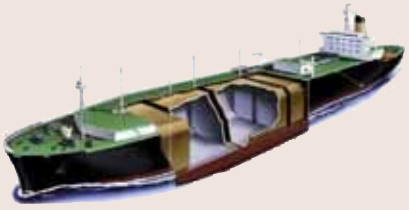
Store deler av arktiske farvann ligger langt bort fra annen infrastruktur. I tillegg karakteriseres de av ekstremvær, kulde, is og mørke. Det kreves grundige risikoanalyser i forkant av operasjoner. Skipsmanøversimulatoren i Trondheim gir realistiske treningsmuligheter for forvann med is.

LNG er framtidens drivstoff for skip

Med LNG (Liquid Natural Gas) som brensel kan CO_2 utslipp reduseres med 25%, NOx-utslipp med 90%, mens SO_2 og partikkelutslipp nærmest kan elimineres. Norske forskere, politikere og næringsliv har som mål at Norge skal være verdensledende innen bruk og transport av gass. Bruk av gass vil øke kraftig også i andre sammenhenger i verden, og en stor del av denne gassen vil komme fra Norge og fraktes på "norsk kjøl".



Hva er LNG? I naturgassen er det fire typer gasser. Den letteste er metan (CH_4). Skal metan transporteres, må det skje enten i rør, i form av komprimert gass (CNG) eller ved å kjøle ned gassen så den går over i væskeform (LNG, Liquified Natural Gas).



To konstruktive løsninger for transport av LNG i skip.

Norsk forskningsprogram: "LNG – Distribusjon og bruk"

Forskningsområder:
- Bruk av LNG i hovedmotorer og hjelpemotorer
- Bunkringsystem for LNG
- Lagring av LNG i skip
- Transport av LNG

Mål i 2020:
- 30 % av norsk nærskipsflåte bruker LNG
- Kompetanse og erfaring på LNG utvikling, drift og distribusjon har blitt en egen "eksportvare" for Norge

Forskningsprogram for næringsliv og forskningsinstitusjoner. Programmet skal innen 2020 gjøre Norge verdensledende på LNG-drift av skip og transport av LNG. Fra [0.2]

Innovativt, robust og fleksibelt

Den norske, maritime næringsklyngen, inklusiv forskningsmiljøene, kjennetegnes allerede i dag av stor oppfinnsomhet og kreativitet. Denne evnen vil forsterkes ytterligere.

På NTNU satses det nå mot et mål om selvstyrte, ubemannede fartøyer og full automatisering av andre systemer til havs.

Større bruk av ubemannede fartøyer med automatiske og intelligente styringssystemer er framtiden, ifølge NTNU. Her er et glimt fra forsknings-aktiviteter i Kybernetikklaboratoriet ved Marinteknisk senter, NTNU.

Væsketransport med ubemannet farkost uten propell. Framdriften etterligner fiskens bevegelser. Overflaten er skjellbelagt for å redusere framdriftsmotstanden.

Framtidige kystsamfunn

Kystsamfunnet vist nedenfor baseres i stor grad på fornybare energikilder, som vindkraft, bølgekraft og varmepumper basert på sjøvann. Ferger, fiskebåter og transport til lands bruker for det meste LNG. Mange kystsamfunn i Norge startet med et skipsbyggeri. I de siste par tiårene har selve skrogene ofte blitt bygget i lavkostland og slept hjem for utrustning ved moderverftet. I framtiden vil det derimot bli mer aktuelt å flytte skrogbyggingen hjem igjen og la store deler av arbeidet gjøres av sveiseroboter. Innovasjon blir altså et konkurransefortrinn i vårt høykostland. Vi regner med at 80 prosent av nybyggingen i Norge vil være offshoreskip, proppfulle av avansert utstyr som i stor grad også er norskprodusert.

Olje- og gassutvinning i framtiden – eventyret fortsetter

Fossile brensler (olje, gass og kull) kommer nok til å være den dominerende energikilden også i de kommende tiårene. I 2020 ventes energiproduksjonen fra fossile brensler å stå for 79 prosent av verdensbehovet.

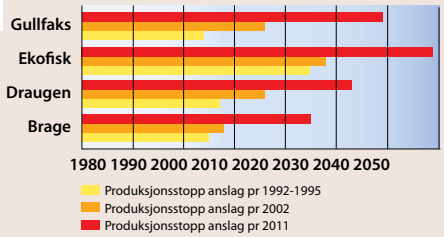
Mens vi venter på inntoget fra fornybare energikilder, er det viktig å utvinne og forbrenne de fossile brenslene med så lav miljøinnvirkning som mulig. Samtidig tar jakten på olje og gass oss til mer krevende brønner, dypere hav og til arktiske strøk. Mulighetene står i kø for en ingeniør innen havromsteknologi. Noen eksempler fra utviklingen er vist her.

Leting etter mer olje og gass vil fortsette, med fokus på sikkerhet og miljø

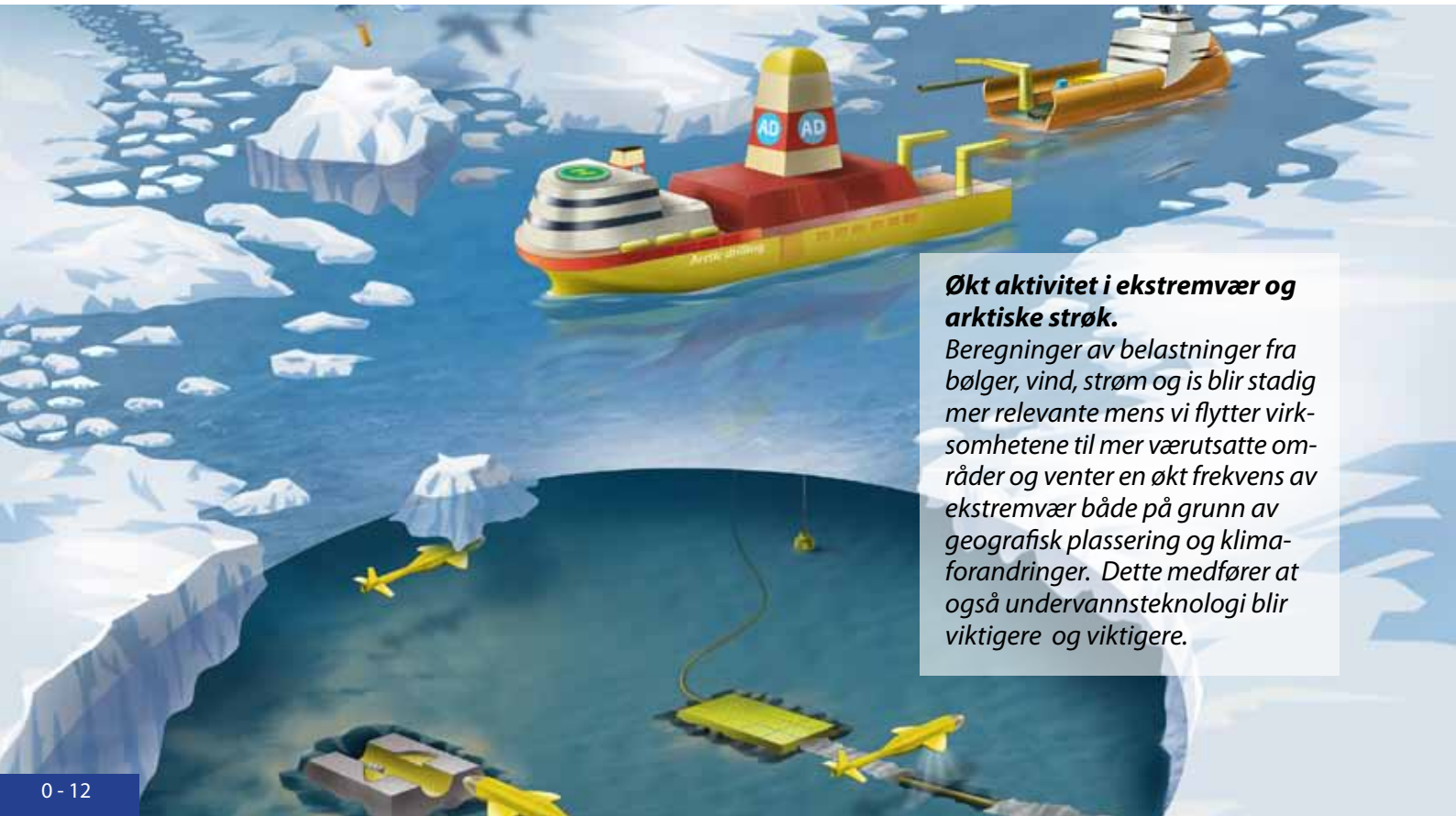
Med bedre leteteknologi og kunnskap gjøres stadig nye funn både i såkalte "modne" havområder (hvor drift allerede foregår) og i nye, krevende havområder (se neste side). Selv så langt inn i framtiden som i 2030, vil olje- og gassressursene fortsatt utgjøre 80% av nivået i 2012.

Avisene "slår på stortromma"! I 2011 fikk vi Avaldsnes-funnet, det tredje største noen gang i Nordsjøen. Også i Barentshavet er det allerede funnet olje og forskerne tror mye mer vil bli funnet.

Også Arktis er et meget løfterikt område for nye olje- og gassfunn.

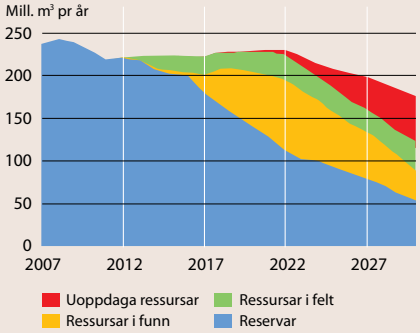


Nye teknologier har stadig gitt økt utvinning også fra "modne" felt. Viktigst har det da vist seg å øke trykket i reservoarene ved hjelp av store kompresorer (økt trykkstøtte). Disse kan etter-monteres på plattformer eller på havbunnen like ved brønnhodet, jf. eksempel øverst på neste side.



Økt aktivitet i ekstremvær og arktiske strøk.
Beregninger av belastninger fra bølger, vind, strøm og is blir stadig mer relevante mens vi flytter virksomhetene til mer værutsatte områder og venter en økt frekvens av ekstremvær både på grunn av geografisk plassering og klimaforandringer. Dette medfører at også undervannsteknologi blir viktigere og viktigere.

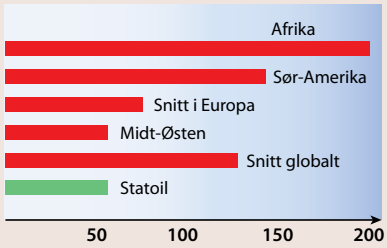
Trykkstøtte fra kompressorer montert på havbunnen er et relativt nytt teknologisprang for å gi økt utvinning på mange av feltene. En slik løsning er planlagt blant annet for Ormen Lange-feltet. Når kompressorene settes i gang i 2020, vil gassproduksjonen komme til å øke betydelig. Fra [0.7]



Utvikling av norske olje- og gassressurser fram til 2030. Fra [0.7]

Produksjonen av olje og gass på norske felt vil fortsette på en ren, energieffektiv og sikker måte

Norge opprettholder sin posisjon som den "flinkeste i verden" til å produsere olje og gass uten at CO_2-utslippene blir uakseptable.



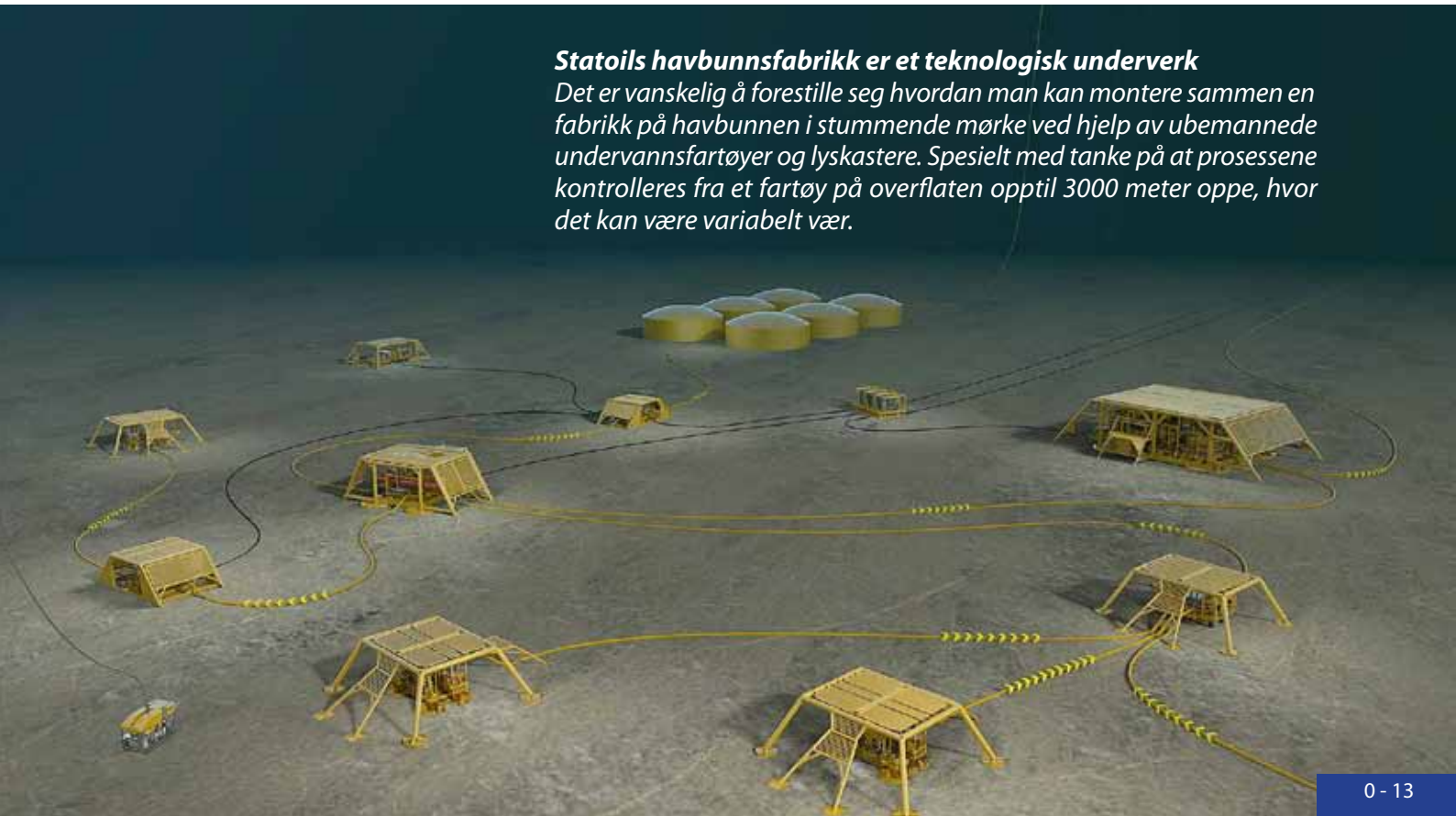
CO_2 utslipp (kg) pr m^3 produsert olje/gass

Dette oppnås ved at energibehovet ved drift av feltene tilstrebes å bli dekket ved elkraft fra land i stedet for fra egen produksjon på plattformene. Videre har Statoil teknologi som gjør det mulig å unngå avbrenning av gass på feltet ("fakling"). De lave CO_2-utslippene er et stort konkurransefortrinn når Statoil satser på deltakelse på utenlandske felter.

Utbygging og produksjon vil flyttes til nye og krevende havområder

Flytende boreskip og rigger kan på 3000 meters vanndyp nå reservoarer av olje og gass som ligger 10 000 meter under havnivået, samtidig som det er ekstremvær på overflaten eller riggen befinner seg i arktiske strøk. Sammen med Brasil og USA er Norge ledende på subsea systemer (undervannssystemer). I de neste årene vil denne posisjonen forsterkes ytterligere, når prosesseringen av brønnstrømmen (utskilling av sand og vann, og separering av olje og gass) også vil foregå på havbunnen. I tillegg kommer også kompressoranlegg for trykkstøtte og de vanlige betjeningsorganene for et eller flere brønnhoder. Alt dette vil si at det egenlig bygges opp komplette fabriker på havbunnen. Figuren nedenfor viser hvordan Statoil ser for seg en komplett havbunnsfabrikk. Transport til markedene kan skje via rør eller opplasting av skip på overflaten.

Statoils havbunnsfabrikk er et teknologisk underverk
Det er vanskelig å forestille seg hvordan man kan montere sammen en fabrikk på havbunnen i stummende mørke ved hjelp av ubemannede undervannsfartøyer og lyskastere. Spesielt med tanke på at prosessene kontrolleres fra et fartøy på overflaten opptil 3000 meter oppe, hvor det kan være variabelt vær.



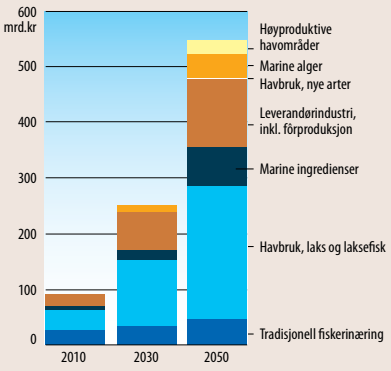
Fiskeri og havbruk i framtiden - om få år vil fisk bli Norges nest viktigste eksportvare

For fiskeriene vil hoveudfordringene i framtiden være å regulere uttaket av fisk slik at bestandene ikke overbeskattes. Dette er et stort problem for andre fiskerinasjoner, men Norge har vært flinkest i verden til å forvalte sine fiskeressurser. Vi kan derfor i framtiden opprettholde dagens fangstvolumer av tradisjonelle arter. Begynner vi å fiske på andre arter og dessuten blir flinkere til å ta vare på fisk og fiskerester som i dag kastes, er det imidlertid rom for betydelig øking i verdiskapingen i fiskeriene i årene som kommer.

Havbruk er en industri som vokser med omtrent 9 prosent hvert år. På grunn av strømforhold er norske farvann blant de mest ideelle i verden. I dag er oppdrettslaks en stor industri og en kjent matvare i hele verden, men fortsatt har vi bare sett toppen av isfjellet på hva havbruk potensielt kan produsere av mat.

Den enorme veksten i havbruk vil fortsette. I fiskeriene vil fangst på lavere nivå i næringskjeden øke.

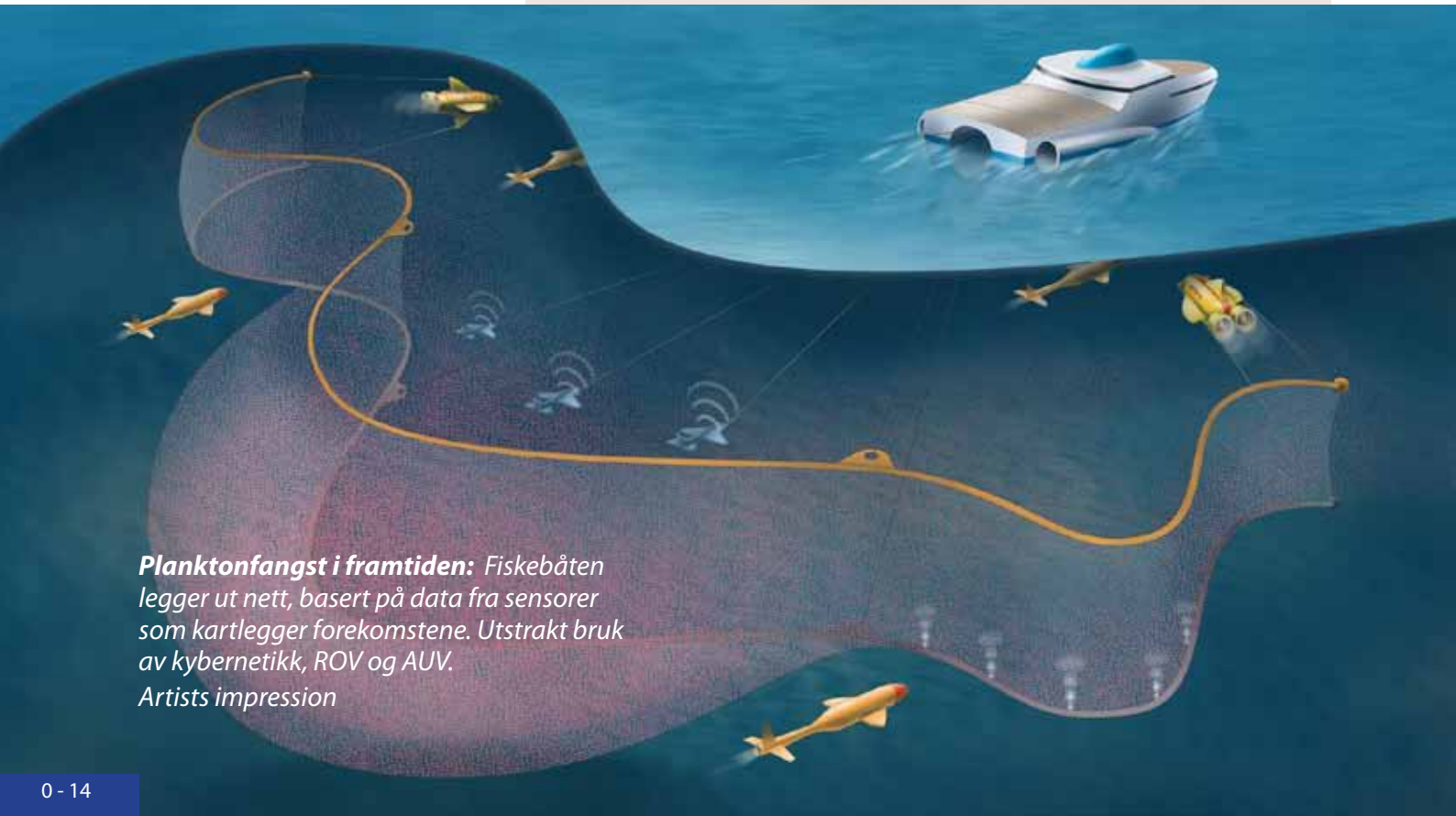
Også på andre måter ventes en kraftig vekst og sjømatnæringen vil om få år bli Norges nest viktigste næring. Ser vi langt nok framover, mener mange at denne næringen til og med vil konkurrere med olje/gassnæringen om førsteplassen.



Framtidig verdiskaping i sjømatnæringen. Kilde: [0.6]

De tre største eksportnæringene i Norge er alle relatert til havromsteknologi. Figuren gjelder for 2010. Om få år vil den fantastiske utviklingen av havbruk sende eksport av fisk opp på 2. plass.

For hvert trinn i næringskjeden antas et energitap på 90 %. Potensialet for matproduksjon er enormt om vi kan beherske oppdrett av småfisk eller dyrke/fange plankton for kost eller energiproduksjon.



Planktonfangst i framtiden: *Fiskebåten legger ut nett, basert på data fra sensorer som kartlegger forekomstene. Utstrakt bruk av kybernetikk, ROV og AUV. Artists impression*

Antarktisk krill inneholder supersviktige næringsstoffer, som kan brukes som kosttilskudd. Denne fiskebåten er meget avansert, er 70 meter lang og har fem dekk. Foredlingen av krillen skjer om bord. De viktigste sluttproduktene kan koste mer enn 1000 kr/kg

Det holdes konstant fokus på bærekraftighet. Oppdrettsnæringen er storforbruker av vilt fanget fisk til fôr. I framtiden vil vi måtte utvikle fiskefôr som bedrer bærekraftigheten. Samtidig må det jobbes for å stanse rømming av oppdrettsfisk som truer den ville fiskebestanden. Bekjempelse av sykdommer er også av største viktighet.

Stor teknologiutvikling i fiskeriene

Denne vil primært være knyttet til de minste fiskebåtene. Sjarker erstattes av større båter, med bedre plass til etterbehandling av fangsten ombord og med muligheter for bruk av selektive og flere typer fiskeredskaper samtidig.

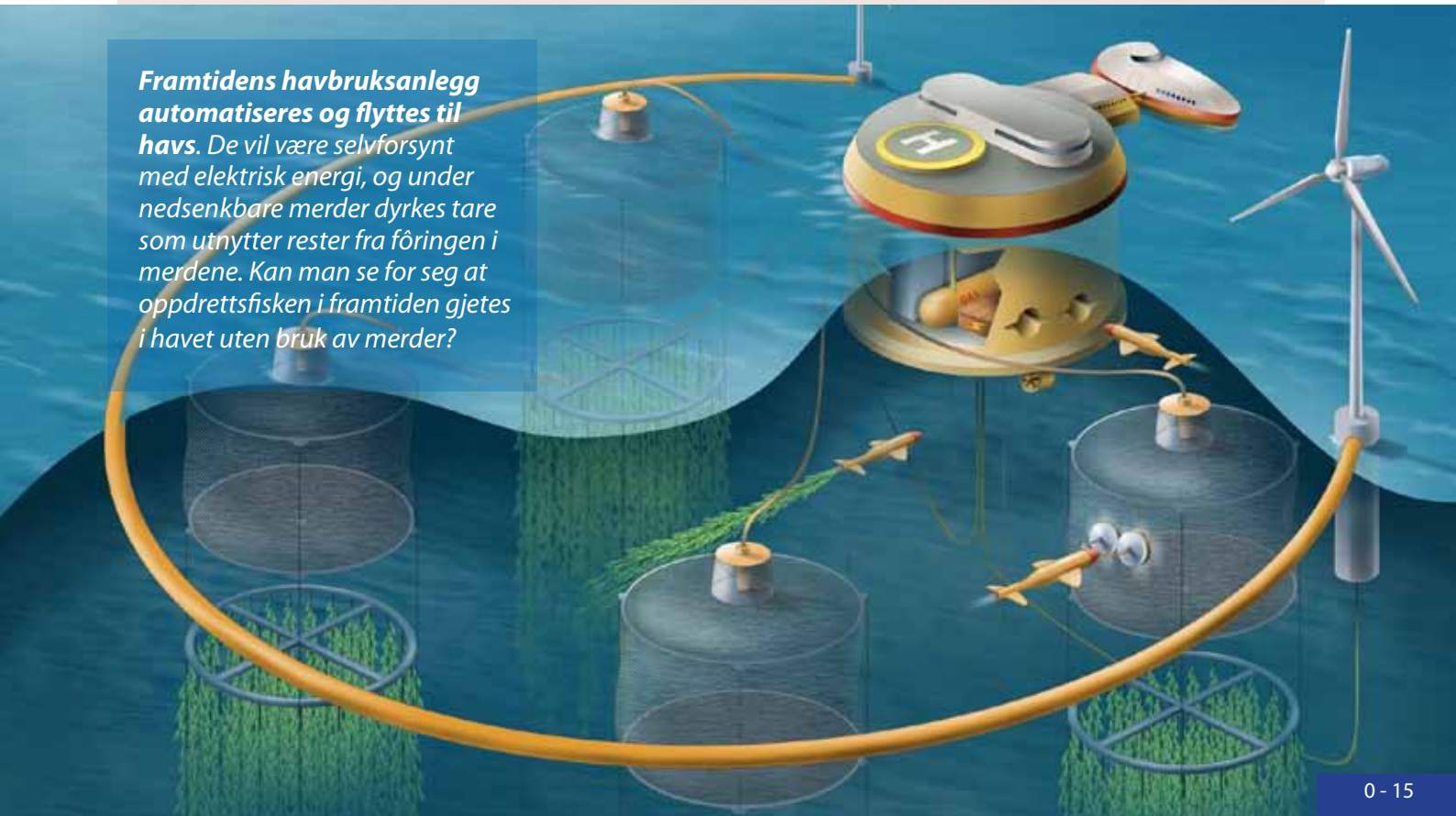
Økende bruk av LNG som brensel kommer trolig både i små og større båter. Alt dette bedrer energieffektiviteten pr. kg fanget fisk, noe som er av sentral betydning for en videre bærekraftig utvikling. Fiskefangst er nemlig energikrevende, og gir derfor store CO_2-utslipp per kg fisk.

Framtidens sjark kan bli dobbelt så stor som før (2—3 konsesjoner slås sammen).

Anleggene for fiskeoppdrett vil gjennomgå store forandringer

Videre teknologiutvikling innen havbruk vil gi anlegg som vokser i størrelse. Lukkede anlegg kan også bli aktuelle, se side 0-10. Nedsenkbare merder vil bli vanlig, og teknologier fra offshorenæringen vil utgjøre en stor forskjell, som for eksempel kybernetikk, automatisering, bruk av undervannsfartøyer og spesialdesignede servicefartøyer.

Havbruksanleggene vil flyttes til fjerntliggende lokaliteter. Dette vil avlaste kystsonene, minske lokal forurensing fra fiskefôr, redusere smittefaren og separere oppdrettsfisk fra andre økologiske systemer. Merden senkes ned i dårlig vær. Den er forankret i bunnen.



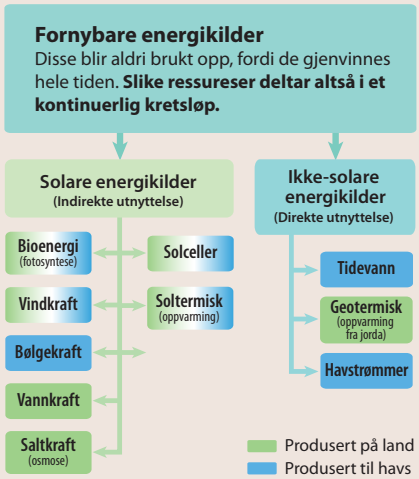
***Framtidens havbruksanlegg automatiseres og flyttes til havs**. De vil være selvforsynt med elektrisk energi, og under nedsenkbare merder dyrkes tare som utnytter rester fra fôringen i merdene. Kan man se for seg at oppdrettsfisken i framtiden gjetes i havet uten bruk av merder?*

Fornybar energi fra havet i framtiden

Havrommet er fullt av fornybar energi i form av vind, bølger, strømmer og biologisk materie som vi har muligheten til å utnytte på en miljøvennlig måte. Per dags dato er det tøft å konkurrere mot fossile energikilder på kostnadseffektivitet, men i det neste tiåret ventes oppstarten av flere store prosjekter, som sammen med teknologiutvikling vil få ned kostnadene. Storbritannia planlegger å bygge rundt 10000 vindturbiner det neste tiåret, og investeringer i vindkraft i USA og Kina ventes å nå henholdsvis 850 og 2250 milliarder kroner innen 2020. Norge ligger også i startgropa.

Bølgekraft er annen interessant fornybar energikilde. Dette gjelder særlig for Norge, som har en både lang og værutsatt kyst. Det finnes en lang rekke forskjellige metoder for konvertering av bølgekraft til elektrisk energi.

Havet kan også brukes til produksjon av bioenergi. Dette er spesielt interessant fordi vi på sikt må forbeholde jordas landarealer til matproduksjon.



Oversikt over fornybare energikilder. De viktigste av havenergiene (blå) er vindkraft og bølgekraft. På sikt kan også bioenergi fra tare og andre planter i havet bli viktig. Bruk av solceller forutsetter store arealer, se side 0.8.

Vindkraft. Økende størrelser, dypere vann

Ved å gjøre vindturbinene flytende, er det enklere å øke størrelsene og plassere dem på steder med optimale forhold. De vil komme til å ha enda "smartere" design enn i dag, med bl.a. bedre regulering av rotorbladene og med turbinen direkte koblet til den elektriske generatoren (uten gir).

Verdens største vindturbin, Hywind, på 10 MW skal utplasseres i 2013. Den vil flyte som en halvfull flaske, men være forankret til bunnen. Rotorbladene utgjør en sirkel med 145 m i diameter og sentrum 162 m opp.

Det arbeides med planer og uttesting av flere typer vindmøller og bølgekraftverk for utplassering i havet. Disse kan kobles sammen til en sentral overføring av elektrisk kraft mot land. Visste du at styring av vindmøller ligner på styring av propeller på skip?

Transport og utplassering av vindturbin. Både skipet og turbinens understell bruker regulering av ballastvann ombord for å oppnå den vertikale sluttstillingen. Systemet er designet av en gruppe marinstudenter ved NTNU.
Les mer på: www.windflip.com

Bølgekraft, mange konsepter

Også når det gjelder bølgekraft, er Norge med sine kystområder svært heldig stillet. Hovedutfordringen blir å finne fram til de mest økonomiske og driftssikre konseptene.

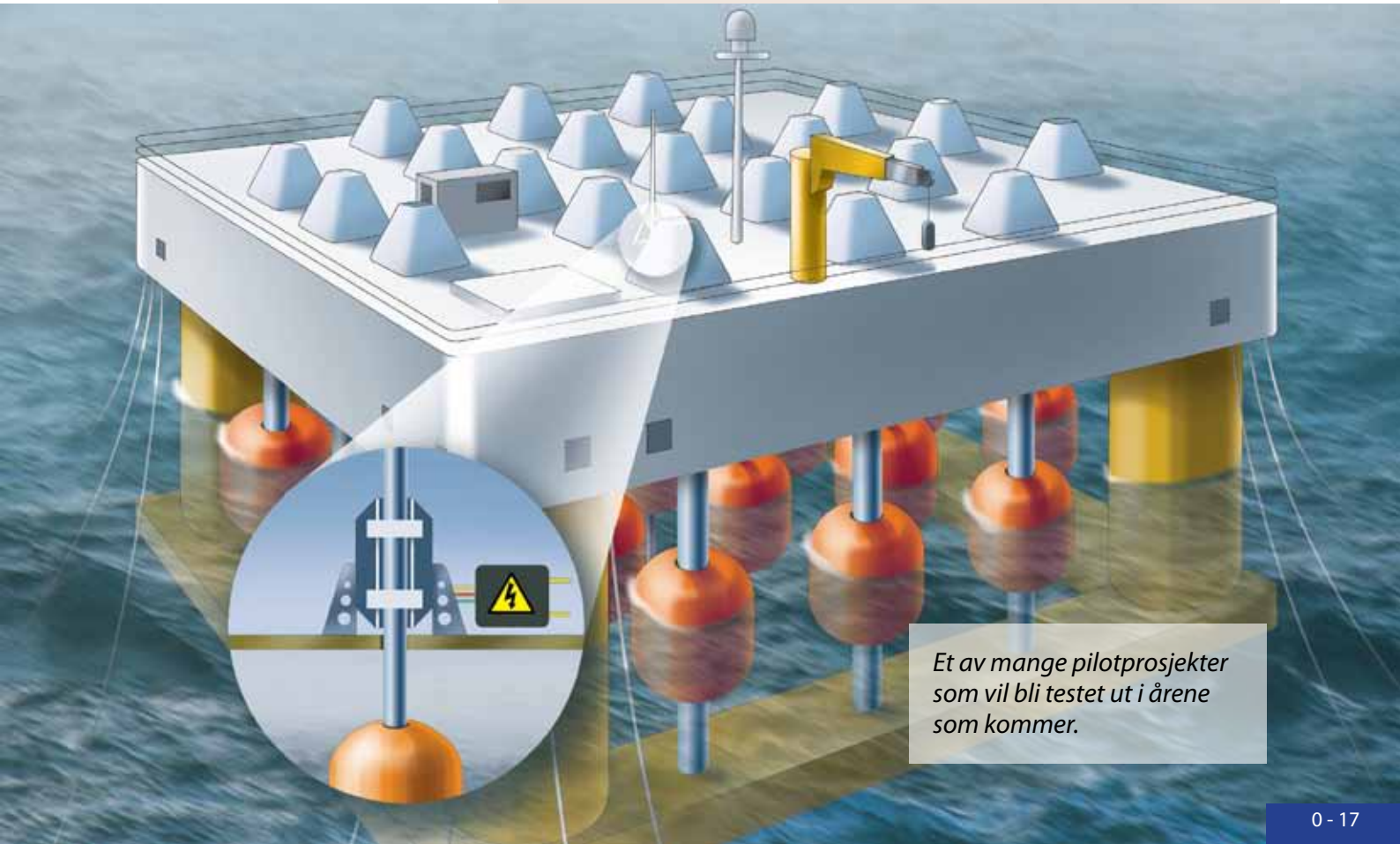
Noen metoder for utnyttelse av bølgekraft til produksjon av elektrisk energi. Dette er bare et svært lite utvalg.

Eksempel på utnyttelse av bølgekraft til framdrift av skip. Ikke uventet er det, som i eksemplet ovenfor, mange metoder og systemer å velge mellom. Hovedutfordringene er driftssikkerhet og lønnsomhet.

Bioenergi fra havet

På sikt bør landområder på jorda brukes til produksjon av mat og ikke til energi. Derfor er planter som vokser i havet, f.eks. tang og tare, ekstra spennende. Norge har en lang kyst og tareveksten forbruker 8—10 tonn CO_2 per hektar per år. Dette er like mye som regnskog forbruker. Store arealer vil være tilgjengelige for dyrking.

Biobrensel fra tare kan bli et karbonnøytralt brensel for skipsmotorer. Norges lange kystlinje egner seg godt til dyrking av denne "grønne energien fra havet".



Et av mange pilotprosjekter som vil bli testet ut i årene som kommer.

Havromskartlegging og overvåkning av marine ressurser og miljø

For å forvalte norske havressurser og regioner er det påkrevet å bruke ny teknologi for å kartlegge og overvåke store havområder med hensyn på havoverflate, vannkolonne og havbunn. For å få så god romlig oppløsning som mulig må målingene skje så nærme objektene av interesse, som mulig. Disse objektene kan være organismer, mineraler, vrak og andre fortidsminner., forskjellige bunntyper og eventuelle gasslekkasjer fra havbunn ved f.eks. CO_2 deponering.

Kartlegging og overvåkning av marine ressurser stiller store krav til FoU og anvendelser

Av denne grunn har NTNU med 5 fakulteter dannet AUR-Lab - Applied Underwater Robotics Laboratory (NTNU´s Laboratorium for anvendt robotteknikk) for å utvikle marine undervannsroboter, sensorteknologi og metoder for en mer automatisert identifisering, kartlegging og overvåkning av marine ressurser og havmiljø.

Mot automatisert kartlegging og overvåkning

Vi har nå et skifte av tenkemåte som går fra punktmålinger fra havgående fartøyer til bruk av undervannsroboter som er fjernstyrte (ROV, Remotely Operated Vehicles) - eller autonome (Autonomous Underwater Vehicles, AUV) som gir oss detaljerte målinger over store områder, inkludert 3D data av vannkolonnen. Dette gir oss en bedre forståelse av havstrømmer, klimaprossesser, biologi, geologi, kjemi og arkeologi. For kartlegging og overvåkning av havoverflaten benyttes i tillegg skip, bemannede og ubemannede fly og satellitter.

I de siste årene har undervannsroboter vist seg å være viktige instrumentbærere for å gi oss målinger over større områder (0,1—1000 km^2) av fysiske, kjemiske og biologiske variable. Slike roboter med optiske og akustiske sensorer er svært viktig i videre arbeid med integrerte teknologiplattformer for å få en bedre forvaltning og beslutningstaking av norske ressurser, inkludert integrert miljøovervåkning.

Integrert miljøovervåking kan muliggjøres ved bruk av ulike teknologier, som satellitter, ubemannede fly og skip, undervannsroboter og bunnfaste installasjoner.

Framtidens arbeidshester utstyres med avansert teknologi

Vi går også mot en større bruk av autonome roboter over og under vann, ustyrt med sensorer som automatisk kan detektere forskjellige objekter av interesse. Disse autonome robotene med "intelligente" sensorer vil sende data til endebrukere ved hjelp av stasjonære og mobile undervannskommunikasjonsnettverk. Likeledes kan robotene, mens data blir sendt til basestajonene, lade opp sine batterier ved hjelp av "docking stations".

Utprøving og verifisering av nye metoder for kartlegging og overvåkning av økosystemer, mineralforekomster, kulturminner, olje og gass, og havbunnstyper vil bli utført ved "NTNU Subea senter" ved Trondhjem biologiske stasjon. Dette vil skje ved å bruke NTNU´s forskningsfartøy RV Gunnerus for testing av roboter og sensorer ned til flere hundre meters dyp i Trondheimsfjorden. Etter dette vil så robotene og sensorene kunne brukes på alle verdenshav med hensyn på kartlegging og overvåkning av store havområder.

Bio-prospektering, søken etter "ny medisin" fra dypet

Bio-prospektering, hvor en leter etter nye organismer som inneholder nye uprøvede kjemikalier som kan brukes for eksempel innen nye typer antibiotika og kreftmedisin, er også en ny industri hvor en ved NTNU suksessfullt har brukt ROV teknologi til å identifisere og hente nye organismer fra store dyp til videre analyser i laboratoriet. Her har vi funnet nye typer antibiotika som dreper resistente sykehusbakterier og andre kjemikalier som har vært meget effektive innen blodkreftbekjempelse.

Havmiljømodeller og modellbaserte forvaltningsmetoder

Videre kan disse undervannsrobotene gi oss detaljinformasjon (3D) som kan brukes til å forstå og verifisere havmiljømodeller og utvikle modellbaserte forvaltningsmetoder.

Eksempler på spennende, framtidsrettede aktiviteter for dagens teknologiinteresserte ungdom

- Undervannsrobotikk - integrerte teknologiplattformer og sensorer
- Autonome systemer (under vann, overflate og fly) og operasjoner.
- Stasjonære og mobile nettverk for undervannskommunikasjon
- Metoder for kartlegging og overvåkning av økosystemer, kulturminner og havbunn
- Bio-prospektering av havrommet
- Havmiljømodellering og modellbaserte forvaltningsmetoder.

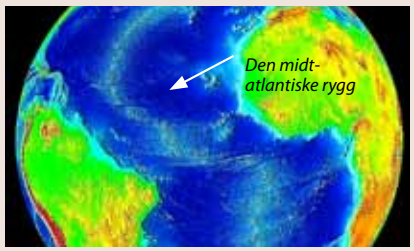
Marin mineralkartlegging og utvinning i framtiden

Allerede på slutten av 1800-tallet ble det oppdaget forekomster av mineraler på bunnen av dyphavene. De fantes spredt utover, som opptil en desimeter store, sammenpressede klumper av sedimenter, rike på mangan og andre metaller. Forekomster av denne typen ble derfor kalt manganknoller eller manganoduler. En annen hovedtype mineralrike kilder på havbunnen forekommer som store, massive sulfidavleiringer. Disse finnes særlig i nærheten av tidligere vulkanske områder i dyphavene.

Interessen for disse forekomstene er sterkt økende. Ny teknologi gir reduserte kostnader både ved kartlegging og utvinning, fordi Norge kan utnytte sin kompetanse fra offshore installasjoner og drift. Det ventes derfor en økt satsing fra norsk side i årene som kommer.

I de neste årene starter for alvor kartlegging av dyphavene

Først må drivverdige forekomster kartlegges. Flere områder er allerede kjente og utvinning har begynt. Man er imidlertid sikker på at det finnes store forekomster som ennå ikke er oppdaget. Blant annet er tidligere vulkanske områder på begge sider av den midtatlantiske ryggen svært aktuelle. Kunnskaper om dannelse av mineraler på havbunnen må økes.

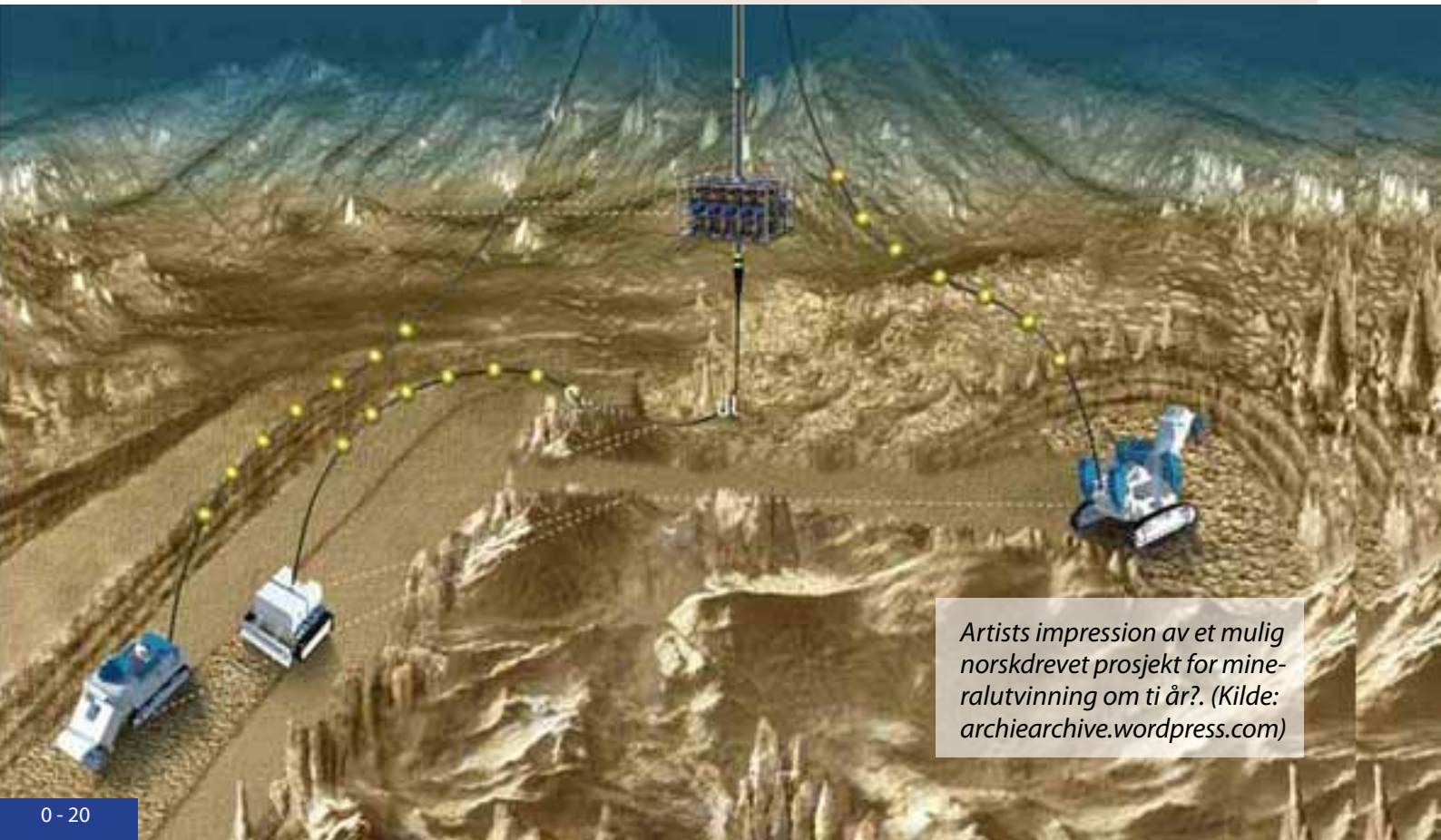


Den midtatlantiske ryggen alene gir enorme områder for kartlegging av mineralforekomster. Fra [0.5]

Hvordan utvinnes mineralene fra havbunnen?

Manganmodulene ligger mer eller mindre fritt på havbunnen og er i prinsippet relativt enkle å samle sammen av ROVer eller AUVer. De kan så enten suges opp gjennom slanger eller heises opp i kurver til et lasteskip på overflaten. Det samme kan gjøres med utgravinger fra sulfidavleiringer. Miljøkonsekvenser må utredes.

Mineralutvinning til havs. (KIlde: Hydro International)



Artists impression av et mulig norskdrevet prosjekt for mineralutvinning om ti år?. (Kilde: archiearchive.wordpress.com)

Muliggjørende teknologier

"The digital big-bang"

Den teknologiske utvikling skyter fart på mange områder i stadig større tempo. Ved å observere endringene i våre hjemlige omgivelser de siste 5-10 årene, vil vi raskt konstatere hvor fort utviklingen går, spesielt innen sensor, data- og kommunikasjonsteknologi. Dagens mobiltelefoner har f. eks. like stor regnekraft og beregningskapasitet som store datamaskiner hadde for bare noen få år siden.

Teknologisk utvikling

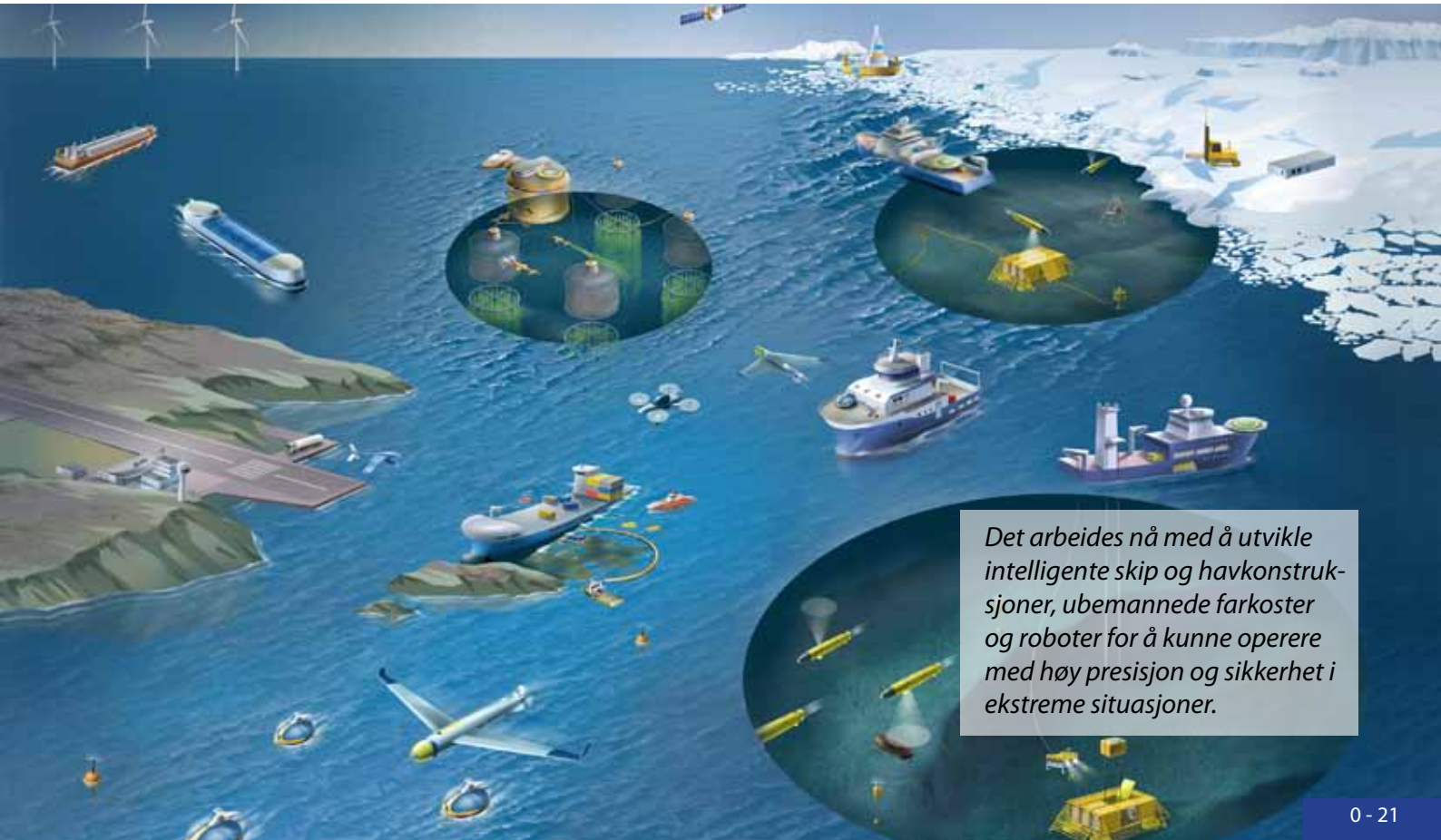
Når vi tar for oss teknologiske utviklingstrender, er det mange faktorer som spiller inn, se figur. Figuren er viktig i mange sammenhenger. Den forteller også hvordan NTNU har utviklet sin strategi for kjernevirksomhetene innen havromsteknologien.

Eksempler på drivkrefter, muliggjørende teknologier og kjerneteknologier i teknologiske utviklingsprosesser

Drivkrefter
a. *Mat- og energitilgang*
b. *Miljø- og klimautfordringer*
c. *Økonomi- og handelsutvikling*
d. *Rammebetingelser*
e. *Tilgang på kunnskap*
f. *Teknologi*
g. *Uforutsette hendelser, ulykker*
h. *Samfunnsmessige forhold*

Muliggjørende teknologier
i. *Materialteknologi, nye typer*
j. *Informasjons- og kommunikasjonsteknologi (IKT)*
k. *Måle- og instrumentteknologi*
l. *Bioteknologi*
m. *Nanoteknologi*

Kjerneteknologier *i denne boka er knyttet til virksomhetene:*
n. *Skipsrelatert virksomhet*
o. *Olje-/gassutvinning*
p. *Fiskeri- og havbruk*



Det arbeides nå med å utvikle intelligente skip og havkonstruksjoner, ubemannede farkoster og roboter for å kunne operere med høy presisjon og sikkerhet i ekstreme situasjoner.

Alt dreier seg om kunnskap

Flerfaglig kunnskap er avgjørende for ny innovasjon

Integrasjon av disipliner og teknologier blir også stadig viktigere. Ved å integrere naturvitenskapelige felter som marin biologi, kjemi, geologi og arkeologi med teknologier, skaper vi helt nye muligheter for teknologiske gjennombrudd og bruksområder.

Kunnskap er kjernen i alt som vi gjør. På side 0-6 er gitt en oversikt over de tre kjernevirksomhetene som drives til havs, og det ble påpekt at disse i meget høy grad var kunnskapsbaserte. Dette betyr at de bedriftene/næringene som driver virksomhetene må ha ansatte med store kunnskaper og høy kompetanse.

Utdanning og forskning. Den nødvendige kunnskap skaffes ved kontinuerlig videreutvikling i bedriftene og ved ansettelse av personer med relevant utdanning fra ingeniørhøgskoler og universiteter. Disse institusjonene driver også forskerutdanning og forskningsvirksomhet i samarbeid med næringslivet. Framtidsvyene på sidene foran er basert nettopp på forskningsplaner fram til 2020 utviklet i et slikt samarbeid.

NTNU gir en omfattende undervisning innen alt som har med virksomhetene til havs å gjøre, se nedenfor. Den foreliggende boka, Havromsteknologi, er ment å motivere og inspirere elever i videregående skole til å velge studier innen teknologi i fortsettelsen av utdanningen.

NTNUs kompetanseområder

Fagområder ved Institutt for marin teknikk, NTNU:
Marin hydrodynamikk
Marine konstruksjoner
Marin kybernetikk
Marint maskineri og forbrenningsteknikk
Marin pålitelighet, tilgjengelighet, vedlikehold og sikkerhet
Marin design og logistikk
Arktisk teknologi

Anvendelser av fagområdene:
Skipsfart og skipsoperasjoner
Olje- og gassutvinning
Fiskeri og havbruk
Fornybar energi fra havet
Havkartlegging og overvåking

Øvrige marinrelaterte fagfelt ved NNTU:
Marin akustikk, optikk, kommunikasjon og fjernmåling
Marin biologi og kjemi
Marin arkeologi
Marin bioteknologi
Marinforedling, prosessering og vannbehandling
Teknologi og metoder for marin og maritim forvaltning

Eksempler på spennende, framtidsrettede ativiteter for dagens teknologi-interesserte ungdom

- *Ligger på internett: www.marin.ntnu.no/havromsteknologi*
- *Enkeltkapitler kan skrives ut separat og tas inn i faget "Teknologi og forskningslære" eller andre fag i vgs. i passende omfang*
- *Er tilpasset fysikkfagene i studiespesialiserende retning med realfag i vgs., og viser hvor stor nytte man kan ha av disse fagene*
- *Legger stor vekt på beregninger som kan gjennomføres med det nevnte grunnlaget*
- *Gir et godt grunnlag for gjennomføring av prosjektoppgaver i "Teknologi og forskningslære", f.eks. "Den unge skipsdesigneren"*
- *Gir et godt grunnlag for deltakelse i den årlige, landsomfattende konkurransen Ocean Space Race i Havbassenget ved Marinteknisk senter i Trondheim*

Et fagområde med mange muligheter

Torbjørn Digernes, Rektor NTNU

- Norge er en liten nasjon i verden, men en stormakt på havet. Både innenfor skipsfart, petroleumsvirksomhet til havs, fiskeri og havbruk er Norge blant de store nasjoner i verden. Alle disse næringene er globale, og det finnes knapt bransjer med mer allsidige muligheter. Jeg kan derfor varmt anbefale marin teknikk som karrierevei for ungdom som ser etter et spennende yrke.
- Bruk tid på matematikken og fysikken i videregående skole – det er selve grunnlaget for ingeniøryrket. Men ikke glem norsken, du må kunne uttrykke deg skriftlig, og heller ikke engelsken, du må regne med å bruke engelsk som arbeidsspråk allerede fra studietiden.

Maren Kristoffersen, Det Norske Veritas på Høvik

- Jeg jobber i Det Norske Veritas (DNV) med skrog-godkjenning av borerigger. Arbeidet er variert, og strekker seg fra enkle håndberegninger til mer kompliserte analyser. Jeg startet i DNV som internasjonal trainee der jeg hadde tre ganger åtte måneders perioder i forskjellige avdelinger i DNV, hvorav en periode var i utlandet.
- Et høydepunkt i karrieren var å jobbe på verdt i Sør Korea i åtte måneder. Det var veldig spennende å oppleve en annerledes jobbhverdag enn min typiske kontorhverdag, og spennende å få oppleve en annen kultur og treffe andre nasjonaliteter.

Martin Brandshaug, STX OSV DESIGN i Ålesund

- Min karriere begynte som stabilitetsingeniør for Ulstein Design & Solutions AS. Der jobbet jeg i nesten to år, før jeg begynte i STX OSV Design.
- Jeg studerte på Marin Teknikk ved NTNU i Trondheim. Jeg likte realfag fra videregående, og tenkte at jeg burde velge sivilingeniør for å få dyrket den interessen. Tilfeldighetene plasserte meg på kystvaktskipet KV Svalbard under førstegangstjenesten, og dette var så inspirerende at jeg valgte å bli skipsingeniør. Det har jeg ikke angret på!

Fredrik Dukan, PhD stipendiat, Institutt for Marin Teknikk, NTNU

- Jeg jobber med automatisering av fjernstyrte undervannsfarkoster (ROV). Det vil si at jeg forsker på hvordan ROV'er kan navigere og gjøre operasjoner av seg selv uten en pilot som styrer den.
- Marin teknikk kan anbefales for deg som er interessert i teknologi og maritim industri. Sannsynligvis vil interessene dine endre seg etterhvert som du lærer mer, og du velger siden hvilke områder du vil spesialisere deg i. Det er mange felt innen maritim virksomhet der du kan gå i dybden.

Hva er bærekraftig utvikling?

Dette er en utvikling som imøtekommer dagens behov
uten å forringe mulighetene for kommende generasjoner
til å få dekket sine behov

Visjon:

Norge er den mest attraktive lokalisering for globalt,
kunnskapsbasert og miljørobust maritimt næringsliv.

Referanser

0.1 NTNU/iVT rapport: Fagplan 2011-2020.
Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi. 30.03.2012

0.2 Maritim 21: En helhetlig maritim forsknings- og innovasjonssatsing
Mai 2010. E-post: post@maritim 21.no

0.3 DNV: Technology Outlook 2020

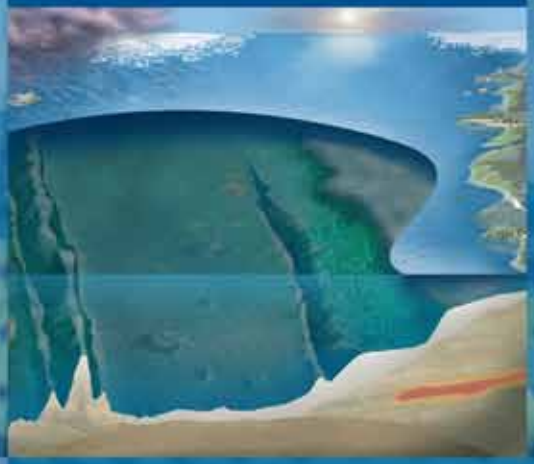
0.4 Statistisk sentralbyrå. Statistisk årbok 2011 (www.ssb.no)

0.5 Wikipedia. Den frie encyklopedi

0.6 Det Kongelige Norske Videnskabers Selskab / Norges Tekniske
Vitenskapsakademi / Sintef: Verdiskaping basert på produktive
Hav i 2050

0.7 Fakta. Norsk petroleumsverksemd 2012. Olje- og energidepartementet,
Oljedirektoratet

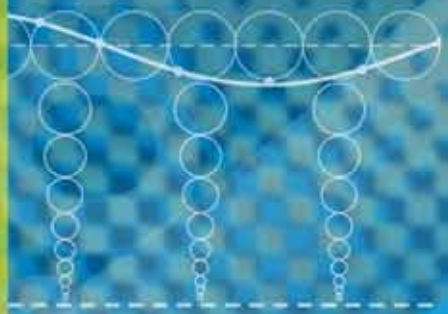
0.8 Torgeir Reve, Amir Sasson: Et kunnskapsbasert Norge. Universitetsforlaget.
Oslo. 2012



Forfattere: Dag Myrhaug og
Bjørnar Pettersen

Havrommet og havmiljøet

Havromsteknologi



Innhold

Innledning
Havkloden, illustrasjon....2
Generelt om havrommet....4
Generelt om havmiljøet....6
Vær og vind
Coriolisakselerasjon....8
Globale vindsystemer....10
Værsystemer....12
Bølger
Generelt om bølger....16
Bevegelse av bølger....18
Dannelse av bølger....20
Energitransport i bølger....22
Interferens av bølger....25
Bølger som nærmer seg kysten....27
Tidevannsbølger....30
Havstrømmer (Anders Endal)....32
Vannets fysiske egenskaper (Anders Endal)....36
Havromsovervåking og kartlegging (Fredrik Dukan, Geir Johnsen og Asgeir Sørensen)....38
Oppgaver....44
Referanser....46

NTNU
Institutt for marin teknikk

1

Havkloden

Det er mer enn ti ganger så mye vann under havoverflaten som det er land- og fjellmasser over havoverflaten. Jordkloden burde derfor helst vært kalt havkloden eller vannkloden

Havene dekker omtrent 71 % av jordas overflate. Land- og fjellmassene synes enorme, men dypene i havrommet er enda mer tankevekkende. Den høyeste fjelltoppen på jorda ligger 8848 meter over havet (Mount Everest), mens den dypeste delen av havbunnen ligger nesten 11 000 meter under overflaten (Mariana Trench i Stillehavet).

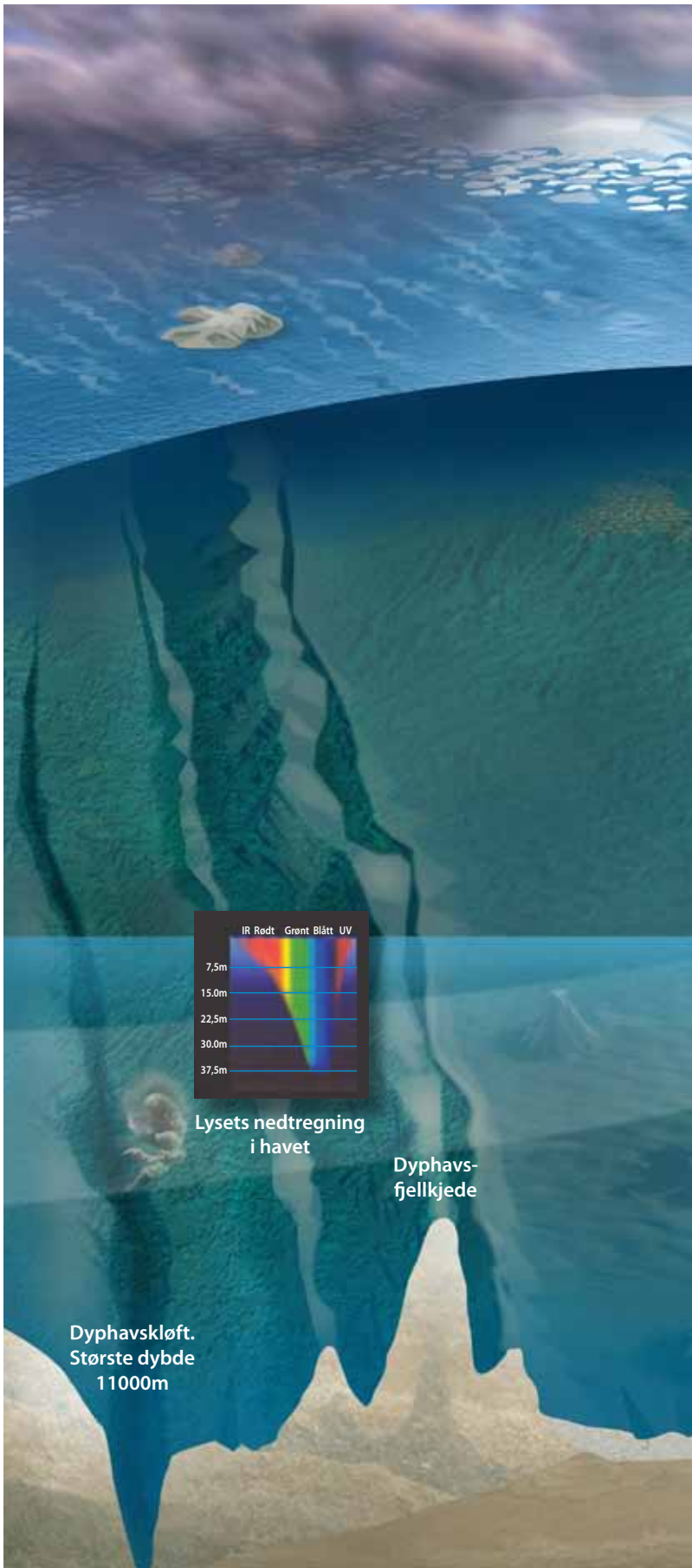
Den midlere høyden av alle land- og fjellmassene over havnivået er omtrent 840 meter, mens den midlere dybden av havene er rundt 3800 meter. Tenker vi tredimensjonalt, betyr dette at volumet av havvannet er mer enn ti ganger volumet av land- og fjellmassene.

Enda et eksempel på havets enorme dimensjoner:
Hadde hele klodens overflate vært dekket av vann, ville den gjennomsnittlige havdybden vært 2700 meter.

"Intet er så rummelig som havet,… *Men hva havet er for dem, der bor langs stranden, får ingen vite; for de sier ingenting. De lever hele sitt liv med ansiktet vendt mot sjøen. Havet er deres selskap, deres rådgiver, deres venn og deres fiende, deres erhverv og deres kirkegård..*

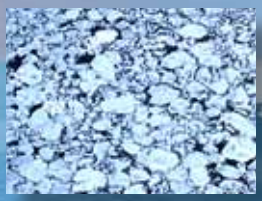
...ta så en av disse strandboere, flytt ham langt inn i landet mellom fjellene i den yndigste dal du kan finne; gi ham den beste mat, og de bløteste senger. Han vil ikke røre din mat, sove i sengene; men uten å se sig om, vil han klatre fra fjell til fjell, inntil han langt– langt ute skimter noget blått, han kjenner. Da går hans hjerte op; han stirrer mot den lille blå stripe, som glitrer derute, inntil det begynner å glitre blått altsammen; men han sier ingen ting.–"

Alexander L. Kielland: Garman & Worse, 1880



Havrommet og havmiljøet

Isfjell



Drivis

Strømmer ved kysten

Mineraler

Næringskjeden i havet

Kontinentalsokkel

Dyphavsåser

Kontinental-
skråning

4000m

Dyphavsslette

Kontinental-
jordskorpe

Generelt om havrommet

Begrepet "havrommet"

Begrepet "havrommet" er ikke nytt. Det kalles på engelsk "ocean space" og dette uttrykket ble introdusert i tidsskriftet "New Scientist and Science Journal" allerede for 40 år siden. Senere har det blitt mye brukt både i internasjonale traktater og i vitenskapelige sammenhenger.

Utvinning av olje- og gassressursene i havrommet er ofte ekstremt komplisert

Det skjønner vi av illustrasjonen på neste side som viser "artists impression" av utbyggingen av et gassfelt, "Ormen Lange", 130 km ute i Norskehavet. Havdybden i området er ca. 1000 m og reservoaret ligger ytterligere 1800 m under havbunnen.

Produksjonen foregår i dag fra seks brønner, men det skal bores enda 18 brønner, flere med horisontal "inngang". I tillegg til den store havdybden er det meget vanskelige forhold for plassering av utstyr og rør på havbunnen. Området ligger nederst i en undervanns fjellformasjon (Storegga).

Feltet ble funnet i 1997, og produksjonen startet i 2007. Investeringene vil totalt beløpe seg til 65 mrd. kr. Per 2010 var ca. halvparten av dette beløpet brukt.

Begrepet havrommet er ikke mye brukt på norsk. Når det likevel nyttes i denne boka, er det for å poengtere at aktiviteter til havs i dag ikke bare foregår på havoverflaten, men også nedover i havdypet og på og under havbunnen.

Havrommet og verdensrommet – langt til "verksteder". Aktiviteter i havrommet medfører på mange vis like store utfordringer som aktiviteter ute i verdensrommet. Både olje/gass-utvinning og romfart baseres på meget kompliserte, teknologiske systemer. Utvikling av slike systemer krever like stor kreativitet og kunnskaper hos mariningeniører som hos romfartsingeniører.

Kontinentalsokler. Økonomiske soner

Kantene av kontinentenes landmasser har i milliarder av år blitt erodert av bølger og strømmer i havene. Dessuten har store mengder av sedimenter i elvene blitt transportert ut i havene. Alt dette stoffet har blitt avsatt på havbunnen og resultert i profiler som det er vist eksempel på nederst i figuren på forrige side. Det vi kaller kontinental*soklene*, er de områdene som strekker seg utover fra kontinentenes landområder og som avsluttes der de såkalte kontinental*skråningene* begynner (se nedenfor). Soklenes bredde varierer mye, fra omtrent 1000 meter langs de nord- og søramerikanske stillehavskystene til omtrent 1000 km i de arktiske havområdene. Dybden er gjerne 0—400 meter, og øker langsomt utover.

Kystnasjonene selv har råderett over de ressurser som finnes innenfor en grense på 200 nautiske mil fra kystens "grunnlinjekant". I enkelte tilfelle utvides denne grensen til 350 nautiske mil. Disse grensene definerer det som kalles en kystnasjons økonomiske sone. Andre ganger må sonen begrenses til en bredde på mindre enn 200 nautiske mil for å unngå overlapping med andre kystnasjoners økonomiske soner.

Den norske kontinentalsokkelen er meget stor. Den dekker et område som er flere ganger så stort som Norges fastland og utgjør omtrent en tredel av den europeiske kontinentalsokkel. Les mer om den norske kontinentalsokkelen og Norges økonomiske sone på sidene 10-5 og 11-2.

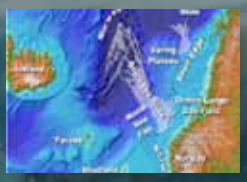
Kontinentalskråninger

Kontinentalsoklene avsluttes ved at havbunnens helning relativt brått blir tydelig brattere. De nye skråningsvinklene (ca. fire grader i snitt) varer normalt ned til nesten fire km dybde. Her flater skråningene ut, og vi har kommet ned til bunnen av dyphavene. Vi kaller områdene mellom kontinentalsoklene og dyphavsbunnene for kontinentalskråninger.

Dyphavene. Dyphavskløfter

Flate sletter med åser, fjell og kløfter. Dyphavsbunnene er normalt meget flate. De brytes imidlertid av åser med høyder opptil 1000 meter, se illustrasjon til høyre. Det finnes også fjell nede på bunnene. Disse er dannet av utdødde eler fremdeles aktive vulkaner. Fjellene ligger ligger ofte i sammenhengende belter som strekker seg gjennom de store havene. De mest spektakulære formasjonene er imidlertid dyphavskløftene, som kan fortsette ytterligere 4—7 km nedover (se figur foran).

Oljeutvinning i Arktis



Storegga

Flytende produksjonsskip

Rør fra Ormen Lange

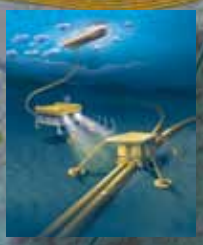
Inspeksjon med undervannsfarkost

1000 m

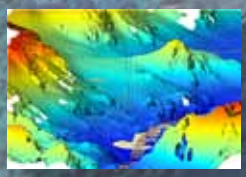
Vrak

Rørsystemer

Undervanns innstalasjon



Inspeksjon av installasjoner



Topografi havbunn

1800 m

Vrak

Horisontal boring på store havdyp

Gravitasjonsplattform

Generelt om havmiljøet

Mål

Etter å ha studert hovedkapittel 1 skal du:

- forstå hvorfor jordkloden helst burde vært kalt vannkloden
- ha blitt kjent med begrepet Corioliseffekt
- forstå hvordan jordas rotasjon genererer globale vindsirkulasjoner og hvorfor passater kommer østfra, mens vinder i Nordsjøen og Norskehavet gjerne kommer vestfra
- forstå hva som påvirker globale og lokale værsystemer
- ha blitt godt kjent med sentrale begreper innen bølgelæren og bruk av disse i beregninger
- ha fått god forståelse av hvordan bølger
  - beveger seg
  - dannes av vind
  - transporterer energi
  - interfererer med andre bølger og med strøm
  - oppfører seg når de nærmer seg land
  - dannes av krefter fra sol og måne

Hva mener vi med havmiljøet?

Med miljø mener vi generelt hvilke omgivelser eller forhold som hersker på et sted. Når havmiljøet skal beskrives, må vi dermed først og fremst se nærmere på følgende faktorer:

- vind og vær
- bølger
- strøm
- havvannets egenskaper
- forholdene langs kystene, for oss særlig langs Norskekysten
- is og andre forhold som karakteriserer polområdene. For oss er det da naturligvis nordområdene som interesser mest.

Begrepet miljø er i dag også aktuelt i andre betydninger enn de som framgår ovenfor. Vi tenker da på de *miljøpåvirkninger* som følger av de teknologiske aktivitetene som denne boka handler om. Slike miljøproblemer tas selvsagt også opp i boka. Dette gjøres imidlertid i tilknytning til de enkelte aktiviteter og ikke her i kapittel 1.

Utnyttelse av havet

Havområdene inneholder enorme ressurser. Hovedhensikten med denne boka er å beskrive hvordan teknologi kan brukes til å utnytte alle disse ressursene, og vise hvor viktig kunnskap om fysikk, kjemi og matematikk er i denne forbindelse.

De viktigste ressursene og utnyttelsene av havet kan grupperes slik:

- **Olje og gass** er gjennom millioner av år dannet av organisk materiale i havet. Dette har blitt begravd i avleiringer dypt nede i bunnen av havrommet og kan utvinnes herfra i form av olje og gass. Hvordan dette gjøres, behandles i kapittel 10.
- **Fisk** og havdyr har til alle tider blitt høstet av havet. Dagens fiskeri- og havbruksteknologi tas opp i kapittel 12. Også sjøplanter kan bli en viktig ressurs i framtida.
- **Mineraler** finnes i store mengder i havbunnen, men undersjøisk gruvedrift er foreløpig bare på forsøksstadiet. Det som eventuelt først kommer på tale, er utvinning av mangan (Mn) som finnes i form av små moduler liggende på bunnen av dyphavene. Disse inneholder også kobber, kobolt og nikkel (Cu, Co, Ni).
- **Fornybar energi.** Det er særlig mekanisk energi i form av vind som det er aktuelt å utnytte, men også energi fra bølger og tidevann kan på sikt bidra. Det er også mulig å utnytte både termisk energi og osmose, men dette er foreløpig "høyt opp og langt fram". Interesserte henvises til internett.
- **Transport** av mennesker og gods skjer mer kostnadseffektivt på havet enn på andre måter, se kapittel 9.
- **Infrastruktur i kystområder** er utenfor rammen for denne boka.
- **Fritidsaktivitete** er utenfor rammen for denne boka.

Isbryter

Redningsoperasjoner i nordområdene

Gasstanker

Undervannsdrone

Flytende vindturbiner

Bølgekraft

Oppdrettsanlegg

Miljøvennlige skip

Prosessanlegg på land

Flytende flyplass

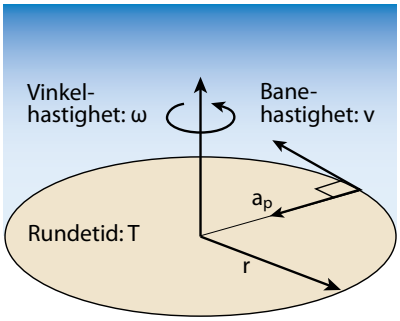
Landbasert bølgekraft

Kystkorvett

Vindsurfing

Vær og vind

Globale vindsystemer



Repetisjon fra vgs-fysikk: Sentrale begreper ved rotasjon med konstant hastighet i et horisontalplan

Vinkelhastighet ved rotasjon:

ω = *Hel runde / Rundetid*

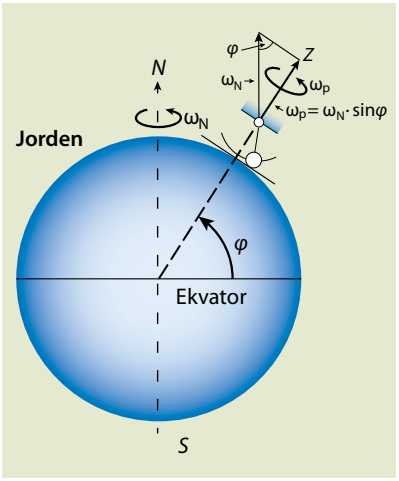
$\omega = 2 \cdot \pi / T$ *[rad/s]*

Banehastighet (periferihastighet):

$v = 2 \cdot \pi \cdot r / T = \omega \cdot r$

Sentripetalakselerasjon:

$a_p = v^2/r = \omega^2 \cdot r = \omega \cdot v$



Påvisning av lokale jordrotasjoner ved hjelp av Foucault-pendel. *Plasseres en pendel på ulike breddegrader φ, viser den at jordoverflaten under pendelen roterer med forskjellige vinkelhastigheter ω_p om en vertikal akse:*

$\omega_N = 2 \cdot \pi / (24 \cdot 3600s)$

$= 72{,}6 \cdot 10^{-6}$ *rad/s*

$\omega_p = \omega_N \cdot \sin \varphi$

Jordas rotasjon har stor innvirkning på vindsystemene. Selv opplever vi vær og vind på en lokal skala, men det finnes globale, sammenhengende vindsystemer. De lokale vær- og vindsystemene påvirkes av disse globale, storskala vind-systemene. For å kunne forstå den globale vindsirkulasjonen må vi ta i betraktning at jorden, inkludert atmosfæren, roterer, og at dette på mange måter påvirker jordas vinder og havstrømmer. Endringer i vindretningene på grunn av denne rotasjonen forårsakes av den såkalte Corioliseffekten. Vi vil nedenfor se at dette er en effekt som framkommer av det faktum at vi lever på en roterende planet og ser på naturen fra et roterende perspektiv. Temaet kan virke vanskelig. Siden Corioliseffekten er helt sentral for forklaring av vind- og strømretninger på jorda, bør vi likevel se nærmere på fenomenet

Corioliseffekten

Rotasjon om en vertikal akse på jordoverflaten.

Tenk deg at du ser på jorda fra et fast punkt i verdensrommet. Jorda roterer rundt sin egen akse én gang i løpet av 24 timer (egentlig 23,9 timer). Allerede i det 18. og 19. århundre viste de franske vitenskapsmennene Laplace og Foucault hvordan bevegelser som foregår i et roterende system kunne uttrykkes matematisk. I 1851 demonstrerte Foucault at jorda roterer rundt svingeplanet til en pendel som var hengt opp i kuppelen i Panthéon i Paris. Han viste at rotasjonen tok mer enn en dag og at perioden var

$T_p = 24h / \sin\varphi$

hvor φ var breddegraden. Han kalte T_p en pendeldag. På ekvator er det ingen lokal rotasjon, og T_p er uendelig. På polene er pendeldagen 24 timer. Det opptrer altså rotasjoner med forskjellige vinkel-hasigheter om vertikale akser på punkter som ligger på ulike breddegrader, se nederste figur til venstre. Dette er altså en følge av jordas rotasjon.

Dette fenomenet kan bare forklares ved at de gjentatte banebevegelsene til pendelmassen øyensynlig må foregå slik som prinsipielt vist på øverste figur til høyre. Hele tiden avbøyes bevegelsene mot høyre når vi ser i pendelmassens fartsretning. Vi kan ikke se de enkelte avbøyninger med det blotte øye fordi pendelen må gjøre et meget stort antall svingninger før pendelens svingeplan har rotert en hel omdreining. Avbøyningen i løpet av en fram- og tilbakegående svingning er derfor uhyre liten, men den må være der! Alle kan erfare dette ved å oppholde seg i Realfagsbygget ved NTNU lenge nok.

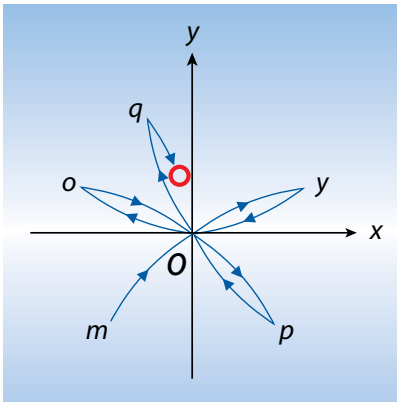
Foucaults pendel i Realfagsbygget ved NTNU i Trondheim. *Pendelen har en masse på 28 kg. Den er hengt opp i en 25 m lang snor og trenger ca. 27 timer for at pendelplanet skal ha rotert et helt omløp.*

Vi tror vanligvis at avbøyninger i banebevegelsen til et legeme kommer av at det virker krefter på tvers av fartsretningen, slik som når en bil gjør en sving. Men det er ikke tilfelle her. Avbøyningen kan ikke skyldes påvirkning av reelle krefter. Hvordan oppstår de i så fall? Avbøyningen skyldes i stedet det faktum at jorda roterer "under" pendelen på det stedet der den er hengt opp og holder seg svingende i et plan på grunn av tregheten i pendelmassen.

For enkelhets skyld er det likevel mange som tenker seg at det er krefter som sørger for avbøyningen i de enkelte pendelbevegelsene, men at disse er ekstraordinære massekrefter (som ikke har motkrefter). Disse kalles da Corioliskrefter. Siden slike krefter egentlig ikke eksisterer, kalles de også fiktive krefter, men vi velger i stedet å poengtere at rotasjonsavbøyningene skyldes en "Corioliseffekt" og ikke en Corioliskraft.

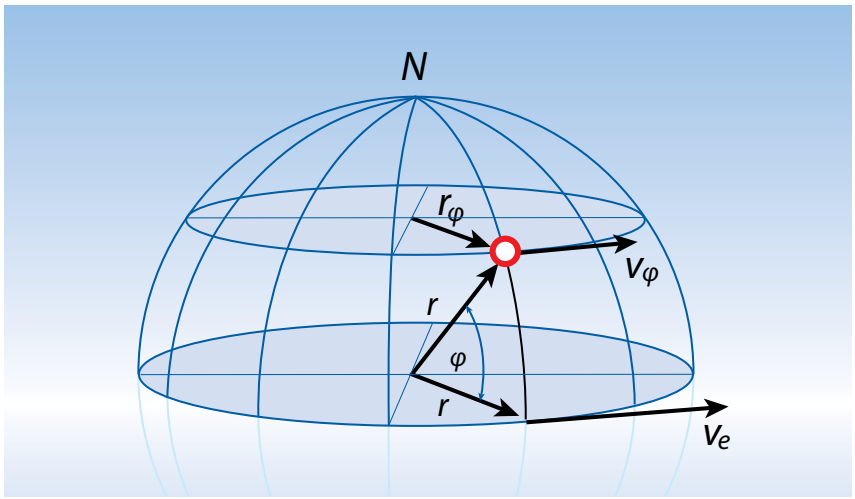
Det kan vises at den forklaringen som er gitt ovenfor, utgjør halvparten av den totale Corioliseffekten som påvirker alle legemer som er i bevegelse på vår roterende jordoverflate. Den andre halvparten skal vi se nærmere på i det følgende.

Andre bevis på fenomenet er avbøyninger av vinder og havstrømmer (se senere) og for eksempel det faktum at strømmende vann i elver på den nordlige halvkule har en tendens til å "grave" litt mer på høyre elvebredd enn på venstre. Enda et eksempel: Enveiskjørte jernbanestrekninger utsettes for større slitasje på høyre skinne enn venstre.



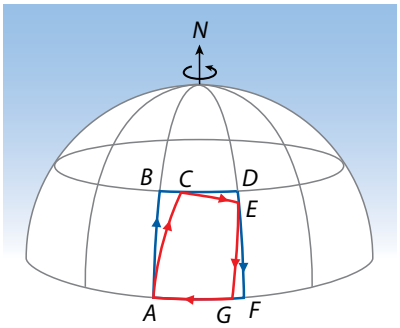
Rotasjonen av svingeplanet i en Foucault-pendel kan bare forklares ved gjentatte avbøyninger i banebevegelsene.
Alle svingninger avbøyes mot høyre når vi ser i fartsretningen. Dette gjelder både den fram- og tilbakegående delen i hver enkelt svingning. Det gjelder også for alle andre legemer som er i bevegelse på den nordlige halvkulen. På den sydlige halvkule skjer avbøyningene mot venstre.

Forflytning på en roterende jordoverflate.
Ovenfor har vi sett på den virkningen som jordoverflatens lokale rotasjon om en vertikal akse har på et objekt som beveger seg forbi.
Den andre halvparten av Corioliseffekten skyldes at stedet også har en viss periferihastighet mot øst. Denne er avhengig av stedets breddegrad, se figur nedenfor.



Periferihastigheter mot øst for punkter på jordoverflaten.
Jordas rotasjon medfører ikke bare at punkter på overflaten får lokale rotasjoner, men også at de beveger seg med en periferihastighet som er avhengig av punktets breddegrad:
$v_\varphi = v_e \cdot \cos\varphi$
Her er v_e = periferihastigheten ved ekvator

La oss se på et fly som flyr fra ekvator mot et mål som ligger rett mot nord, fra A mot B, se figur neste side. Ved takeoff får flyet også en hastighetskomponent mot øst. Denne er lik jordas periferihastighet ved ekvator. Hvis flyet flyr mot målet uten bruk av styringsorganene (som en rakett), opprettholdes denne hastigheten mot øst. Landet under begynner imidlertid å bevege seg saktere, og flyet vil komme for langt mot øst, punkt C i stedet for B, se figuren. Kursen utsettes altså for en avbøyning på samme måte som forklart tidligere for pendelen.



— ***Planlagt rundtur***
— ***Virkelig tur når Coriolis har "sagt sitt"***

Kursavbøyninger for et fly som ikke blir styrt underveis
Ved takeoff fra punktene A, C, E og G rettes flyet mot henholdsvis målene B, D, F og A (rett nord, rett øst, rett syd og rett vest). Flyet styres ikke underveis, og Coriolis-effekten gjør at flyet da i stedet må mellomlande i punktene C, E og G. Flygingen fra G til A skjer imidlertid uten avbøyninger.

Corioliseffekten

Et legeme som beveger seg på jordoverflaten, vil få en avbøyning på grunn av den såkalte Corioliseffekten. Dette skyldes jordas rotasjon. Uttrykt som akselerasjon, blir avbøyningen

$a_C = 2 \cdot \omega \cdot v \cdot \sin\varphi$

Her er ω den vinkelhastighet jorda roterer med [s^{-1}], v er legemets hastighet [m/s] og φ er stedets breddegrad. Avbøyningen skjer mot høyre sett i hastighetsretningen for legemer som beveger seg på den nordlige halvkulen og mot venstre for legemer på den sydlige halvkulen.

Skal flyet bevege seg i retning mot målet, må piloten kontinuerlig svinge flyet mot vest for å kompensere for denne effekten. Ikke bare må kursen justeres, men også hastigheten må forandres litt (i retning mot vest). Den nødvendige avbøyning setter seg altså sammen av to ledd: et ledd som tar utgangspunkt i retningsforandringen (som også forklart for Foucault-pendelen) og et ledd som ivaretar hastighetsforandringen. Det kan vises at disse to leddene er like store. Hvert av dem gir en Coriolisakselerasjon lik $a_p = \omega \cdot v \cdot \sin\varphi$. Den totale Corioliseffekten blir dermed som vist i boksen til venstre. Figuren gir en sammenstilling av kursavbøyninger som opptrer i en "rundtur" på den nordlige halvkule i et fly uten kursjusteringer underveis.

Globale vindsirkulasjoner

Ekvatorialt lavtrykksbelte. Vind oppstår når luft beveger seg fra områder med høyt trykk til områder med lavt trykk. Disse forskjellene i lufttrykk skyldes at jorda og atmosfæren varmes ujevnt opp av sola. Lufta varmes mest opp i tropene, og siden varm, fuktig luft er lett, stiger den opp og etterlater seg et lavtrykksbelte ved ekvator kalt det ekvatoriale lavtrykksbeltet eller stillebeltet.

Subtropisk høytrykksbelte. Når lufta stiger, mister den store mengder av sin fuktighet. Lufta kan ikke stige uendelig, og må derfor bevege seg nordover og sydover. Se figur på neste side. Lufta avkjøles på vei nordover (1), og omtrent ved den 30. breddegrad er luften blitt tung nok til å synke ned til overflaten. Den synkende luften danner et høytrykksbelte som vi kaller det subtropiske høytrykksbeltet.

Passater. Derfra strømmer luften både mot polene (2) og mot ekvator (3). Lufta som beveger seg mot ekvator, fullfører da sin syklus, og på veien mot ekvator danner den sterke vinder som vi kaller nordøstlige (4) og sørøstlige (5) passater. Disse sirkulasjonene danner de såkalte Hadleycellene.

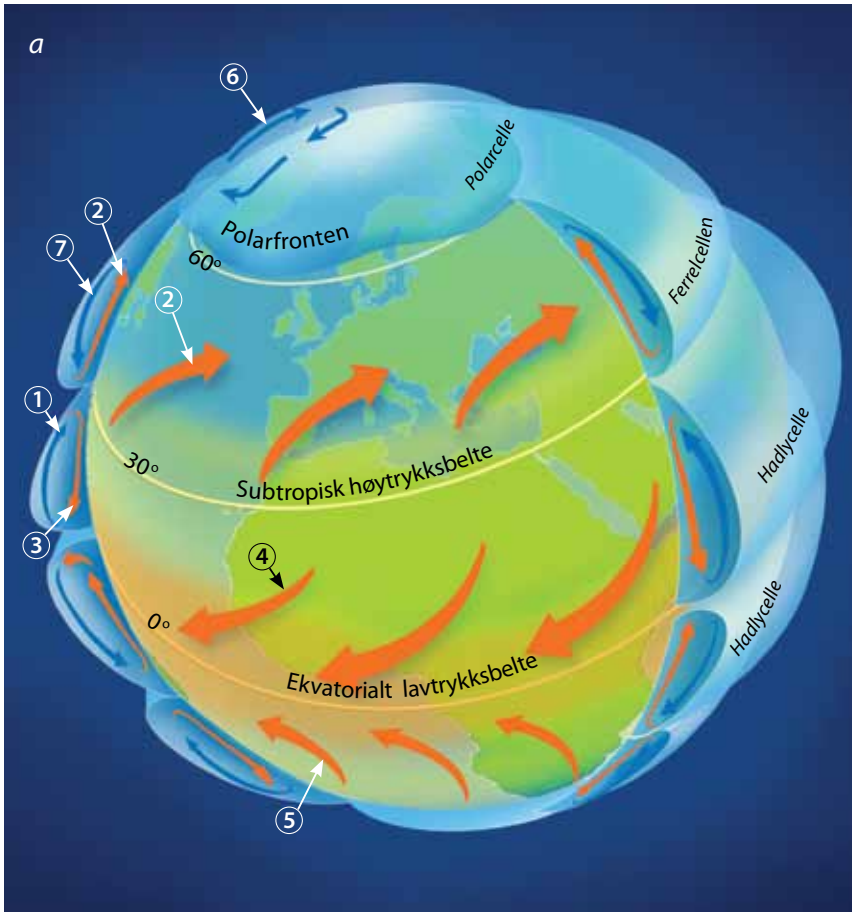
Polarfronten. Lufta som beveger seg mot polene (2) fra det subtropiske høytrykksbeltet, møter en kaldere vind som strømmer sydover fra polene omtrent ved den 60. breddegrad. Dette området kalles polarfronten. Her stiger lufta igjen før den strømmer delvis mot polen (6) og delvis sydover (7).

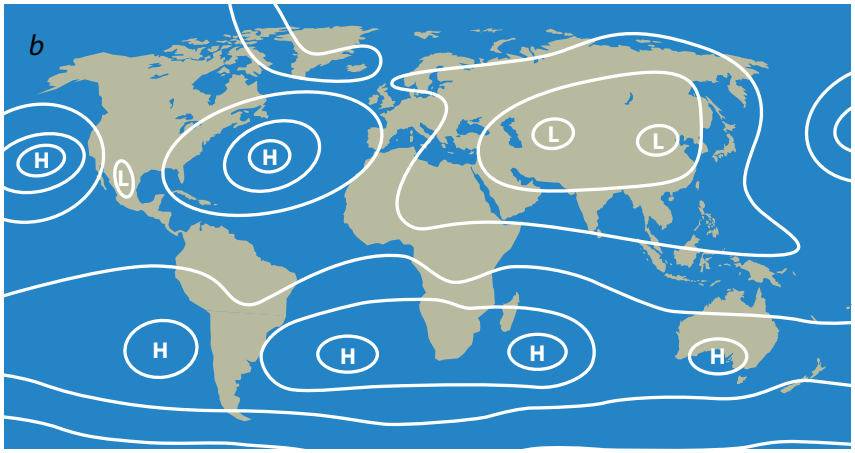
Lufta som strømmer sydover fra polarfronten, danner en ny sirkulasjonscelle som befinner seg mellom den 30. og 60. breddegrad. Lufta som strømmer mot polene fra polarfronten (6), synker ned til jordoverflaten nær polene og fullfører en tredje celle, den **polare sirkulasjonscellen.**

Vi har lært at Corioliseffekten bøyer av vinder mot høyre på den nordlige halvkule. Lufta som beveger seg nordover (2) fra det subtropiske høytrykksbeltet, bøyes mot øst på grunn av denne effekten. Vindene som kommer vestfra på grunn av dette, kalles vestavindsbeltet. Lufta som beveger seg fra Nordpolen til polarfronten, bøyes mot vest og danner det vi kaller polare østavinder.

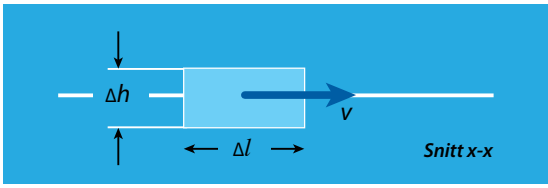
Undringsoppgave:

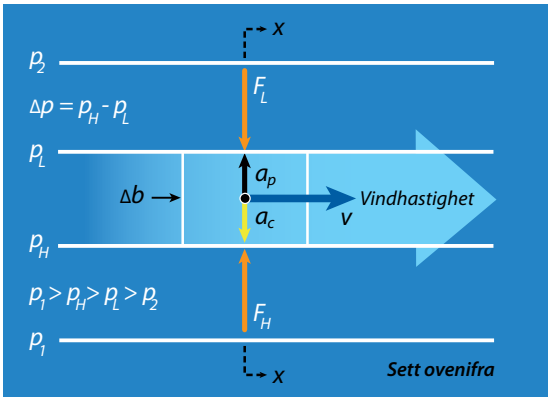
Hvordan kan avbøyningen i kursen CE på figuren øverst på denne siden forklares, mens kursen GA ikke har noen avbøyning?





a. Globale vindsirkulasjoner.
På hver av jordas halvkuler dannes det tre sykkelringformede celler, hver med en utstrekning på ca. 30 breddegrader.
b. Globale høy- og lavtrykks-systemer (i juli).
Dette er virkninger fra de vind-sirkulasjoner som er beskrevet i figur a. Særlig er det subtropiske høytrykksbeltet tydelig.





Krefter fra lufttrykk
Akselerasjon fra trykkgradient
Coriolisakselerasjon
Vindhastighet v

Hvordan blir vindretningen mellom isobarene? Geostrofisk vind.
Vi skulle kanskje tro at vinden ville blåse fra høyt til lavt trykk i en retning normalt på isobarene, men slik er det ikke. Corioliseffekten gjør at vinden vil kunne få mange forskjellige retninger, til og med parallelt med isobarene (trykknivåkurvene). Dette er forklart nærmere i figuren til høyre. Slik vind kaller vi geostrofisk vind. Det er da full balanse mellom Coriolisakselerasjonen a_c (se side 1-10) og akselerasjonen fra de trykkreftene som lufta utsettes for (geostrofisk balanse). Den vindhastigheten som gir slik balanse, bestemmes dermed av uttrykket

$$2 \cdot \omega \cdot v \cdot \sin\varphi = (\Delta p/\Delta b)/\rho$$

Dette gjelder først og fremst i høyder hvor virkningen fra friksjonen fra terreng eller havflater er liten. Denne virkningen kommer vi tilbake til på neste side. For enkelhets skyld er det heller ikke tatt hensyn til at isobarene ofte har en viss krumning.

Trykkrefter på volumet V:

$$\Delta F_p = F_H - F_L = \Delta p \cdot \Delta l \cdot \Delta h$$

Akselerasjon fra trykkreftene:

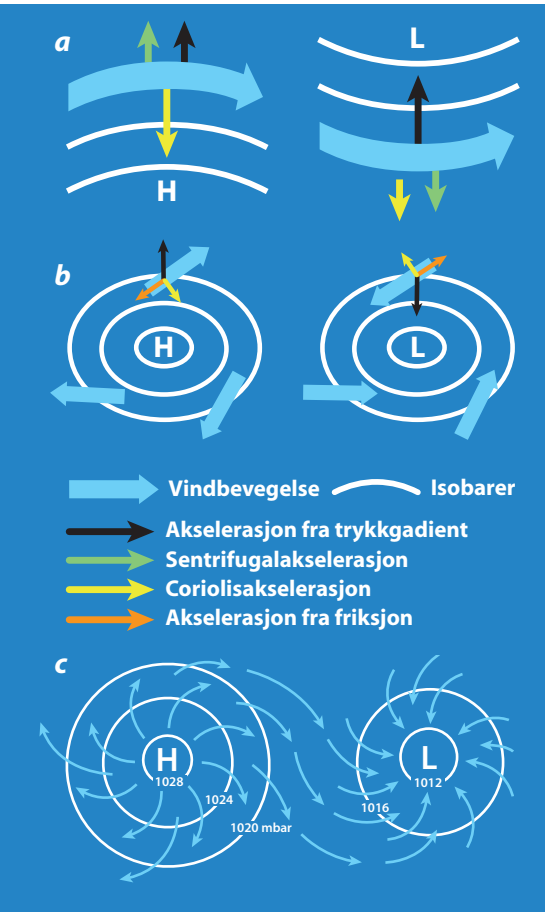
$$a_p = \Delta F_p / m =$$
$$= \Delta p \cdot \Delta l \cdot \Delta h / (\rho \cdot \Delta l \cdot \Delta h \cdot \Delta b)$$

$$a_p = (\Delta p / \Delta b) / \rho$$

Geostrofisk balanse og vindhastighet

Vær og vind

Værsystemer



a.Geostrofisk vind rundt høy- og lavtrykk på den nordlige halvkule b. Vindretninger rundt høytrykk og lavtrykk nær overflaten når det tas hensyn til friksjon. *Hastighetene er nå mindre og vindretningene er ikke parallelle med isobarene.*
c. Virkelige strømninger mellom høytrykk og lavtrykk blir gjerne spiralformet.

Enkle tips for en amatørmeteorolog: Hvorfor gir lavtrykk regn og høytrykk godvær, se figur c. *Lufta strømmer inn mot et lavtrykk. Den kan ikke "hope seg opp", presses oppover, nedkjøles og gir regn. Luft strømmer ut fra et høytrykk. Denne lufta er tørr og gir godt vær.*

Hva bestemmer været i Norge?

Mer om vindretninger i forhold til isobarene. Det er ikke alltid at vindretningene er parallelle med isobarene, som beskrevet på forrige side. Alle andre retninger kan også bli aktuelle. Disse bestemmes blant annet av trykkgradienten mellom isobarene. Ofte følger vinden krumme baner, og det må tas hensyn til sentrifugalkrefter, se øverste figur til venstre. Corioliseffekten spiller også en rolle. Denne gir riktignok alltid avbøyninger mot høyre på den nordlige halvkulen, men størrelsen bestemmes av vindhastigheten. Nede ved bakken/havoverflaten er også friksjon av betydning. Den kan redusere vindhastigheten til 2/3 av den geostrofiske hastigheten og en dreining av vindhastigheten på 15— 20° i forhold til isobarene. Figurene til høyre viser noen eksempler på hvordan forskjellige vindretninger oppstår.

Forholdene i polarfronten spiller stor rolle. Været i Norge påvirkes sterkt av lavtrykksområder som dannes nær polarfronten og høytrykksområdene mellom disse, se figur forrige side. Lavtrykkene kommer mot Norge fra vest og nord fordi polarfronten ofte bøyes mot nord i Barentshavet. Mellom lavtrykksområdene er det høytrykksområder. Store lavtrykks- eller høytrykksområder kan ha en stabiliserende effekt på været. Høytrykksområder over Norge betyr som regel varmt vær og svake vinder om sommeren, og kald, men klar, luft om vinteren. Lavtrykksområder gir oss som regel skyer, regn og snø.

Polare lavtrykk kompliserer værmeldingene. Fravær av store, stabiliserende lav- og høytrykksområder fører til hyppige forandringer i værforholdene. Særlig de såkalte polare lavtrykkene, som dannes over Nordsjøen, Norskehavet og Barentshavet, beveger seg fort og er spesielt uforutsigbare. Se på værmeldingene på NRK TV i en periode.

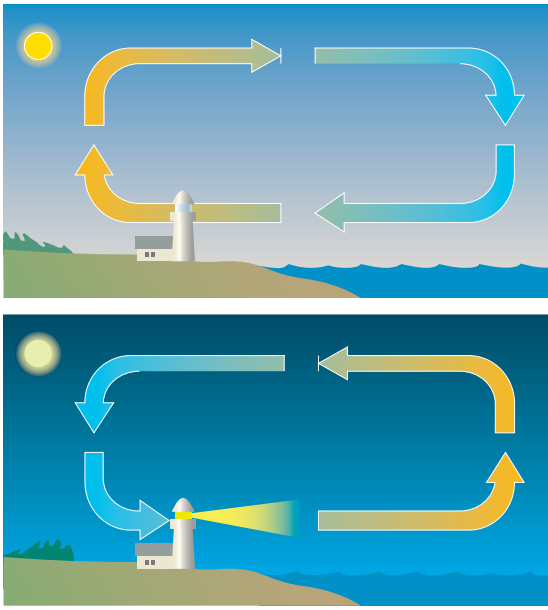
Høy- og lavtrykksområder leder alltid til spesielle luftstrømningsmønstre. På den nordlige halvkule bøyes luft som strømmer fra høy- til lavtrykk mot høyre av Corioliseffekten og beveger seg derfor i en spiralbane ut av høytrykksområdet, se figur til venstre.

Topografi spiller en rolle. På samme måte som høy- og lavtrykksområder påvirker den globale sirkulasjonen, kan lokale forhold og variasjoner over tid påvirke værsystemene. For eksempel sies det at det alltid regner i Bergen, mens det i det sørvestlige Norge er mye sol. Slike lokale variasjoner i værforhold kan ofte forklares ut fra det lokale landskapets topografi. Fjell kan for eksempel fungere som en barriere for vind, som fører til endringer i vindhastighet og retning. Dette kan resultere i "bølger" i luftstrømmene og ofte også gi regn og snøfall.

To eksempler på at topografien forandrer vindens hastighet, er "randeffekten" og "trakteffekten". Om vi går rundt et hus på en vindfull dag, legger vi merke til at vinden varierer fra sted til sted. Vinden blir ofte sterkere nær hjørnene (randen) fordi huset sperrer for vinden og en del av luften må strømme rundt hushjørnene. Her øker luftstrømmens hastighet. Denne effekten blir enda sterkere når to hus ved siden av hverandre leder vinden mellom seg (trakteffekt).

Fjell og åser har samme effekt på vinden, i en større skala. Trakteffekten kan for eksempel observeres der høye, bratte fjell omslutter en fjord og presser vind som kommer fra sjøen mellom seg, og fører til en vesentlig økning i den lokale vindhastigheten.

Pålandsvind og fralandsvind. I kystområder kan pålandsvind og fralandsvind forekomme fordi sjøen varmes saktere opp av sola om dagen, mens den mister varme saktere enn landområdene om natten, se figur. Årsaken til dette er vannets høyere varmekapasitet, se side 1-36. Når landmassen og luften over den gjennom dagen varmes av sola, vil luften bli lettere og stige oppover. Dette fører til et lavtrykk over land i forhold til over sjøen hvor temperaturøkningen er mindre og tregere. Trykkforskjellen fører til at luften strømmer fra sjøen mot land, og vi får pålandsvind om dagen. Når landmassen om natten avkjøles fortere enn sjøen, gir dette motsatt resultat, og vi får fralandsvind – luft strømmer fra land mot sjøen. Vi kaller dette solgangsbris, se figur til høyre.



Dannelse av pålandsvind og fralandsvind

Værmeldinger

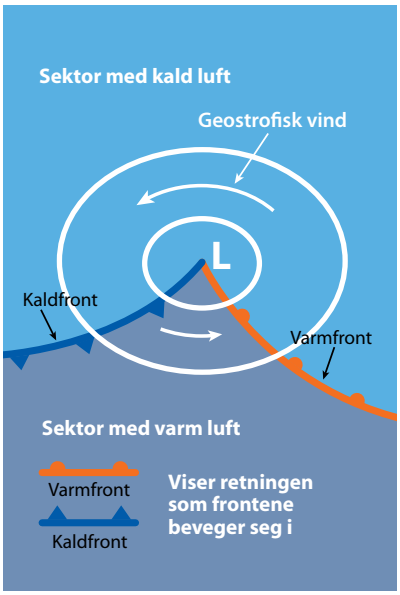
Værmeldinger. I hverdagen får vi informasjon om været gjennom værmeldinger. Informasjon om vind, trykk, skyer, regn eller snø formidles hovedsakelig via værtabeller og værkart, se figur neste side. Det brukes ofte piler for å angi vindretninger og -hastigheter. Antall haker på pilens hale blir brukt som kode for vindhastigheten, og pilene peker i samme retning som vindstrømmen. I meteorologien navngis vinden ut fra hvilken retning den kommer *fra*, en vestavind kommer altså fra vest. Dette er nyttig som en kortsiktig spådom om værforholdene som kan komme.

Værmeldinger baseres på mange observasjoner og beregninger, og vi kan finne relevant informasjon om mange flere faktorer enn temperatur, vind og nedbør. På nettsidene til Meteorologisk institutt (for eksempel www.met.no) kan vi ofte også finne informasjon om overflatestrømmer i vannet, bølger og satellittbilder.

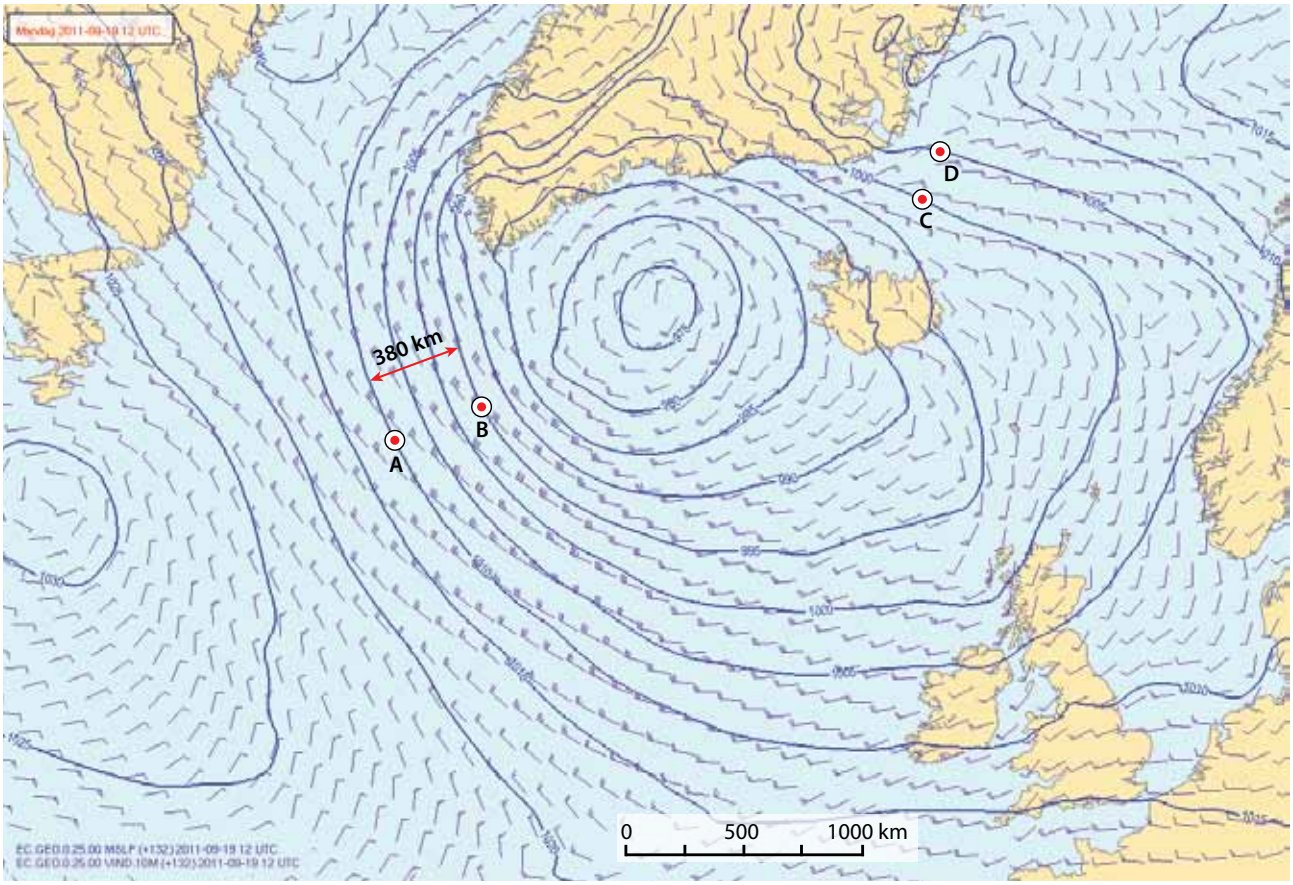
Beauforts skala for vindstyrke. Kunnskap om vindhastigheten er ikke alltid nok. Det er også veldig nyttig å vite hvilken effekt en gitt vindhastighet har på land og til sjøs. Vi kan observere omgivelsene våre ved forskjellige vindhastigheter og sammenligne resultatene for å gi oss et overblikk over vindens effekt. Nettopp en slik sammenligning kan finnes i det vi kaller en Beaufort-skala, som beskriver effekten forskjellige vindhastigheter gir oss på land og til sjøs.

Beaufort-skalaen kan brukes på to måter: Den kan fortelle oss hvilke forhold vi kan forvente ved en gitt vindhastighet, men vi kan også anslå vindhastigheten ved å observere hvilken effekt den har på omgivelsene rundt oss. Som vi ser av Beaufortskalaen, forårsaker vinden bølgeutvikling på sjøen. Sammenhengen mellom vind og bølger kan lett ses på innsjøer når en blikkstille sjø plutselig får små krusninger på overflaten idet vinden tar seg opp. Over store vannområder kan sterk vind over tid føre til en utvikling av store bølger, noe som er av stor betydning for skipsfarten, og for design og drift av marine konstruksjoner.

Vind kan ikke bare lage bølger, men forårsaker også overflatestrømmer. Faktisk henger de globale havstrømmene sammen med det globale vindsystemet. Vi kommer til å lære mer både om bølger og havstrømmer senere i dette kapitlet.



Kaldfront og varmfront
Kaldfront: *Vind med kald luft erstatter varm luft. Den kalde lufta er tyngst og blir liggende under den varme som løftes opp og danner skyer. Det oppstår kraftige vertikale bevegelser som gir regnbyger og kanskje tordenbyger, samt vindfullt vær.*
Varmfront: *Varmere luft skyver bort den kaldere lufta, men glir delvis oppå denne slik at de vertikale bevegelsene blir mindre enn i en kaldfront. Det vil regne mindre, ofte knyttet til tåke og yr.*



Prognosekart over Norge, Island, De britiske øyer og Grønland. *Kartet er utarbeidet av Meteorologisk institutt og gjaldt for 19.09.2011 kl. 12 UTC (Universal Time Coordinated). Vi ser at det er lavtrykk vest for Island og høytrykk ved Newfoundland. Isobarene er tegnet for hver 5 mbar. Vinden gjelder i 10 m høyde. Den angis med en pil som viser retning og med haker som angir hastigheten i knop. Hel strek er da 10 knop og halv strek 5 knop.*

Undringsoppgave:

Omtrent hvor stor er vindstyrken og bølgehøyden i det området som vi har sett på ovenfor?

Eksempel1.1. Beregning av hastighet på geostrofisk vind. Det vises til figur på side 1-11, hvor det er påvist at geostrofisk vind (v) opptrer når det er balanse mellom akselerasjoner fra trykkgradienten og Corioliseffekten. Vi skal bruke prognosekartet ovenfor til å beregne hastighet på geostrofisk vind sør for Grønland og har merket av en strekning A—B hvor vindretningene er tilnærmet parallelle med isobarene. Vi ser at avstanden mellom isobarene 995 og 1010 mbar er 380 km. Luft med slike trykk og 0°C har en tetthet tilnærmet lik 1,3 kg/m³. Dette gir en akselerasjon fra trykkgradienten lik

$$\frac{\Delta p/\Delta b}{\rho} = \frac{(1010 - 995) \cdot 100\ \text{N/m}^2}{380 \cdot 10^3\text{m} \cdot 1{,}3\ \text{kg/m}^3} = 0{,}0030\ \text{m/s}^2$$

For jorda er vinkelhastigheten $\omega = 72{,}6 \cdot 10^{-6}$ rad/s (se side 1-8). Ifølge uttrykket for akselerasjonsbalansene på side 1-11 blir dermed geostrofisk vindhastighet:

$$v = \frac{0{,}0030\ \text{m/s}^2}{2 \cdot 72{,}6\ \ 10^{-6}\text{s}^{-1} \cdot \sin 62^\circ} = 23\ \text{m/s} \ = 45\ \text{knop}$$

Dette er en høy hastighet. Det er imidlertid ikke tatt hensyn til friksjon, noe som jo gjør seg gjeldende nede ved overflaten. Her vil derfor hastighetene være betydelig mindre (redusert med opptil 1/3). Det er dermed rimelig overensstemmelse med de oppgitte vindhastighetene som kan avleses ved hjelp av hakene på vindpilene i det aktuelle området (se undringsoppgave til venstre). Det vil også være en dreining av vindhastigheten på 15—20° inn mot senteret av lavtrykket, det vi si i forhold til isobarene når vi ser i vindens retning.

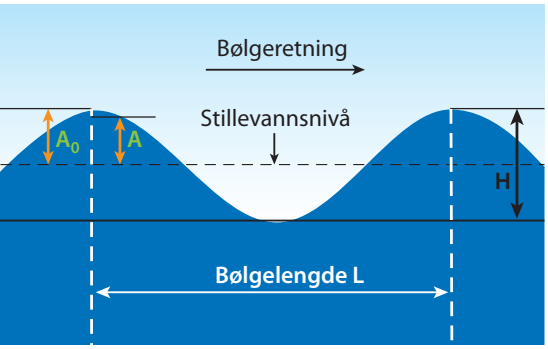
Beauforts skala for vindstyrke

Vindstyrke i Beaufort	Betegnelse	Virkning på land	Virkning til sjøs	Vindhastighet og bølgehøyde [1] m/s	m
0	Stille	Røyken stiger rett opp	Sjøen er speilblank	0 - 0,2	0
1	Flau vind	Vindretningen ses av røykens drift	Krusninger danner seg på havflaten	0,3 - 1,5	0
2	Svak vind	Følbar, rører på trærnes blader	Små, korte, men tydelige bølger med glatte kammer som ikke brekker	1,6 - 3,3	0,1
3	Lett bris	Løv rører seg, lette flagg strekkes	Småbølgene begynner å toppe seg. Det dannes skum som ser ut som glass	3,4 - 5,4	0,1-0,5
4	Laber bris	Løfter støv og løse papirer. Rører på kvister, strekker større flagg	Bølgene blir lengre, med en del skumskavler	5,5 - 7,9	0,5-1,25
5	Frisk bris	Småtrær med løv begynner å svaie	Middelstore bølger som har en mer utpreget langstrakt form og med mange skumskavler. Sjøsprøyt fra toppene kan forekomme	8,0 - 10,7	1,25-2,5
6	Liten kuling	Store grener og mindre stammer rører seg. Vanskelig å bruke paraply. Merker motstand når man går	Store bølger begynner å danne seg. Skumskavlene er større over alt. Gjerne noe sjøsprøyt	10,8 -1 3,8	2,5 - 4
7	Stiv kuling	Hele trær rører seg, vanskelig å gå mot vinden	Sjøen hoper seg opp, hvitt skum fra bølgetopper som brekker begynner å blåse i vindretningen	13,9 - 17,1	4 - 6
8	Sterk kuling	Brekker kvister av trærne, tungt å gå mot vinden	Middels høye bølger av større lengde. Bølgekammene er ved å bryes opp til sjørokk, som driver i tydelig markerte strimer med vinden	17,2 - 20,7	
9	Liten storm	Hele, store trær svaier og hiver, takstein kan blåse ned	Høye bølger. Tette skumstimer driver i vindretningen. Sjøen begynner å "rulle". Sjørokket kan minske synsvidden	20,8 - 24,4	
10	Full storm	Sjelden inne i landet. Trær rykkes opp med rot, stor skade på hus	Meget høye bølger med lange overhengende kammer. Skummet som dannes i store flak driver med vinden i tette hvite strimer så sjøen får et hvitaktig utseende. "Rullingen" blir tung. Synsvidden nedsettes.	24,5 - 28,4	6 - 9
11	Sterk storm	Meget sjelden, følges av store ødeleggelser	Ualminnelig høye bølger. Små og middelstore skip kan for en tid forsvinne i bølgedalene. Sjøen er fullstendig dekket av lange, hvite skumflak. Overalt blåser bølgekammene til frådelignende skum. Sjørokket nedsetter synsvidden	28,5 - 32,6	9 - 14
12	Orkan	Forekommer meget sjelden, uvanlig store ødeleggelser	Luften er fylt av skum og sjørokk som nedsetter synsvidden betydelig. Sjøen er fullstendig hvit av drivende skum	32,7 - 36,9	>14

1) Med bølgehøyde mener vi: Signifikant bølgehøyde = middelverdi av bølgehøyden for 1/3 av de høyeste bølgene. Største bølgehøyde av en enkeltbølge kan ventes å være dobbelt så stor som den signifikante bølgehøyden.

Bølger

Generelt om bølger



Repetisjon av sentrale begreper og ligninger i bølgelæren, fra fysikken i videregående skoler
Med bølger mener vi ***svingninger som brer seg*** *utover. Bølger kan ofte idealiseres som sinusbølger.*
Bølgelengde L: *Avstand mellom to nærmeste punkter som svinger i fase*
Bølgehøyde H: *Se figur*
Bølgeperiode T: *Tiden det tar for en bølgelengde å flytte seg i bølgeretningen forbi et tenkt, stillestående punkt*
Bølgefrekvens: $f = 1 / T$
Bølgefart: $v = L / T = f \cdot L$
Bølgeamplitude A: *Se figur*
Full bølgeamplitude: A_0 *(se figur)*
Bølgeheving:

$$A = A_0 \sin(\omega \cdot t)$$
$$= A_0 \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$
$$= \frac{H}{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

Hvordan beskriver vi bølger?

Form, fart og retning. Når vi observerer bølger i sjøen, legger vi merke til at alle ser forskjellige ut. Hver bølge har en unik form, fart og retning, og de påvirkes av hverandre. Sentrale begreper for å beskrive bølger forutsettes kjent allerede fra fysikkfaget i videregående skoler, se repetisjon til venstre.

Bølger transporterer energi

Historisk perspektiv. De fleste havbølger lages av vinden, men enhver annen forstyrrelse i vannet lager også bølger. Om du kaster en stein i en dam, vil det dannes bølger som sprer seg radielt utover. På en større skala kan jordras ved kysten eller et isfjell som raser sammen, skape samme effekt. Disse bølgene er på engelsk kjent som "splash waves" og kan bli enorme. Et jordskjelv i 1958 utløste et jordskred hvor 90 millioner tonn stein fra opptil 900 meter over havnivå raste ned i Lituya Bay i Alaska og ga den høyeste "splash wave" mennesker har opplevd. Jordskredet forårsaket en bølge som skadet trær 530 meter over havnivå! Katastrofene i Loen i 1905 og 1936 er kjente norske eksempler.

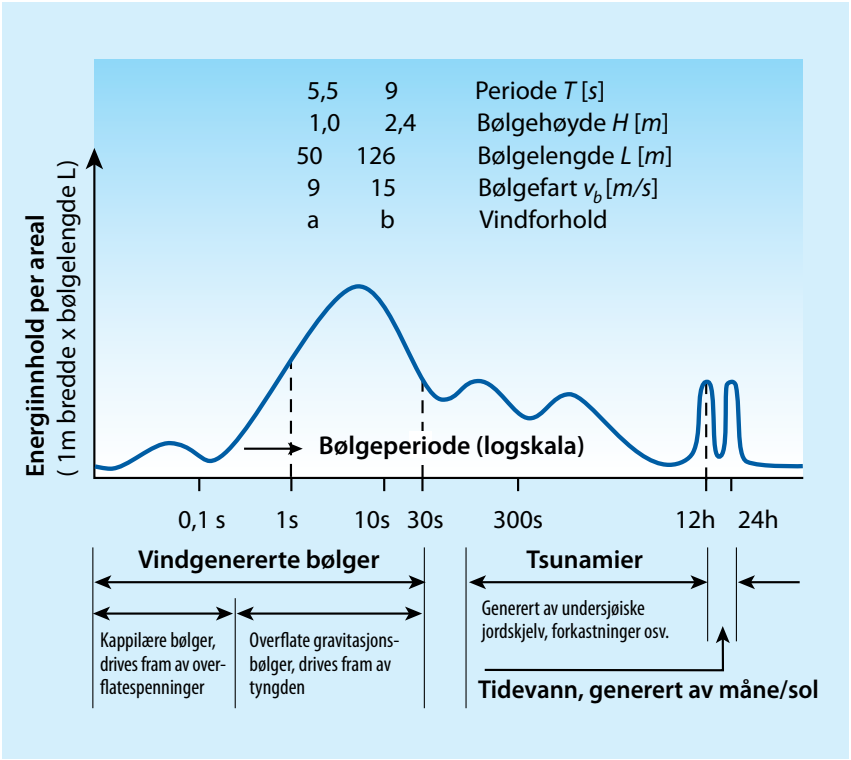
I tillegg kan undervannsskred, vulkanutbrudd, jordskjelv og forkastninger frigjøre store mengder energi i havet og lage enorme bølger kalt seismiske sjøbølger eller tsunamibølger. På side 1-5 har vi vist den undersjøiske fjellformasjonen Storegga i Norskehavet. Denne ble dannet for ca. 8200 år siden og forårsaket da opptil 15 m høye tsunamibølger langs den norske kysten. Kjente eksempler fra vår tid er tsunamiene i Bengalbukta i 2004 og utenfor Japan i 2011.

Kapillære bølger. De bølgene som er nevnt ovenfor, kjennetegnes ved at det er tyngdekrefter som beskriver både formen og forplantningen. Men bølger kan også dannes på den overflatehinna som alltid er tilstede på vann. De oppstår når spenningen i hinna forstyrres og kalles kapillære bølger. Slike bølger kjennetegnes ved at bølgelengden er meget liten. Dessuten øker bølgefarten når bølgelengde avtar. Det er motsatt av hva tilfellet er for gravitasjonsbølger (tyngdebølger).

Også tidevann er en bølge. Går vi over til å se på bølger med store dimensjoner i *horisontalplanet*, kan det nevnes at gravitasjonskraften fra månen og sola også danner bølger. Det er dette vi kaller tidevann, som har de største bølgelengdene som forekommer på jorda.

Menneskelig aktivitet kan også lage bølger, for eksempel er bølger fra skip meget aktuelt for denne boka. Generelt vil all frigjøring av energi kunne lage bølger som selv lagrer og transporterer energien videre.

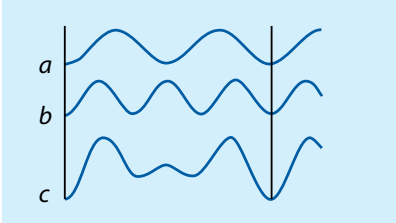
Hvor mye energi inneholder bølger? Forskjellige typer bølger inneholder forskjellige mengder energi, og energien har sammenheng med bølgeperioden og bølgehøyden. Dette framgår av figuren øverst på neste side. Du kan lese mer om energi i bølger på side 1-22/23/24.



Oversikt over energinivå per arealenhet i ulike typer bølger. Eksempler på data for bølger i Nordatlanteren under rolige (a) og gjennomsnittlige (b) vindforhold.
Figuren viser hvordan energiinnholdet varierer med bølgeperioden. Som vi ser, gjelder energiinnholdet per arealenhet (f.eks. per meter bredde x bølgelengden i meter), og det totale energiinnhold i en bølge finnes ved å multiplisere med dette arealet. Tsunamier kan ha bølgelengder på mer enn 200 km.

Matematisk beskrivelse av bølger

Sum av sinusbølger kan beskrive kompliserte bølgeprofiler.
For å forstå bølger må vi finne en tilnærming som beskriver virkeligheten på en god måte og samtidig gjør det mulig å uttrykke den matematisk. Bølger i vann kan beskrives på samme måte som bølger i andre medier, og det finnes metoder i fysikken som lar oss forenkle komplekse bølger. Generelt kan en hvilken som helst bølge beskrives ved å legge sammen en serie enkle, sinusformede bølger. Figuren til høyre viser hvordan to kombinerte sinusbølger kan beskrive den nederste, komplekse bølgen. Jo mer kompleks bølgen er, jo flere sinusbølger trengs for å beskrive den.



Uregelmessige bølgeprofiler kan beskrives ved summering av sinusbølger (c=a+b). *Et annet eksempel er vist på side 1-25*

Idealiserte bølger finnes ikke i virkeligheten, men hjelper oss å forstå bølgekarakteristikker og kan forklare mange bølgefenomener. Først og fremst er det sinusformen som passer godt til å idealisere bølger, og da særlig havbølger. Men den passer selvsagt ikke til brytende bølger.

Surfebølger ligner Ikke mye på sinusbølger. *Du kan lese mer om brytende bølger på side 1-27.*

Hvordan bølger forflytter seg er nærmere forklart på neste side. Ofte er bølgefrekvensen (f) en spesielt interessant størrelse siden den forteller oss hvor mange bølger som passerer et fast punkt per tidsenhet. Bølgefrekvensen er invers av bølgeperioden T:

$$f = 1/T \quad [s^{-1} = Hz].$$

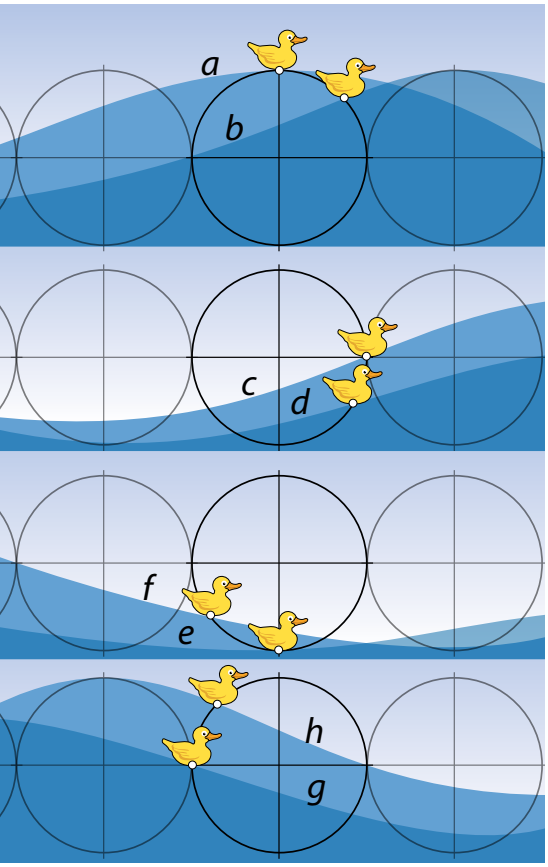
Perioden (T) brukes kanskje enda oftere enn frekvensen (f) når en bølge skal karakteriseres på en mest mulig kortfattet måte. Perioden forteller altså hvor lang tid det går mellom to bølger.

Undringsoppgave:

Hva er de viktigste krav en surfer stiller til en god surfebølge?

Bølger

Bevegelse av bølger



Bevegelser av et legeme som passeres av en bølge, med bølgeprofil

a og b ved tidspunkt T = 0 og 1/8 · T
c og d ved tidsp. 2/8 · T og 3/8 · T
e og f ved tidsp. 4/8 · T og 5/8 · T
g og h ved tidsp. 6/8 · T og 7/8 · T

I en bølge på dypt vann beveger vannpartiklene seg i sirkler med avtagende radier.
Det at radiene avtar med dybden, har mange praktiske nytteverdier. F.eks. reduserer det bevegelsen til flytende oljeplattformer. Siden det meste av en plattforms oppdriftsvolum befinner seg under bølgebasis, påvirkes den lite av bølger. Ubåter kan unngå store havbølger ved å dykke under bølgeområdet, og det finnes havbruksmerder som kan senkes ned slik at de kan unngå de største bølgebevegelsene i storm.

Om vi ser på sjøen, kan vi se bølger bevege seg bortover. Om vi kaster en stein i stille vann, vil bølgene bevege seg bort fra punktet hvor steinen traff vannet, men veldig lite vann vil forskyves samme retning som bølgene. Heller enn å forflytte masse horisontalt, transporterer bølgene energi.

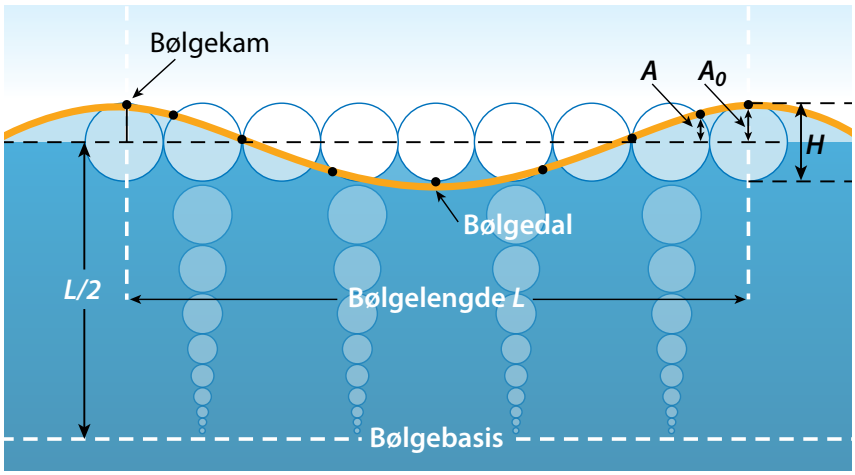
Energi kan forflyttes uten å forfytte masse. Hvordan energi forflyttes i bølger uten å flytte masse, kan visualiseres med et tau. Om vi binder et tau fast i et dørhåndtak, kan vi danne en bølge ved å bevege den andre enden hurtig opp og ned. Alle delene av tauet vil da bevege på seg, men tauet som helhet beveger seg ikke bortover i bølgens retning.

Banebevegelser for vannpartikler i bølger

Vannpartikler under en bølge beveger seg i lukkede baner (sirkulære på dypt vann, ellipseformede på grunt vann). For å forstå slike banebevegelser kan vi legge et flytende legeme, for eksempel en liten badeand, i et vannbasseng. Hvis vi så lager bølger i bassenget, kan vi se at anda ikke bare beveger seg opp og ned med bølgene, men også litt fram og tilbake. Den beveger seg tilnærmet i en sirkel.

Egenlig får anda også litt drift i bølgeretningen. I virkeligheten er bølger aldri fullt ut sinusformede. Bøgehevingen til toppen er alltid litt større enn senkingen til bunnen Dermed vil den positive farten i "sirkelens" toppunkt i tallverdi være litt større enn den negative farten i bunnpunktet. Sluttresultatet blir en liten drift i bølgeretningen.

Siden den alltid holder seg på vannoverflaten, har den sirkulære banen som anda beveger seg i, like stor diameter som bølgehøyden. Når vannet på overflaten beveger seg litt, må vannet rett nedenfor også flytte på seg, men jo dypere en vannpartikkel ligger, dess mindre blir den påvirket av bølgebevegelsen ved overflaten. Derfor minker diameteren til sirkelbanen med dybden, som vist i figur nederst. Ved en viss dybde under overflaten blir vannbevegelsene så små at de kan neglisjeres. Denne dybden er ofte omtrent halvparten av bølgelengden og kalles bølgebasis. Vann over denne dybden befinner seg i det vi kaller bølgeområdet og er da i bevegelse.



Bølger på dypt vann

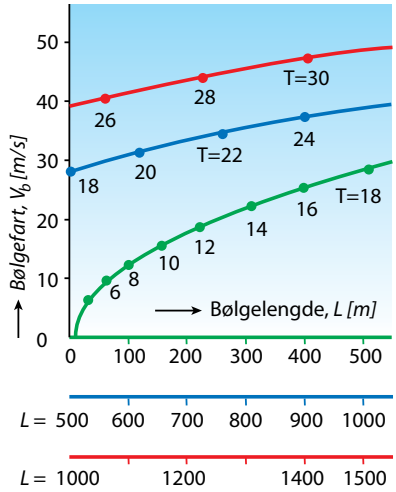
Til nå har vi sett på dypvannsbølger som ikke vil påvirkes av sjøbunnen. Vi snakker om dypvannsbølger når vanndybden er større enn bølgebasis (en halv bølgelengde). Vindgenererte havbølger er som regel dypvannsbølger. Per definisjon er bølgers hastighet $v_b = L / T$, hvor L=bølgelengde og T=bølgeperiode. For dypvannsbølger kan det vises at det er følgende sammenheng mellom T og L:

$$L = g \cdot T^2/(2 \cdot \pi)$$

Dermed kan bølgehastigheten uttrykkes på tre måter:

$$v_b = L/T$$
$$v_b = \sqrt{g \cdot L/(2 \cdot \pi)}$$
$$v_b = g \cdot T/(2 \cdot \pi)$$

Forholdet mellom bølgelengden L, bølgeperioden T og bølgehastigheten er vist i figur til høyre. Vi ser, for eksempel av den midterste ligningen, at **dypvannsbølger generelt beveger seg hurtigere jo større bølgelengden er**, slik som figuren selvsagt også viser.



Sammenheng mellom bølgelengde L, bølgeperiode T og bølgehastighet v_b for bølger på dypt vann. *Periode er påført direkte på grafene.*

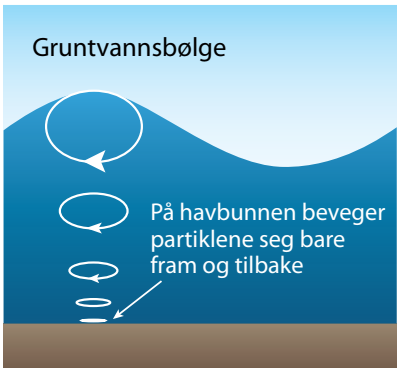
Gruppehastighet. Ofte kommer bølger til havs i grupper på 5—8. Som i beatsmusikk med to frekvenser lagt oppå hverandre, framkommer et lignende fenomen når to havbølger med nesten samme bølgelengde og bølgeperiode tilfeldigvis blir overlagret hverandre. Både de individuelle bølgene og bølgegruppen beveger seg, men med forskjellig hastighet. På en tilsynelatende gåtefull måte kan enkeltbølger da ankomme og forlate gruppen. Du kan lese litt mer om dette fenomenet på side 1-23. På dypt vann er gruppehastighet lik halvparten av bølgehastigheten.

Bølger på grunt vann

I kystregionene er vannet ofte grunt nok til at sjøbunnen påvirker vannets banebevegelse under bølgene. Bølger i vann der vanndybden er mindre enn 1/20 av bølgelengden, kalles gruntvannsbølger. På grunn av samspillet mellom sjøbunnen og vannets banebevegelse avhenger hastigheten til gruntvannsbølgene bare av g og vanndybden d, som vist nedenfor.

$$v_b = \sqrt{(g \cdot d)} \ \text{[m/s]}$$

Banebevegelsene til vannpartiklene er vist i figur til høyre. Som vi ser, karakteriseres gruntvannbølger av ellipseformede baner i stedet for sirkulære. Her er gruppehastigheten lik bølgehastigheten.



Bølger på grunt vann. *Vannpartiklene beveger seg i ellipseformede baner. Med økende dybde blir ellipsene etter hvert mindre og flatere*

Overgangsbølger

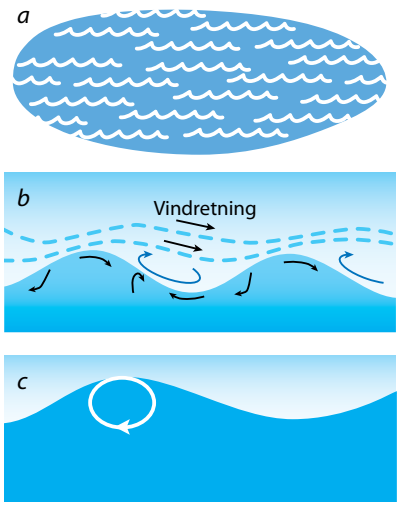
Bølger som beveger seg over vanndybder mellom ½ til 1/20 av bølgelengen, kalles overgangsbølger. De har egenskaper fra både gruntvanns- og dypvannsbølger. Bølgehastigheten til overgangsbølgene avhenger delvis av bølgelengden og delvis av vanndybden. Gruppehastigheten ligger mellom bølgehastigheten og halv bølgehastighet.

Undringsoppgave:

På venstre side er det vist hvordan ei badeand teoretisk beveger seg i en tilnærmet sirkulær bane når en bølge passerer. Men den har også en viss liten drift framover fordi vannpartiklene i bølgetoppen har en litt større foroverfart enn bakoverfarten til partiklene i bølgebunnen. Årsaken til dette ble forklart ut fra forskjell i høyde og dybde i bølgen. Hvorfor kan det bli slik forskjell?

Bølger

Dannelse av bølger



Tidlige stadier i bølgedannelse
a. Krusninger. *Bølgedannelsen starter med at vind påvirker vannoverflaten. Friksjonskrefter vil lage krusninger. Disse bølgene får energi fra vinden, mens overflatespenninger er styrende for geometri og oppførsel.*
b. Vinden får bedre tak. *Krusningene medfører strømninger i vannet og virvler med over- og undertrykk i luftlaget over den "påbegynte" bølgen.*
c. En ny, liten bølge er klar for videre vekst. *Energioverføring fra vinden fortsetter, og bølgestørrelsen vokser. Når bølgelengden er blitt noen cm, har profilen fått sin karakteristiske form som nå blir styrt av tyngden.*

Bølgevekst begrenses av bryting. Brytende bølge av type "spilling breaker". Fra [1.9].
Denne typen karakteriseres av at skumskavler dannes oppe ved bølgekammen. Skummet renner nedover fronten av bølgen, ikke ulikt et snøskred. Dettte er den vanligste typen brytende bølge som dannes på dypt vann, men den forekommer også på strender. Skumskavler har på engelsk det beskrivende navnet "whitecap". Andre typer, se side 1-27.

De fleste bølger dannes av vind, men vi skal senere også se på bølger som oppstår av jordskjelv (tsunamier). Se for øvrig også side 1-16.

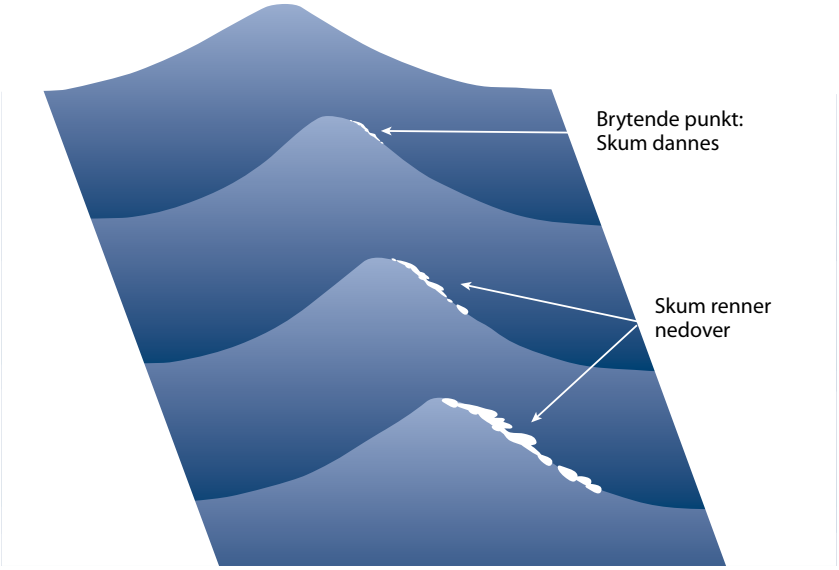
Vind som kilde til bølger

Se for deg et stille, bølgefritt havområde hvor det begynner å blåse. På grunn av friksjon mellom vinden og havoverflaten dannes det først krusninger, se figur a til venstre. Disse små bølgene gir en ruere overflate, vinden får bedre tak og begynner å danne bølgelignende profiler som vist i figur b. Her ser vi strømningene i lufta og vannet i denne tidlige fasen, med både overtrykk og undertrykk over bølgen. Vindens påvirkning øker, og det blir overført mer energi fra vinden til bølgene. Etter hvert dannes det symmetriske bølger som vist i figur c, med bølgelengder på noen centimeter.

Overføring av energi. Etter hvert som bølgene tar opp mer energi fra vinden, vil bølgehøyden, bølgelengden og bølgefarten øke. Bølgeformen forandrer seg også ved at bølgene blir steilere. Når bølgehastigheten kommer opp i vindhastigheten, blir det ikke lenger noen energioverføring fra vinden til bølgene, og bølgen har nådd sin maksimale hastighet og størrelse ved den gitte vindstyrken.

Brytende bølger. Hvis en bølges helning (H/L) oppnår den kritiske verdien 1/7 før den oppnår samme hastighet som vinden, vil imidlertid bølgen bryte. se figurer side 1-27. Når bølgene tar opp energi fra vinden, resulterer det i bølgevekst, mens bølgebryting reduserer energiinnholdet i bølgene og resulterer i mindre bølgehøyder. Se figur nedenfor.

Dønninger. Bølger som dannes i et havområde, beveger seg ofte ut av området i lange bølger med lave bølgetopper. Slike bølger kalles dønninger. Dønninger kan bevege seg fort over lange avstander uten å miste særlig mye av sin energi. Disse bølgene opptrer ofte i grupper, som nevnt på side 1-19.

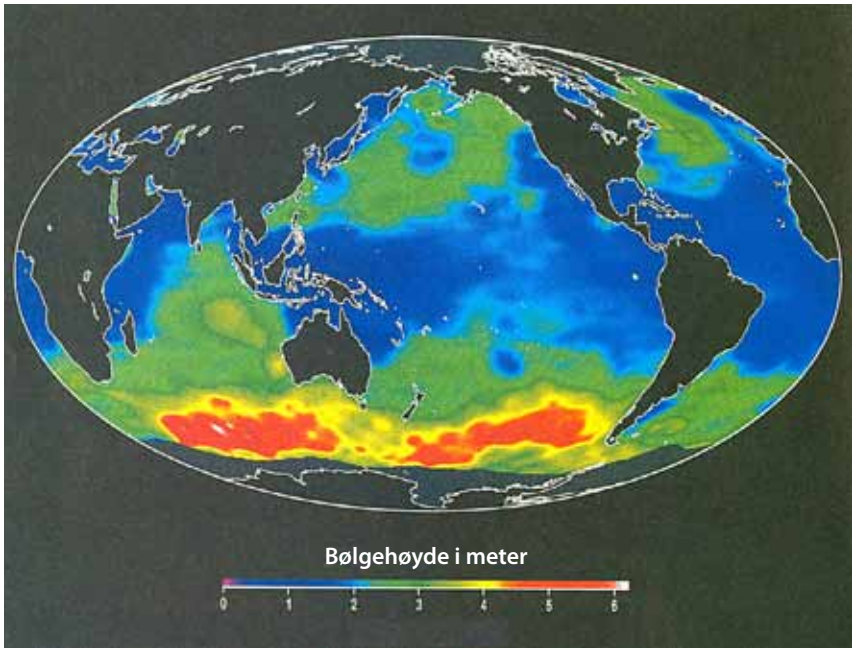


Hva bestemmer bølgenes størrelse?

Bølgers størrelse og energiinnhold bestemmes hovedsakelig av hvor stor vindhastigheten er og hvor lenge vinden blåser i én retning. Derfor er det ut fra værdata mulig å beregne energien i bølger innenfor et visst område.

I virkeligheten endrer vindens retning og hastighet seg i tid og rom, og derfor kan vi ofte se bølger av forskjellig størrelse, form og hastighet i samme område.

Meget høye bølger på den sydlige halvkulen. Først i kapitlet lærte vi om globale og lokale vinder. Ettersom de aller fleste havbølger er dannet av vinden, gjenspeiles de globale vindene i den globale bølgedistribusjonen. Figuren nedenfor viser et kart over bølgehøyder basert på satellittdata fra en typisk dato.



Fordeling av bølgehøyder på den sydlige halvkule for en dato med typisk vær.
Bølgehøyder på mer enn 5 m opptrer hyppig i områdene mellom Australia og Antarktis. Du kan lese mer om store bølger på side 1-26.

Bølgene er spesielt høye på den sydlige halvkule fordi det her er mindre landmasse og dermed lengre havstrekninger hvor bølgene kan hente opp energi fra vinden. I tillegg er vestavindsbeltet mellom 40° og 60° syd like aktivt som vestavindsbeltet på den nordlige halvkule. Sluttresultatet blir derfor at vi her finner de høyeste gjennomsnittlige vindhastighetene og dermed også de største bølgehøydene på jorda.

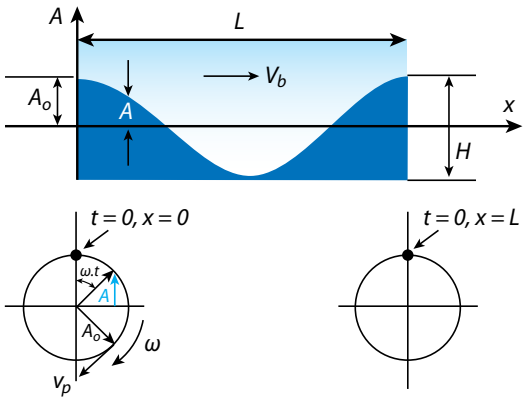
Bølger på den nordlige halvkulen. Vestavindsbeltet på den nordlige halvkule gir også relativt høye bølger. På grunn av olje- og gassutvinningen er forholdene i Nordsjøen og Norskehavet spesielt interessante. Kartet ovenfor gir ingen informasjoner om disse områdene, men vi kan vise til et lignende kart på side 13-9. Her framgår det at 40—60 kW per m bølgebredde er årsgjennomsnittet for bølgenes effekttransport i havområdene utenfor Norge. Ved hjelp av ligningen på side 1-21 kan vi da beregne tilhørende bølgehøyde til 3—3,5 m, se oppgave 1.5. Under de stormer som hyppig opptrer i disse farvannene, særlig om vinteren, kan bølgehøydene imidlertid fort bli 4—5 ganger så store.

Undringsoppgave:

Hvordan lages bølger i et "badeland"

Bølger

Energitransport i bølger



Beskrivelse av en sinusbølge ved hjelp av ligning. Fra [1.4]

En sinusbølge kan beskrives på flere måter, men ligningen nedenfor er den mest brukte:

$$A = A_0 \cdot \cos(x \cdot k - \omega \cdot t)$$

Her er:

A = amplitude på stedet x ved tidspunktet t

A_0 = full amplitude = H / 2

x = stedsangivelse fra startposisjonen x = 0

k = bølgetall = $2 \cdot \pi / L$ [$m^{(-1)}$]

ω = sirkelfrekvens=$2 \cdot \pi / T$ [rad/s]

T = bølgeperiode = [s]

v_b = bølgehastighet [m/s]

Tre ligninger for v_b:

$v_b = L / T$

$v_b = \omega / k$

$v_b = \sqrt{g \cdot L / (2 \cdot \pi)}$ *(dypt vann)*

v_p = vannpartiklenes banehastighet = $\omega \cdot r = \omega \cdot A_0$

Vi har allerede flere ganger presisert at bølger transporterer energi og ikke noe annet når de forplanter seg. Dette skal vi studere nærmere nedenfor.

Aller først skal vi imidlertid se nærmere på hvordan bølger kan beskrives når de beveger seg. Dette kan gjøres på flere måter, men det vanligste er å bruke et ligningssystem som vist til venstre og som forklares videre i eksemplet på side 1-24.

Energiinnhold i bølger

Energien i en bølge omfatter:

- Potensiell energi, som kommer av at halvparten av bølgen er hevet over stillevannsnivået, mens den andre halvparten er trykket ned i forhold til stillevannsnivået
- Kinetisk energi, som kommer av at vannpartiklene under bølgen beveger seg i sirkelbaner på dypt vann

Potensiell energi i bølger. Vi vet fra fysikken at potensiell energi til et legeme generelt kan skrives

$$E_p = m \cdot g \cdot h = \rho \cdot V \cdot g \cdot h$$

Her er V = legemets volum og h=høyden som legemets tyngdepunkt har over et valgt nullnivå for den potensielle energien. Vi kan nå bruke denne ligningen til å lage et uttrykk for den potensielle energien til et element med volum $dV = A \cdot B \cdot dx$. Her er A = amplitude, B = bølgens bredde og dx er tykkelsen på volumelementet. Den samlede potensielle energien i bølgen finner vi så ved å multiplisere med ρ, g og tyngdepunkthøyden A/2 og så summere alle elementene. Dette kan gjøres tilnærmet manuelt, men kan også bestemmes ved integralregning. Interesserte elever kan gjennom oppgave 1.15 vise at den potensielle energien i en bølge dermed blir:

$$E_p = \rho \cdot g \cdot B \cdot A_0^2 \cdot L/4$$

Den potensielle energien per m^2 av bølgen finnes ved å dividere med $B \cdot L$, og vi får

$$E_p/(B \cdot L) = \rho \cdot g \cdot A_0^2/4 \quad [J/m^2]$$

Kinetisk energi i bølger. Også her kunne vi startet med en av de vanligste ligningene i fysikken, nemlig uttrykket for den kinetiske energien til et legeme med massen m, volumet V og farten v:

$$E_k = \tfrac{1}{2}\, m \cdot v^2 = \tfrac{1}{2}\, \rho \cdot g \cdot V \cdot v^2$$

Vi har tidligere forklart at vannpartiklene under en bølge på dypt vann beveger seg i sirkulære baner med minkende radier nedover i vanndypet. Vi kunne derfor bruke ligningen ovenfor til å finne

den kinetiske energien i hver av disse sylindrene og så summere dem. Dette vil imidlertid kreve en del matematikk, og vi skal i stedet peke på et fenomen som vi ofte ser i fysikken for legemer som både har potensiell og kinetisk energi. Legemene "ordner" seg da ofte slik at den samlede energi fordeler seg med halvparten på hver av disse energiformene. Vi har i fysikkfaget vist at dette for eksempel er tilfelle med satellitter i bane rundt jorda. Også for energien i vannbølger gjelder det at den potensielle og kinetiske energien er like store. Den gjennomsnittlige kinetiske energien per flateenhet i en vannbølge kan derfor også uttrykkes slik:

$$E_k/(B \cdot L) = 1/4 \cdot \rho \cdot g \cdot A_0^2$$

Samlet energi i en bølge. Ifølge avsnittene foran, blir:

$$E_b/(B \cdot L) = (E_p + E_k)/(B \cdot L) = 1/2 \cdot \rho \cdot g \cdot A_0^2 \ \ [J/m^2]$$

Det vises til eksempel på neste side med beregning av den samlede energien i en karakteristisk "Nordsjø-bølge".

Energitransport i bølger, og effektoverføring

Hvor stor effektressurs ligger i bølger? Å kunne beregne energiinnholdet i en bølge er interessant i seg selv, men enda mer interessant er det å kunne beregne hvor mye energi den overfører per tid, altså den effekt den overfører. For eksempel er det denne størrelsen som betyr mest for et bølgekraftverk.

Som kjent er effekt = energi / tid. Skal vi beregne en bølges effekt, må vi derfor trekke inn bølgehastigheten i beregningene.

Den enkleste måten å gripe an problemet på, er å tenke seg en "vegg" som bølgen skal passere, og så bestemme hvor mye energi som passerer "veggen" per tid. Tiden som bølgen bruker på å passere "veggen", er lik bølgeperioden T. Dette gir:

$$P_b = E_{tot}/T = 1/2 \cdot \rho \cdot g \cdot A_0^2 \cdot B \cdot L/T \quad [J/s=W]$$

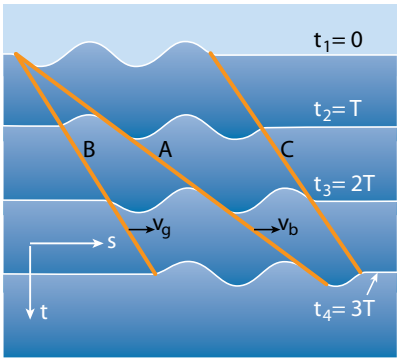
Innfører vi $T = L/v_b$, blir effekt per m bredde for en enkeltbølge:

$$P_b/B = 1/2 \cdot \rho \cdot g \cdot A_0^2 \cdot v_b \quad [W/m]$$

I praksis er vi sjelden interessert i virkningen fra bare én eneste bølge. I stedet bør vi betrakte flere bølger som følger etter hverandre. Da må vi være klar over at bølger kan interferere. Ser vi på flere bølger, altså en gruppe bølger, kan det vises at den gjennomsnittlige farten til disse er lik halvparten av farten til den individuelle bølgen. Dette gjelder for bølger på dypt vann. Det vil føre for langt å bevise dette, så vi må nøye oss med å slå fast at den gjennomsnittlige effekten som per m bredde overføres med bølger i uregelmessig sjø, er

$$P_b/B = 1/2 \cdot \rho \cdot g \cdot A_0^2 \cdot v_b/2 = 1/4 \cdot \rho \cdot g \cdot A_0^2 \cdot v_b \quad [W/m]$$

Det vises for øvrig til eksempel på neste side.



a. Skjematisk beskrivelse av fenomenet gruppehastighet for en gruppe bølger (bølgetog) b.Gradvis destruktiv og konstruktiv interferens i to overlagrede bølger. Fra [1.4]

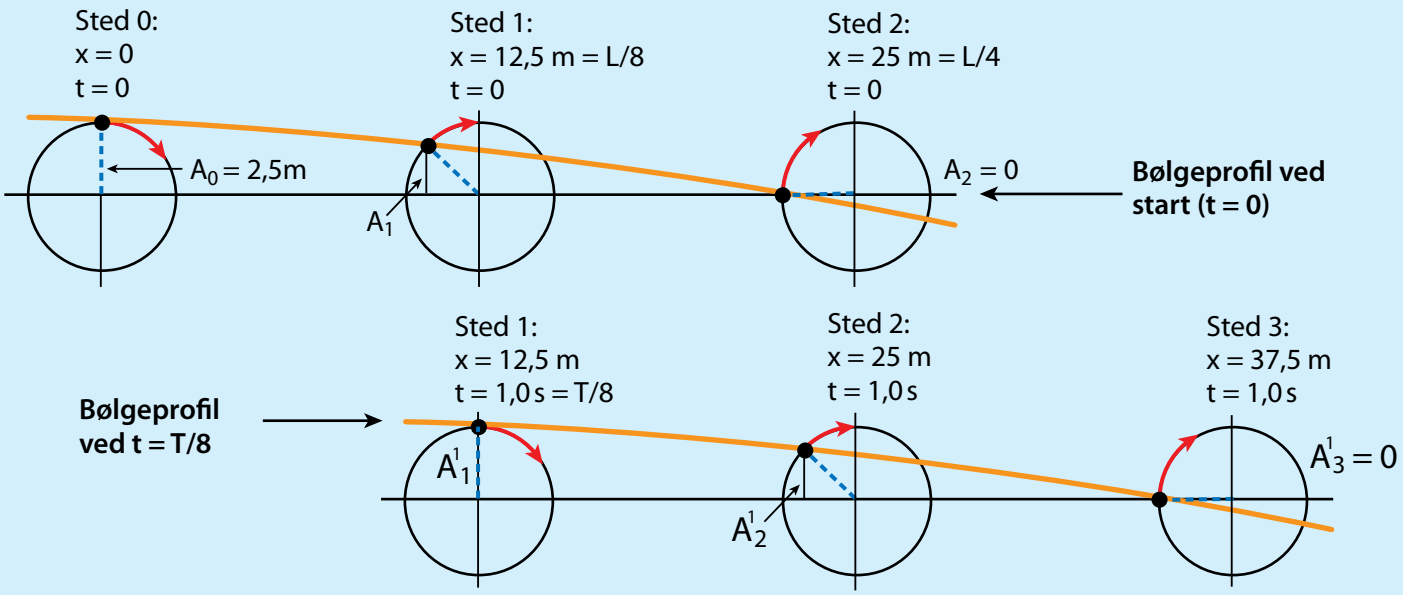
I en bølgetank genereres det en bølgegruppe med to bølger. Like etter at bølgene ble generert, er bølgemønsteret som vist for tidspunktet t_1. Etter at gruppen har forplantet seg et stykke nedover i tanken, begynner den første bølgen å forsvinne, samtidig som en ny bølge oppstår ved slutten av bølgegruppen. Denne prosessen pågår hele tiden. Bølgen forsvinner i fronten av bølgegruppen og oppstår ved slutten av denne. Dette betyr at energien i bølgene transporteres med en gruppefart som er mindre enn bølgefarten til en enkeltbølge. Vi kan tenke oss at energien til bølgegruppen er samlet mellom de to grafene B og C. Grafenes helning er et uttrykk for forplantningsfarten (v= ds/dt). Grafene B og C (for gruppen) svarer derfor til en mindre fart enn graf A (for en enkeltbølge). Det kan vises at for bølger på dypt vann er gruppehastigheten lik halvparten av bølgehastigheten ($v_g = v_b/2$), men vi kan Ikke bruke plass på å gjennomføre dette beviset. Spesielt Interesserte elever henvises til [1.4]

Eksempel 1.2: Bølgebevegelse og bølgeenergi

En Nordsjøbølge kan ha følgende data (på dypt vann): bølgehøyde H = 5 m (A_0 = 2,5 m), bølgelengde L = 100 m, bølgehastighet v_b = 12,5 m/s og periode T = L/v_b = 8,0 s.

a) Tegn i skala 1: 250 en firedel av bølgen i en startposisjon. Da gjelder: A = A_0 = H/2 (full amplitude), x= 0 og t= 0. Tegn også inn tre sirkler som viser partikkelbevegelsen i overflaten.
b) Tegn, i samme skala, beliggenhet og profil etter at den samme bølgedelen har beveget seg 1/8 bølgelengde.
c) Beregn bølgetall og sirkelfrekvens ω
d) Kontrollberegn og sammenlign med opptegningene: amplituden på stedet x = 12,5 m (L/8) i startbølgen, og amplituden på stedet x=25 m etter at bølgen har beveget seg 1/8 bølgelengde etter start.
e) Beregn bølgeenergi per m² og bølgeeffekt per m bredde

Løsning a og b



c) Bølgetall k = 2 · π/L = 2 · π/(100 m) = 0,0628 m^{-1}

Sirkelfrekvens ω = 2 · π/T = 2 · π/8,0 s = 0,785 s^{-1}

d) $A_1 = A_0 \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t) = 2{,}5\ m \cdot \cos(0{,}0628 \cdot 12{,}5 - 0{,}785 \cdot 0) =$

$= 2{,}5\ m \cdot \cos 0{,}785 = 2{,}5\ m \cdot \cos(\pi/4) = 1{,}77\ m$

$A_2 = A_0 \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t) = 2{,}5\ m \cdot \cos(0{,}0628 \cdot 25 - 0{,}785 \cdot 1{,}0) =$

$= 2{,}5\ m \cdot \cos(1{,}57 - 0{,}785) = 1{,}77\ m$

I disse tilfellene hadde det vært lett å bestemme amplitudene direkte av figurene. Men det er ikke alltid tilfelle, se oppgave 1.1.

e) Bølgeenergi $E_b/(B \cdot L) = 0{,}5 \cdot \rho \cdot g \cdot A_0^2 =$

$= 0{,}5 \cdot 1025\ kg/m^3 \cdot 9{,}8\ m/s^2 \cdot (2{,}5\ m)^2 = 31{,}4\ kJ/m^2$

Bølgeeffekt $P_b/B = E_b/(B \cdot L) \cdot v_b/2 = 31{,}4\ kJ/m^2 \cdot 12{,}5\ m/s \cdot 0{,}5 = 196\ kW/m$

Bølger

Interferens av bølger

Repetisjon fra fysikk i videregående skoler. Når bølger løper sammen, vil de påvirke hverandre, noe som resulterer i et forandret bølgemønster. To bølger som kolliderer, gir en ny bølge med utslag som er summen av utslagene hos hver av enkeltbølgene, regnet med fortegn. Som illustrert til høyre, skiller vi mellom tre forskjellige typer bølgeinterferens: Konstruktiv, destruktiv og blandet interferens.

Konstruktiv og destruktiv interferens

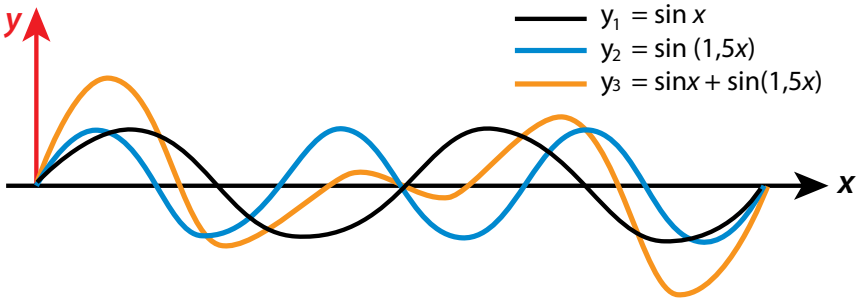
Konstruktiv interferens oppstår når bølgetog med samme bølgelengde og hastighet møter hverandre i samme fase. Her blir bølgehøyden summen av bølgehøydene til hver av de individuelle bølgene.

Destruktiv interferens forekommer når bølger med samme bølgelengde og bølgehastighet møter hverandre når de er i motfase, det vi si at bunnen av en bølgedal møter en annen bølge i det øyeblikk denne har sitt maksimale utslag. Bølgene vil nulle hverandre ut, og resultatet blir stille vann i området der bølgetogene møtes. Det er for eksempel slik de fleste bølgekraftverk arbeider. Disse består da av et svingesystem som lager destruktiv interferens med de innkomne bølgene, se side 13-6.

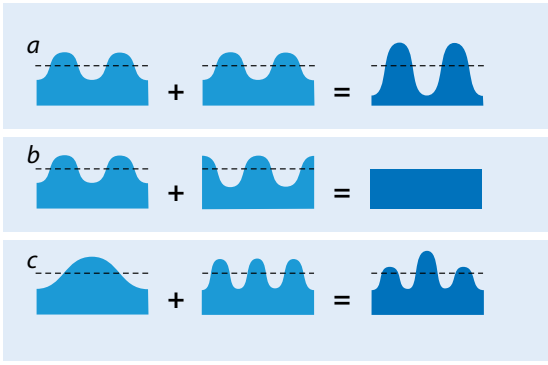
Blandet interferens

Blandet interferens er når to bølgetog med forskjellige bølgehøyder og/eller bølgelengder kommer fra forskjellige retninger. Dette fører til en blanding av konstruktiv og destruktiv interferens, som gir et mer komplekst bølgemønster. Eksempler på blandet interferens er vist nedenfor og i illustrasjon c til høyre. Et annet eksempel: En bulb i baugen på et skip lager en bølge som virker sammen med bølgen skipet selv lager, og de skal sammen gi destruktiv interferens.

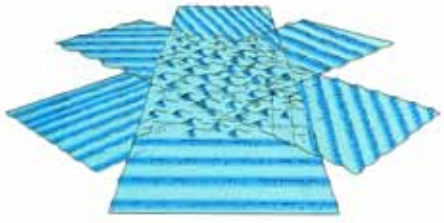
Blandet interferens er det som oftest forekommer på sjøen når vinden danner ulike bølger med forskjellige bølgeretninger. Resultatet blir da slike komplekse bølgemønstre som vi ofte ser på sjøen, se figur til høyre.



Interferens av bølger beregnet med lommeregner. Fra [1.1]
Utgangsbølgene har bølgelengde L1 og L2=1,5 · L1. Dette gir blandet interferens (rød bølge) med ny bølgeprofil.



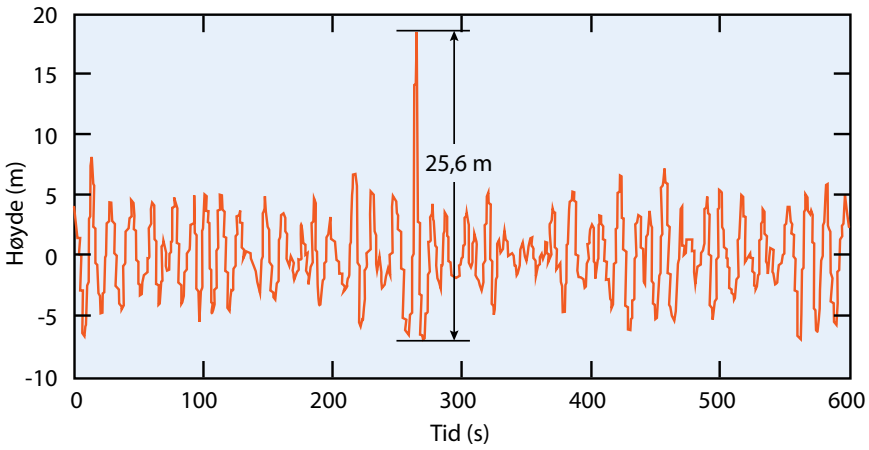
Interferens av bølger.
a. Konstruktiv interferens. *Bølger med samme bølgelengde og fart kolliderer når de er i samme fase.*
b. Destruktiv interferens. *Bølger med samme lengde og fart kolliderer når de er i motfase*
c. Blandet interferens. *To eller flere bølger med ulike lengder, fart og/eller retninger kolliderer.*



Uregelmesige bølger på havoverflaten framkommer ved interferens mellom ulike langkammede bølger med forskjellig bølgeretning.

Monsterbølger

Hvor store kan bølger bli? I begynnelsen av 1900-tallet kom en regel som er blitt kalt "60 fots regelen", og som sa at bølgers teoretiske maksimumshøyde ikke kunne overskride 60 fot (18,3 m). I 1935 ble imidlertid en amerikansk marinetanker, USS Rampano, "fanget" i en tyfon vest i Stillehavet. Mannskapet klarte å måle at bølgehøyden var 34 m! Målingen var basert på visuelle observasjoner fra mannskapet, men kan likevel betraktes som relativt nøyaktig.



Målinger av bølgehøyder ved oljeplattformen Draupner i Nordsjøen 1. januar 1995. *Bølgen med bølgehøyde på 25,6 m blir kalt nyttårsbølgen eller Draupnerbølgen og må være dannet av en serie konstrukive interferenser.*

Monsterbølgen I Nordsjøen. Selv om mange gjennom historiens løp har hevdet å ha opplevd lignende "monsterbølger" som kommer ut av intet, ble de bekreftet for første gang 1. jan.1995 ved Draupnerplattformen i Nordsjøen. Draupnerbølgen, også kjent som "nyttårsbølgen", ble da målt med en bølgehøyde på 25,6 meter, mens ingen andre bølger i samme område og tidsrom var høyere enn 9 meter. Målingen ble gjort med en nedoverrettet laserpekesensor. Målinger av bølgehøydene noen minutter rundt Draupnerbølgen er vist i figur ovenfor.

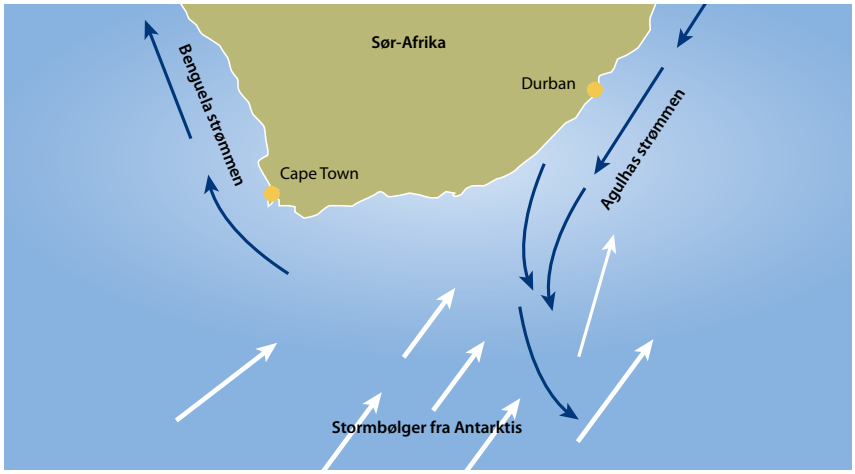
Selv med dagens tilgang på bølgedata og satellitter som er laget for å observere havet, er det fortsatt ikke mulig å forutse slike monsterbølger. Årsaken antas å være et ekstraordinært tilfelle av bølgeinterferens. Flere bølger arbeider sammen og legger seg oppå hverandre med konstruktiv interferens og danner en ekstremt stor bølge.

Selv ikke store tankskip er trygge hvis de møter interaksjonen mellom Angulhas-strømmen og bølger fra Antarktis på sitt verste. *Det Iranske tankskipet "Tocal" etter møte med monsterbølge. Fra nettside til ABC News.*

Et annet eksempel er det norske tankskipet Wilstar som fikk hele baugen slått inn i 1974.

Angulhasstrømmen møter antarktiske stormbølger. *På grunn av den motgående strømmen blir bølgene brattere og kortere og blir da samtidig høyere fordi bølgeenergien blir begrenset til et mindre område.*

Møte mellom bølger og strøm kan også gi enormt store bølger. Øyer og grunner later til å hjelpe til med utvikling av monsterbølger, og samspill mellom sterke motgående strømmer og bølger kan også spille en rolle. Et eksempel er vist nedenfor.



Bølger

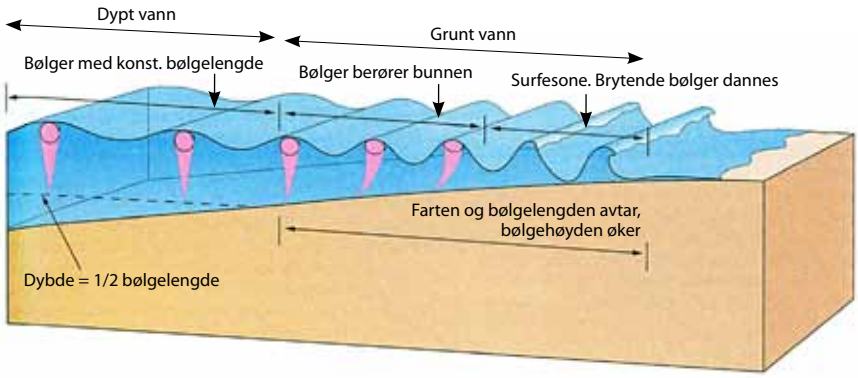
Bølger som nærmer seg kysten

Hva skjer når dønningene beveger seg bort fra sitt opprinnelsesområde og nærmer seg grunt vann? Da forandres både bølgeprofil og bølgeretning.

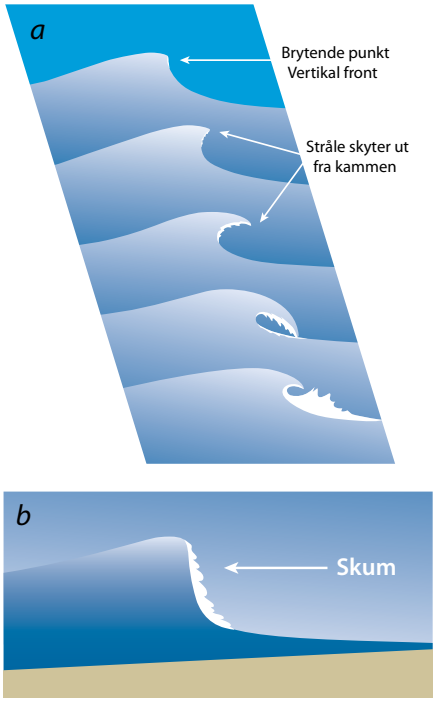
Forandring av bølgeprofiler

Overgangsbølger, bølgehøyden øker, fart og bølgelengde avtar. Se for deg dønninger som beveger seg mot kysten mens bunnen gradvis stiger. Når vanndybden blir mindre enn halve bølgelengden, forandres dønningene til overgangsbølger, se side 1—19. Med minkende vanndybde vil bunnen begynne å forstyrre den sirkulære banebevegelsen til vannpartiklene i bølgen. Dette fører til en minkende bølgehastighet, og de etterfølgende bølgene kommer nærmere. Dermed minker bølgelengden. Underveis vil bølgene miste noe energi til friksjonsvarme, men det meste av energien bevares. Dermed må bølgene bli høyere samtidig som hastigheten og bølgelengden altså avtar.

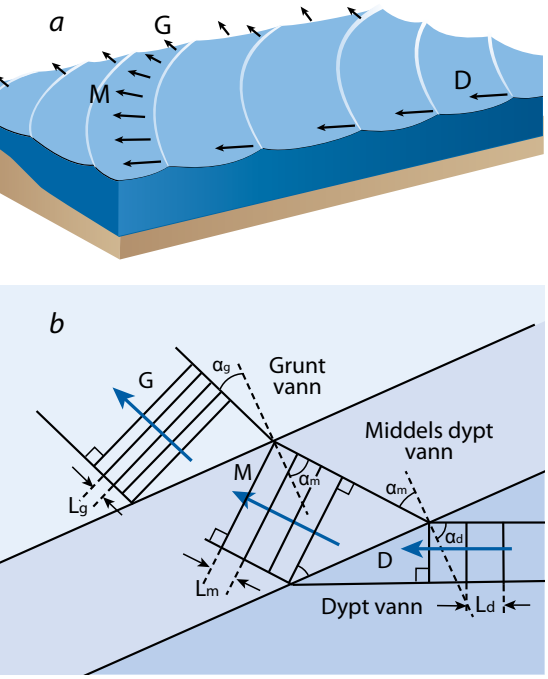
Gruntvannsbølger, brytende bølger. Når vanndybden blir mindre enn 1/20 av bølgelengden, blir bølgene til gruntvannsbølger. Farten avhenger nå kun av vanndybden. Når bølgens helning (H/L) når det kritiske forholdet 1/7, bryter bølgen. Dette kommer av at bølgepartiklenes hastighet nær bunnen er blitt betydelig redusert, mens partiklene på overflaten ikke har fått redusert hastigheten sin like mye. Derfor blir vannpartiklene på bunnen av bølgen "løpt fra" av partiklene lenger oppe. Denne brytningen frigjør energi fra bølgen. På denne måten kan bølger transportere energi fra sjøområdene de stammer fra, og til grunnere vann. Forandringen av bølger som nærmer seg kysten er illustrert i figur nedenfor, og forskjellige former for brytende bølger er vist i margen.



Profiler for bølger som nærmer seg stranda. Fra [1.11]. *Området som egner seg for surfing, finner vi der hvor bølgene begynner å bryte som "plunging breaker". Dette skjer når vanndybden blir ca. 1,3 · H. Da vil bølgen ha fått en steilhet på ca. 1/7.*



Brytende bølger fra [1.9]
*a. En **"plunging breaker"** oppstår både på dypt vann og på strender med relativt bratt helning på sjøbunnen. I begge tilfeller løper vannet på toppen av bølgen bokstavelig talt fra de nedre delene av bølgen. Bølgetoppen skyter ut som en stråle og krøller seg framover uten noe vann under.*
*b. En **"surging breaker"** oppstår bare på strender. Den karaktriseres av at bølgefronten stadig blir brattere etter hvert som bølger nærmer seg stranden. Når den har kommet tett opp til strandlinjen, skyter den nederste del av fronten fram.*
*c.**"Spilling breaker"**, se side 1-20*



Refraksjon for bølger som nærmer seg stranda. Repetisjon fra fysikken i vgs (Snells brytningslov).
a. Oversikt. Fra 1.1] *Tre bølgestråler, D, M og G, er markert for vanndyp som avtar innover mot strandlinja.*
b. Detaljer av bølgestrålene D, M og G, sett ovenfra. *Retningsforandringene skyldes at bølgefarten stadig avtar når bølgen nærmer seg strandlinja. Til slutt vil bølgene få en stråleretning normalt på stranda. Se også side 1-37, som viser brytning av lydbølger i vertikalplanet.*

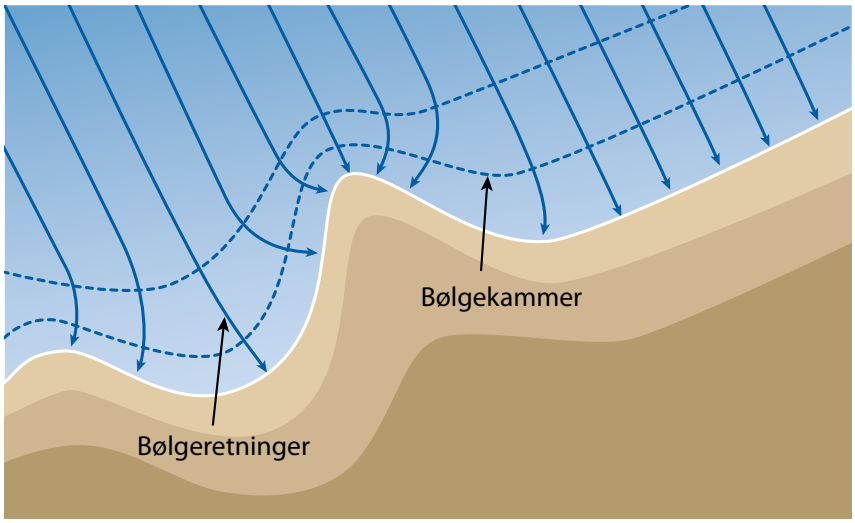
Bølgeretninger/bølgestråler rundt en odde og en bukt. *Odden må absorbere mer bølgeenergi enn bukta per meter strand*

Forandring av bølgeretninger

Bølgerefraksjon. Når vi studerer bølger som kommer inn på stranda, ser vi at bølgekammene er parallelle med strandlinja. Det er usannsynlig at alle bølgene som kommer fra havet, skulle bevege seg i 90° vinkel med kystlinja. Derfor må retningen til bølger som nærmer seg strandlinja på en eller annen måte forandres før bølgene når land. Dette fenomenet, at bølgene forandrer retning for å nærme seg strandlinja vinkelrett, kalles bølgerefraksjon.

Se for deg en bølge som skrått nærmer seg en bunn som skråner oppover mot stranda. Den ene siden av bølgen vil da påvirkes av bunnen først og senke farten, mens resten av bølgen fortsetter med bølgens opprinnelige fart og retning. På denne måten "bøyes" bølgen mot den grunnere delen av skråbunnen, se figur nedenfor.

Hvorfor egner bukter seg godt til oppankring av båter?
Kystlinjer vil aldri være helt rette, og bølgerefraksjon gir en ujevn fordeling av bølgeenergien langs kysten, se figur nedenfor. Pilene viser bølgenes forplantningsretninger. Som vi ser, konvergerer bølgestrålene når de beveger seg mot en odde, mens de sprer seg når de beveger seg inn i en bukt. Bølgeenergien konsentreres derfor rundt pynter og odder, noe som fører til erosjon. Den lave bølgeenergien i bukter gjør at disse generelt er gode steder for oppankring av en båt.



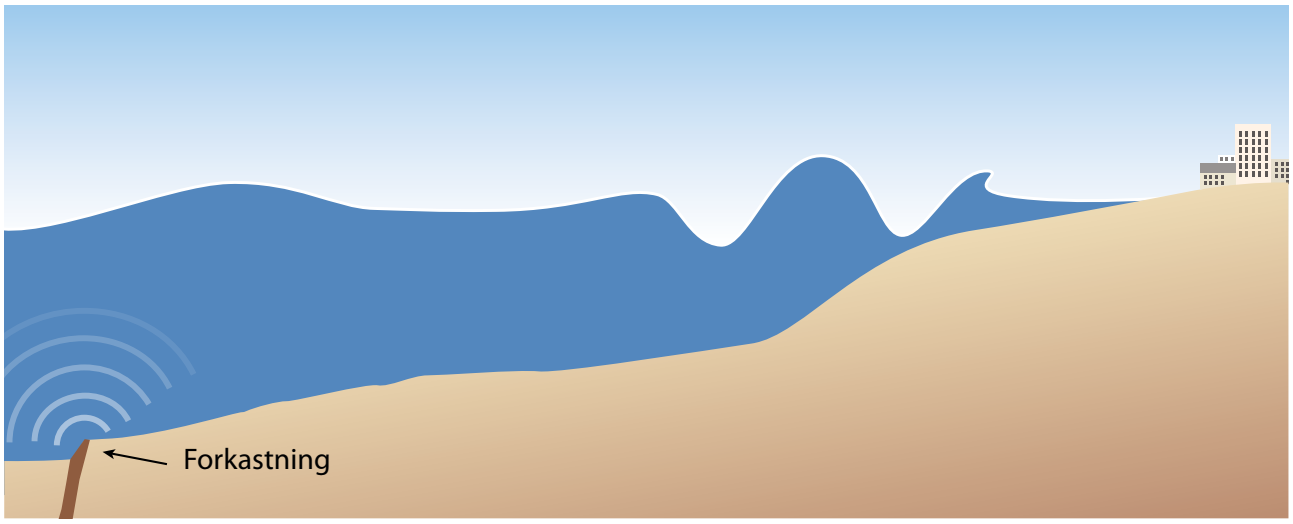
Tsunamier

En tsunami er en av de mest fryktede bølgene på jorda. Uttrykket tsunami kommer fra japansk.

Dannelse av tsunamier. Tsunamier utløses vanligvis av seismiske hendelser, som en forkastning eller et utbrudd av jordskjelv under vann. Vi kan derfor si at tsunamier er seismiske havbølger. Det er som oftest forkastninger som forårsaker de største tsunamiene. Da beveges store områder av havbunnen vertikalt. Dette kan gi enorme forandringer av volumene i havbassenget og i neste omgang brå forandringer i vannstanden ved havnivå. Horisontale forkastninger vil vanligvis ikke føre til en tsunami. Derimot kan undervannsskred utløst av jordskjelv eller vulkanutbrudd under vann, forårsake store tsunamier. "Splash wave" fra kystnært jordskred kan også gi en form for tsunami. Bølgehøyde og fart for en tsunami framgår av eksempel.

Hvordan kan en tsunami være så ødeleggende med bare 0,5 m bølgehøyde? Når en tsunami nærmer seg kysten, vil bølgehastigheten minke, akkurat som for alle andre bølger som nærmer seg land med stadig mindre vanndyp. Bølgehøyden øker, men på grunn av den store bølgelengden vil ikke bølgen bryte. I stedet oppfører tsunamier seg som ekstremt høyt tidevann. *Vannstanden kan øke opptil 40 m,* og vanlige bølger kan legges oppå den økte vannstanden igjen. Når en tsunamis bølgedal når kysten, vil vannet fort trekke seg tilbake, og vannstanden kan være flere meter under vannstanden ved lavvann.

Tsunamibølger er ikke enslige bølger, men opptrer som en serie bølger som ofte forårsaker flere dramatiske stigninger og tilbaketrekninger av vannet. Den første bølgen trenger heller ikke nødvendigvis være den største.



Utvikling av en tsunami.

Eksempel 1.3. Bølgefart og bølgelengde for en tsunami som er dannet med en periode T=40 min og en bølgehøyde H = 1 m på et havdyp lik 4000 m

a) Beregn bølgelengden og bølgehastigheten på åpent hav. Begrunn. hvorfor du da bruker utrykket for bølgehastighet på grunt vann.
b) Beregn bølgelengden og hastigheten når bølgen kommer inn mot en strand og når dybden er 6 m.
c) Eksemplet fortsettes i oppgave 1.7 med bestemmelse av bølgehøyde ved 6 m vanndybde og vurdering av om bølgen har begynt å bryte eller ikke.

Løsning

a) Siden $v_b = L/T$, vil uttrykket for bølgehastigheten på grunt vann på side 1-19 gi en bølgelengde og bølgefart

$$L = \sqrt{g \cdot d} \cdot T = \sqrt{9{,}8\ m/s^2 \cdot 4000\ m}\ (40 \cdot 60\ s) = 475\ km$$

$$v_b = L/T = 475\ km/(40 \cdot 60s) = 0{,}198\ km/s = 713\ km/h$$

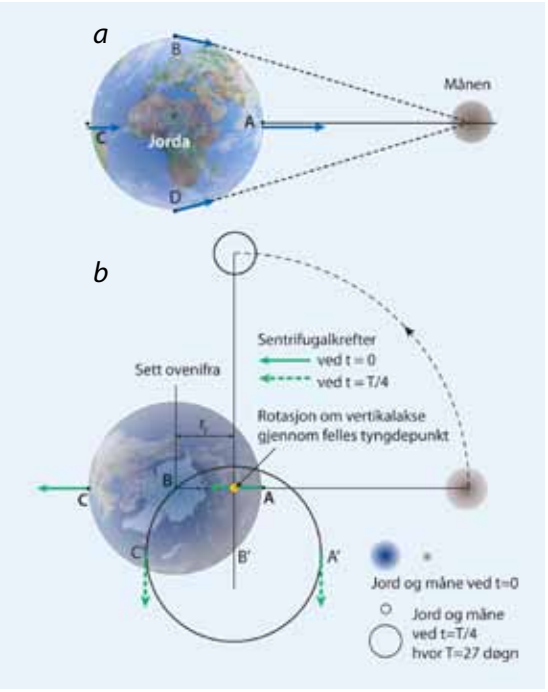
Siden grunt vann defineres som dybde mindre enn L/20, altså mindre enn ca. 24 km for denne bølgen, vil 4 km vanndybde klart måtte betraktes som grunt vann

b) $L = \sqrt{g \cdot d} \cdot T = \sqrt{9{,}8\ m/s^2 \cdot 6\ m} \cdot (40 \cdot 60s) = 18{,}4\ km$

$$v_b = L/T = 18{,}4\ km\ /\ (40\ min) = 0{,}46\ km/min = 27{,}6\ km\ /h$$

Bølger

Tidevannsbølger



Tidevann forårsaket av månen

a. Gravitasjonskrefter på jorda fra månen. *Fra fysikken vet vi at en gravitasjonskraft mellom to legemer er omvendt proporsjonal med kvadratet av avstanden mellom dem. Dette gir krefter med relative størrelser som vist.*
b) Sentrifugalkrefter i rotasjonssystemet jord/måne. *Jorda roterer både om sin egen akse (i løpet av 24 timer) og om et felles tyngdepunkt (i løpet av ca. 27 døgn). Det er bare den sistnevnte rotasjonen som, sammen med månens gravitasjonskraft, genererer tidevannsbølgene. I sentrum av jorda er det balanse mellom månens tiltrekningskraft og sentrifugalkraften, som er proporsjonal med radien r_j på figuren. Det betyr at ethvert punkt på jorda roterer i en sirkel med radius r_j, og dermed blir denne sentrifugalkraften like stor overalt på jorda. Alle de grønne pilene på figur b er derfor like lange og parallelle ved ethvert tidspunkt.*

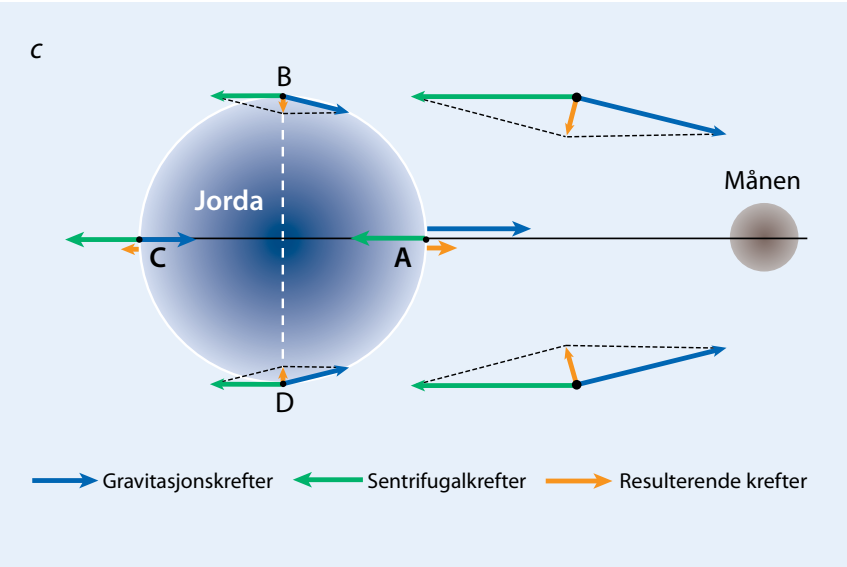
Tidevann er et meget komplekst fenomen som oppstår på grunn av gravitasjonskreftene fra månen og sola. Vi legger merke til tidevannet ved at vannstanden i havet endrer seg gjennom dagen. Vannstanden både øker og minker ca. to ganger daglig der det halvdaglige tidevannet dominerer. I noen deler av verden forekommer høyvann bare én gang per dag, dette kaller vi daglig tidevann.

Månens innvirkning på tidevannet

Månens gravitasjonskraft. For å forstå tidevannet begynner vi med en forenklet modell av det systemet som jorda, månen og sola utgjør. Først ser vi på gravitasjonskraften fra månen og ser bort fra jordas rotasjon. Månens gravitasjonskraft trekker på jordas overflate, og jo mindre avstand det er mellom et sted på jorda og månen, jo sterkere blir gravitasjonskraften, se figur a til venstre.

Jorda og månen roterer rundt en felles akse. Jorda og månen er ikke stillestående i rommet, men roterer rundt en akse gjennom jordas og månens felles tyngdepunkt, se figur b. Denne rotasjonen betyr at det virker sentrifugalkrefter på jorda med størrelser og retninger som vist i figur b, altså likt over hele jorda.

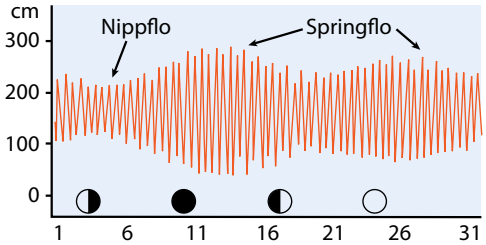
Tidevannskrefter. Resulterende krefter framkommer ved å summere de vektorer som er dannet av gravitasjonskraften og sentrifugalkraften på de enkelte steder. I figur c ser vi at på punkt A, stedet på jorda som er nærmest månen, virker den resulterende, tidevannsgenererende krafta rett mot månen, mens den virker vekk fra månen på den andre siden av jorda (punkt C). I punktene B og D har resultanten en komponent som virker mot sentrum av jorda.



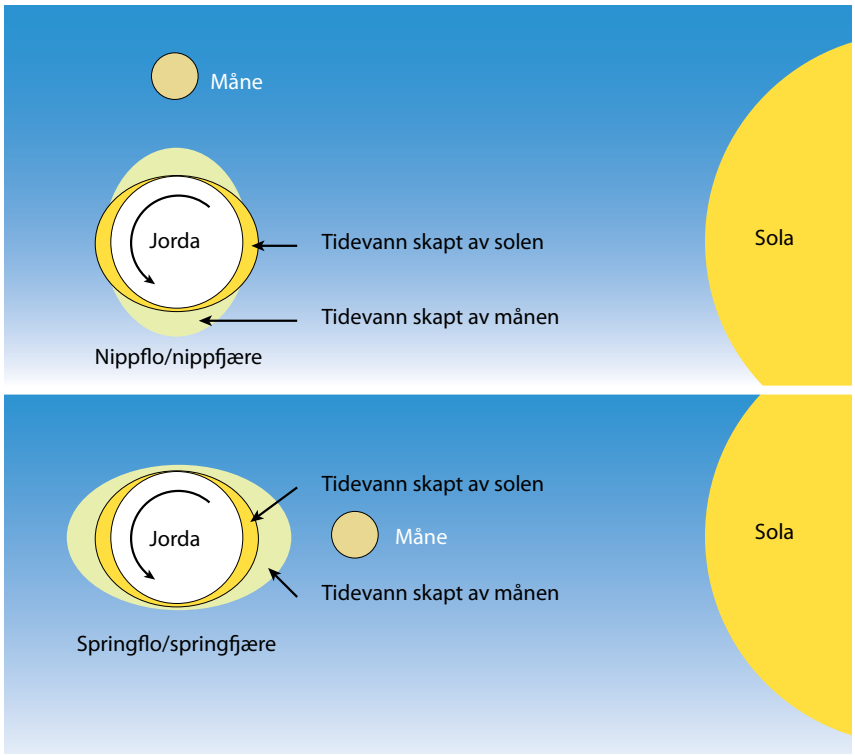
c. Samlet virkning av gravitasjons- og sentrifugalkrefter. *Alle kreftene er vektorer og må settes sammen til resulterende krefter (oransje) etter regler for vektorsummasjon.*

Solas innvirkning på tidevannet. Også sola har et gravitasjonstrekk på jorda. Gravitasjonskrafta fra sola er litt mindre enn halvparten av gravitasjonskrafta fra månen. Jorda og månen roterer hele tiden rundt hverandre og rundt sola, noe som fører til at gravitasjonskreftene på jorda fra sola og månen hele tiden er i forandring.

Tidevannet på jorda er sterkest når både sola, månen og jorda ligger i en rett linje siden gravitasjonskreftene fra sola og månen da virker i samme retning (se nederste figur). Når månen, jorda og sola står i denne posisjonen, kalles tidevannet springflo. Tidevannet er svakest når aksen mellom jorda og månen og aksen mellom jorda og sola står normalt på hverandre. Dette kalles nippflo. Forandringen mellom nipp- og springflo kan ses på en tidslinje som viser vannhøyden ved et gitt sted, som vist i figur øverst i margen.



Daglige registreringer av flo og fjære i Tromsø.
Springflo og nippflo opptrer to ganger i måneden



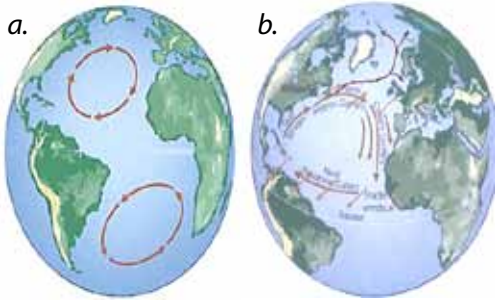
Posisjoner av jord, måne og sol ved dannelse av nippflo og springflo. Fra [1.3]
Samvirket mellom tidevannskreftene fra måne og sol er størst ved nymåne og fullmåne. Da har vi springflo og springfjære. Siden månen bruker ca. 29,5 døgn på et omløp, skjer dette ca. hver 14. dag. Omtrent sju døgn senere er samvirket mellom sol og måne på sitt svakeste, da har vi nipptidevann (nippflo og nippfjære).

Tidevannets variasjoner kan betraktes som bølger. Mens jorda roterer i løpet av 24 timer, vil ethvert punkt på jorda hele tiden forandre sin posisjon i forhold til sola og månen. Dermed kan vi se på tidevannet som bølger som beveger seg over jordas overflate med store bølgelengder og perioder på omtrent et halvt døgn. Refleksjon av tidevannsbølger fra forskjellige landmasser, samt resonans i havbassengene, gjør at noen deler av verden opplever tidevann som varierer bare én gang per døgn. Du kan finne ut mer om tidevann på nettet.

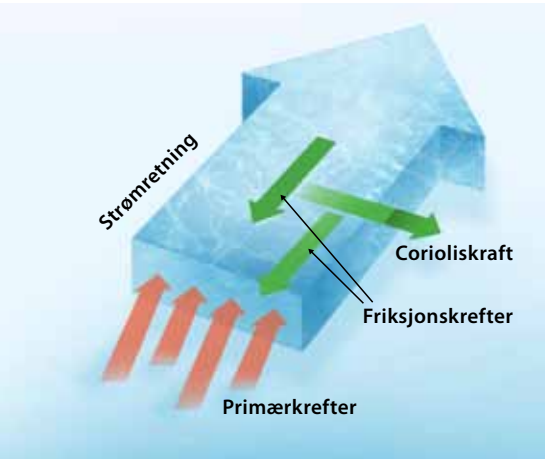
Undringsoppgave:

Hvorfor er ikke døgnets to høyvann like store? Dette framgår tydelig av figuren øverst i margen.

Havstrømmer



a. Hovedstrømmer i Atlanterhavet transporterer varme fra ekvator til polare strøk
b. Golfstrømmen skilles ut fra hovedstrømmen syd for Grønland og gir behagelig klima i Norden.



Skjematisk illustrasjon av krefter som påvirker strømninger i havet

- *krefter som genererer strømmer (primærkrefter, tegnet med rødt):*
  - *vindkrefter (lang- og kortperiodiske)*
  - *tiltrekningkrefter fra sol og måne*
  - *krefter fra lufttrykkvariasjoner*
  - *krefter fra tetthetsvariasjoner i havvannet*
- *krefter som påvirker strømmens fart og retning (sekundærkrefter, tegnet med grønn farge):*
  - *krefter forårsaket av jordas rotasjon (massekrefter pga. Coriolisakselerasjon, se side 1-8)*
  - *friksjon (indre friksjon og bunnfriksjon)*

Med sin store varmekapasitet er havet en del av en gigantisk varmetransportør hvor det sammen med vanndamp som føres med vindsystemene, transporterer varme fra ekvator til polare strøk. Havet er i bevegelse, noe som er av fundamental betydning for så vel klimaet som for livet i havet. Bevegelser skjer både i storskala, i oseaniske strømmer som for eksempel Golfstrømmen, og på mikronivå, som ved lokal turbulens. Begge er av stor viktighet for økologien i våre havområder.

Hvordan oppstår havstrømmer?

Vannet påvirkes av krefter som setter bevegelser i gang, primære krefter, og av sekundære krefter som påvirker bevegelsenes retning.

Primærkrefter oppstår pga. tiltrekning fra sol, jord og måne, som trykkkrefter i havet og trykkrefter i atmosfæren. Horisontale krefter oppstår i hav og atmosfære på grunn av forskjeller i tetthet, og dette fører til vind- og strømsystemer. I våre kystfarvann påvirkes havet av ferskvann fra elvene, havflaten stiger, tettheten minker. Havnivået påvirkes av høytrykk og lavtrykk (stormflo) og sol og måne (tidevann, flo og fjære). Havet strømmer fra områder med høyt havnivå til områder med lavere nivå. I kystområdene er lokale strømmer av stor betydning for næringstilgangen til livet i havet.

De sekundære kreftene som virker på vann (og luft) i bevegelse, er friksjon og Corioliskraften. Corioliseffekten er et resultat av jordrotasjonen, se side 1-8. Den påvirker alle bevegelser på jorden, men er ikke merkbar i vårt daglige liv. Den er imidlertid av stor betydning når det gjelder strømning i havet og atmosfæren. På den nordlige halvkulen bøyer denne kraften all bevegelse av til høyre.

Ekman-spiralen

De store vannmasseforflytningene i havet drives av vind og tyngdekraften. De store overflate-strømmene drives av vind, mens de store dype havstrømmene primært drives av forskjeller i temperatur og saltholdighet. Begge har stor betydning for den biologiske produksjonen i havet. Figuren på neste side viser den store virkningen friksjon og Corioliseffekt har på vinddrevet strøm i overflaten. På sine ferder i Arktis observerte Fridtjov Nansen at drivisen drev i en retning 45° til høyre for vindretningen. Dette inspirerte en forskningskollega, svensken Vagn Ekman, som utviklet teorien for Ekman-spiralen. Friksjonen mellom vannlagene fører til at hastigheten minker med økende dyp samtidig som strømmen endrer retning. Hvis det er liten turbulens for øvrig i havet, vil vannstrømmen på 50 meters dyp ha en hastighet mindre enn 5 prosent av farten i overflaten og gå i motsatt retning. Gjennomsnitts-transporten av vann i det laget som påvirkes, går 90° til høyre for vindretningen.

Oppvelling

Oppvelling, eller oppstrømming, er et fenomen som oppstår der hvor vinden blåser langs land, se figur nederst på neste side. Mye nordavind langs norskekysten i sommerhalvåret er svært viktig for planktonproduksjonen. Den oppstrømminga som da foregår, drar med seg næringssalter fra dypet opp i lyssonen hvor fotosyntesen foregår med omdanning av uorganisk materiale til organisk materiale (plante-plankton).

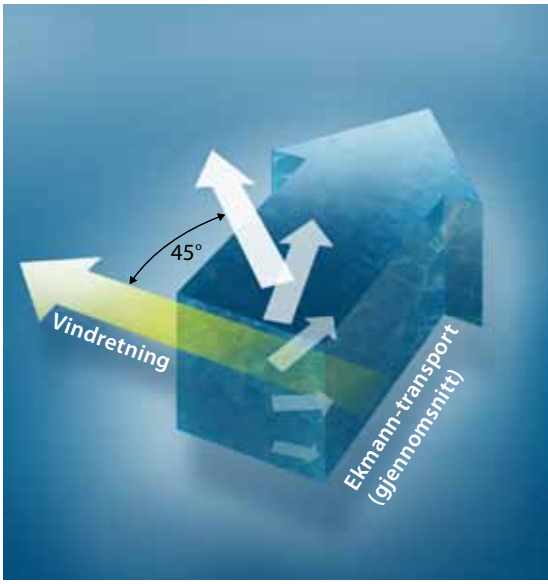
Havstrømmer i norske farvann

Vann fra Atlanterhavet gir behagelig klima i Norden. Kartet på neste side viser i hovedtrekkene dybde- og strømforholdene i Nordsjøen, Norskehavet og Barentshavet, havområder som er svært produktive. De viktigste fiskebankene er navngitt på kartet som også viser dybdeforholdene. Forholdsvis varmt vann fra Atlanterhavet strømmer inn i havene nord for Storbritannia. Vannstrømmen er blitt anslått til å være opp mot 9 millioner m^3 per sekund. Dette er 8—9 ganger vannføringen i alle verdens elver. Varmemengden som transporteres inn i Norskehavet, sies å være 20 000 ganger den norske produksjonen av elektrisk kraft. Dette bidrar til en oppvarming av atmosfæren, noe som er grunnen til det varme klimaet i Norden. Kartet viser at strømmen deler seg i flere grener. Én strømmer forbi Orknøyene og Shetland og inn i Nordsjøen, en annen fortsetter nordøstover langs norskekysten. En del av dette vannet bøyer av vestover inn det dype Norskehavet, men mesteparten går videre nordover. Nord for Lofoten deler strømmen seg igjen. En arm strømmer mot øst inn i det relativt grunne Barentshavet, mens den andre strømmer oppover langs vestkysten av Svalbard.

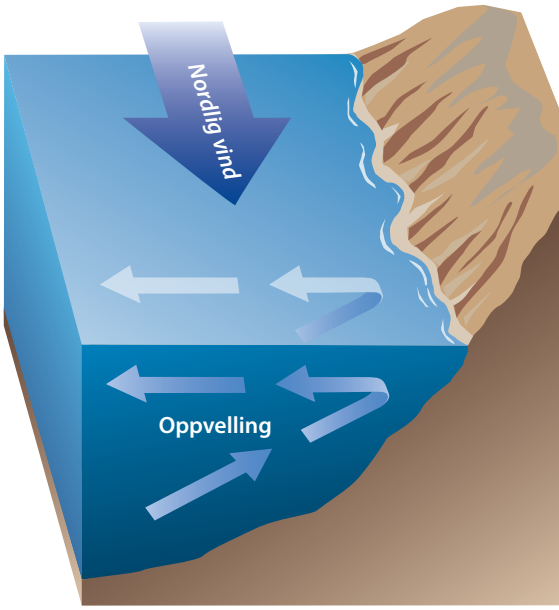
Nordsjøen og Skagerrak. Nordsjøen og Skagerrak kan kalles grunnhav da storparten av området er grunnere enn 100 m. Arealet er ca. dobbelt så stort som Norges landareal. Fra fargene i kartet kan vi se Norskerenna som skjærer seg nedover langs kysten og inn i Skagerrak. Der går dybden helt ned mot 800 m. Strømforholdene i dette området er ganske komplekse. Salt, varmt vann fra Atlanteren kommer sørover langs Skottland, noe kommer også gjennom Den engelske kanal. Vannet fortsetter langs Nederland, Tyskland, opp langs Jylland og inn i Skagerrak. Underveis blandes det med elvevann og avrenning fra land slik at vannet får lav saltholdighet. Vann med lav saltholdighet strømmer også fra Østersjøen gjennom Kattegat og ut i Skagerrak. En god del atlantisk vann strømmer sørover i Norskerenna, men gjør vendereis i Skagerrak, hvor det slår seg sammen med vannet som strømmer i nordlig retning, og danner den norske kyststrømmen. Dette vannet blir liggende som en kile opppå det saltere atlantiske vannet. Denne vannkilen strekker seg fra 10 til 100 km ut fra kysten. Dybden kan være ned mot 100 m nærmest kysten og avtar utover.

Nordsjøen er økologisk sterkt belastet. Dette er et av verdens mest trafikkerte sjøområder med store havner, massivt fiskeri, utvinning av olje- og gass, uttak av sand og grus samt dumping av mudder. Nesten 200 millioner mennesker bor i nedslagsområdet til dette økosystemet som påvirkes av utslipp fra bebyggelse, jordbruk og industri. De store elvene som renner ut i Nordsjøen og Østersjøen, utgjør derfor en potensiell risiko for norsk havbruk og fiske. Store nitrogenmengder vaskes ut av jordsmonnet samtidig som nedbøren inneholder mye nitrogen. Nitratmengdene som strømmer ut i havet, er store i forhold til fosforinnholdet i havet. En antar at dette misforholdet kan være årsaken til den oppblomstring av skadelige alger som av og til skjer på Sørlandet. Elvene kan også bringe med seg miljøgifter som er skadelige for livet i havet.

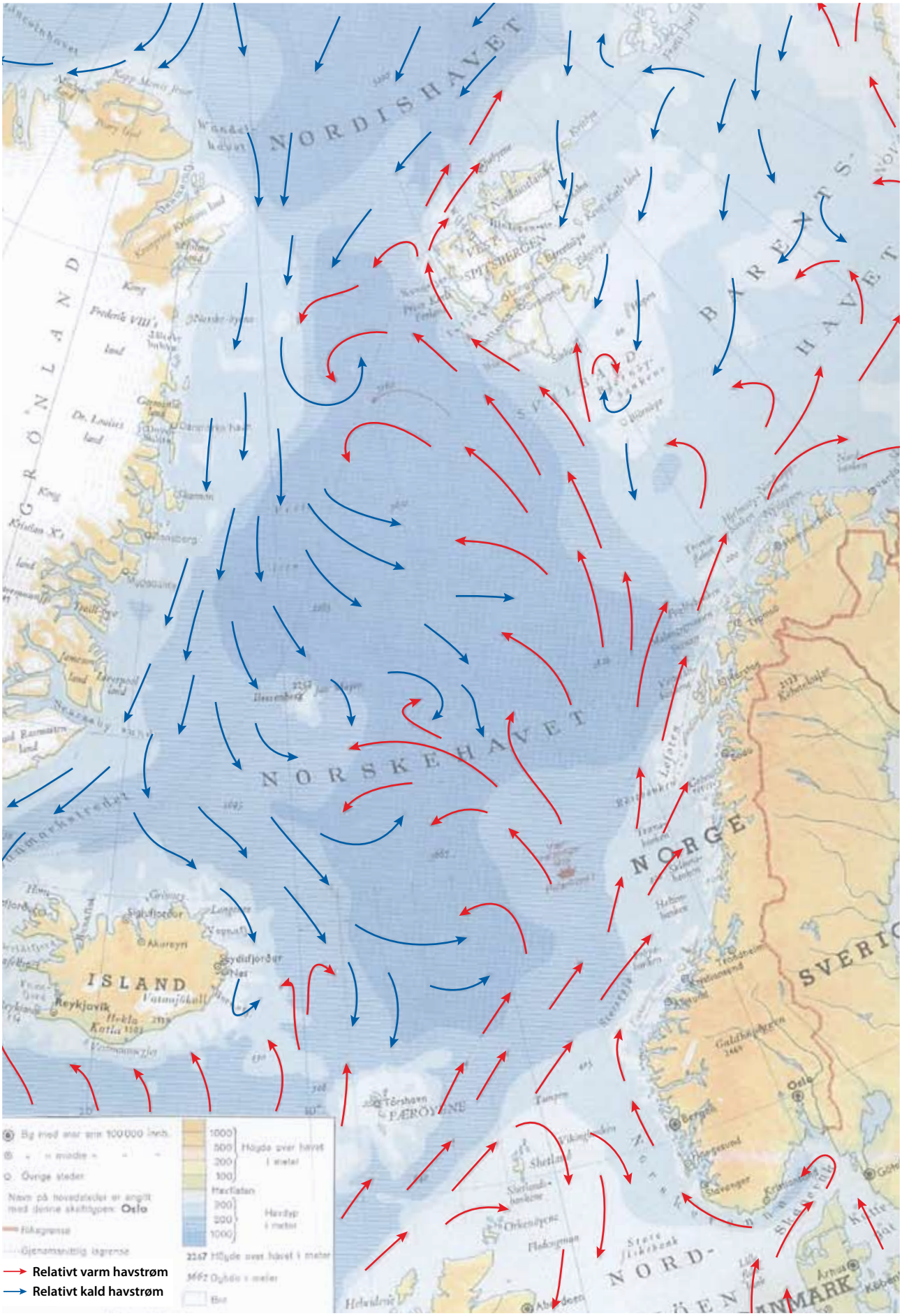
Næringskjeden er kompleks og robust, de viktigste fiskeartene er nordsjøsild, sei, makrell, torsk, breiflabb, tobis, reke og sjøkreps.



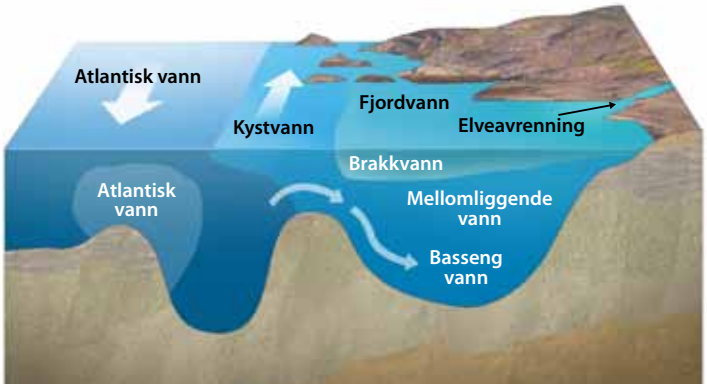
Ekman-spiralen
Overflatestrømmen kan ha en vinkel på 45 ° i forhold til vind. Underliggende lag settes i bevegelse pga. friksjon, men hastigheten blir mindre samtidig som Corioliskraften gjør at retningen blir dreiet litt mot høyre. Strømningspilene vil dermed danne en spiral nedover i dypet. Gjennomsnittstransporten av vann går i 90 ° i forhold til vindretningen.



Oppvelling når det blåser nordlig vind langs norskekysten.
Som det framgår av figuren øverst, dannes det da en strøm normalt på vind-retningen. Dermed genereres det en strøm langs bunnen som vist.


NORDISHAVET
NORSKEHAVET
GRÖNLAND
ISLAND
NORGE
SVERIG
PÆRÖYENE
Relativt varm havstrøm
Relativt kald havstrøm

Norskehavet er et dyphav. Som kartet viser består det av to bassenger på mellom 3000 og 4000 meter. I tillegg til innstrømmingen av varmt atlantisk vann nevnt ovenfor, kommer det kalde strømmer fra Nordishavet og Grønlandshavet nedover langs Øst-Grønland. Om sommeren er temperaturen i den østlige delen 6—7 °C på 100 meters dyp, mens den i vest rundt Jan Mayen er 0—1 °C. På østsiden av Jan Mayen er det en front mellom disse vannmassene. Det varme og salte atlantiske vannet kjøles ned nord i Norskehavet og synker. På grunn av den høye saltholdigheten blir dette vannet svært tungt. Etter hvert renner det kalde vannet sørover over soklene rundt Island. Sammen med et lignende nedsynkningsområde sør for Grønland er dette starten på en kraftig dyphavsstrøm sørover i Atlanteren med et volum som anslås til å være hundre ganger vannstrømmen i Amazonas. Dette er sjøvann rikt på næringssalter og det er oppvelling av dette vannet som bidrar til den voldsomme planktonproduksjonen som foregår i den antarktiske sommeren. Denne kalde og salte strømmen fortsetter så videre østover i Sørishavet og Det indiske hav (med Coreoliseffekt til venstre).



Terskelfjord på Sørvestlandet. *Figuren viser strømninger som kan oppstå i et slikt fjordsystem. Utenfor kysten flyter atlantisk vann sørover og kystvann nordover. Der hvor det er elver som renner ut, dannes det brakkvann som renner ut av fjorden. På grunn av Corioliseffekten er strømmen sterkest på høyre side av fjorden. Friksjon og turbulens fører til innblanding av saltere vann i overflatelaget og opp til ti ganger mer vann renner ut enn det som kommer fra elvene. Vann renner inn i fjorden for å kompensere for dette. Dette er relativt lett vann fra kyststrømmen som strømmer nordover, og det er dette vannet som dominerer fra terskeldypet til overflaten. I bassengvannet nederst er det liten utskiftning. For å få til en utskiftning av dette trengs det relativt ekstreme værforhold som driver kystvannet ut fra kysten slik at tungt atlanterhavsvann kan renne inn over terskelen og synke ned i bassenget. Noen ganger hender det også at forholdene er slik at skittent bunnvann fra Østersjøen kommer oppover langs kysten og renner inn i fjordene i stedet for atlanterhavsvannet.*

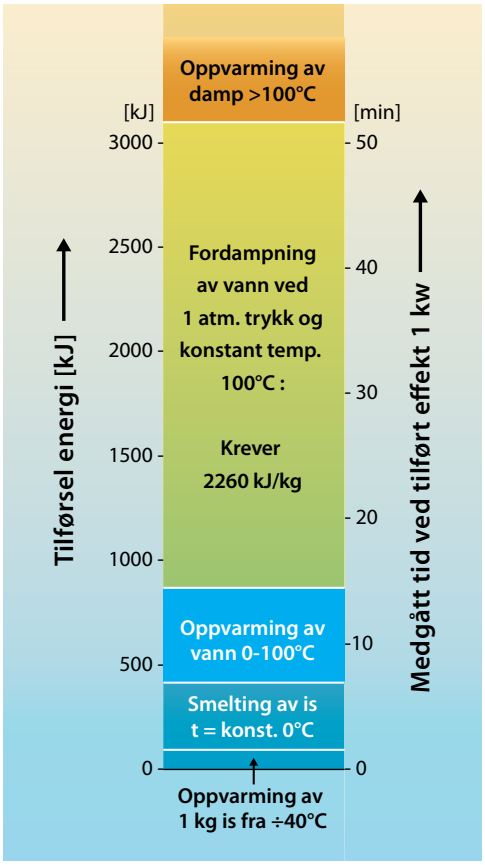
Norskehavet har et areal på 780 000 km^2, ca. to ganger norsk landareal. Næringskjeden er enkel, men har en høy biologisk produksjon. De viktigste fiskeriene omfatter de pelagiske artene makrell og norsk vårgytende sild.

Barentshavet er et sokkelhav med en gjennomsnittsdybde på ca. 250 m og er en del av kontinentalsokkelen rundt Nordishavet. Som kartet viser, er det en bratt skråning opp fra "abyss" (avgrunn)- dypene i Norskehavet. Denne skråningen bidrar trolig til å styre en betydelig del av det varme atlantiske vannet nordover inn i Norskehavet, men en god del strømmer også inn i Barentshavet parallelt med og nord for kyststrømmen som kommer helt fra Skagerrak. Nord i Barentshavet strømmer kaldt vann sørvestover inn over Bjørnøybanken. Der de kalde vannmassene fra øst og nord møter de varme fra vest og sør, dannes den såkalte polarfronten. Vannmassene i Barentshavet består derfor av atlantisk vann, arktisk vann og kystvann.

Arealet er ca. 4 ganger så stort som Norge. Næringskjeden er kompleks, robust og produktiv og omfatter bunnfisk som torsk, hyse, blåkveite, gapeflyndre og uer. I tillegg kommer lodde, som er en planktonspisende pelagisk art, reke, vågehval og grønlandssel. Havet har også en av de største sjøfugl-konsentrasjonene i verden.

Kyst- og fjordsystemene langs norskekysten er svært interessante. Helt opp til Balsfjorden er de fleste norske fjorder terskelfjorder. Disse fjordene er grunne ved innløpet og har en dyp indre del. Noen fjorder har flere terskler. De er dannet i løpet av istiden ved at isen grov ut fjordene under vann. Tersklene er oftest endemorener fra disse isbreene. Dyrelivet i slike fjorder er interessant.

Vannets fysiske egenskaper



Repitisjon fra termofysikken:
Tilført varme og medgått tid til:
- ***oppvarming av 1 kg is, -40 – 0 °C***
- ***smelting av isen***
- ***oppvarming av vannet, 0 -100 °C***
- ***fordamping av vannet, 1 atm. trykk***

Tilført varme per tid: 1 kW = 1 kJ/s

Følgende termiske data er benyttet:
- *spesifikk varmekapasiteter for:*
  *Is: 2,10 kJ//(kg*K)*
  *Vann: 4,18 kJ/(kg*K)*
- *spesifikk smeltevarme for is: 332 kJ/kg*
- *spesifikk fordampingsvarme for vann: 2260 kJ/kg*

Alle de oppgitte spesifikke verdier er parvis like store for fordampning og kondensering, oppvarming og nedkjøling, smelting og frysing.

Vannets tetthet

Vannets spesielle egenskaper kommer til syne når vi studerer vannets tetthet avhengig av temperaturen. Hos vann øker tettheten ned til 4 °C, hvor den er 1,00 g/cm^3, deretter minker den igjen til 0,999 ved 0 °C. Så fryser vannet, og tettheten minker til 0,92 g/cm^3. Når vann utvider seg på denne måten, kan det lett sprenge den beholderen det oppbevares i, eller, om det er et vannholdig legeme som fryser, sprenge cellene og forårsake vesentlige skader. De aller fleste andre stoffer trekker seg sammen ved frysing. Havvann med en saltholdighet på 3,5 %, fryser først ved en temperatur på -1,8 °C. Havvann som er saltere enn 2,5 % blir tyngre og tyngre ved synkende temperatur helt til det fryser.

Vannets termiske egenskaper

En oversikt over termiske data er gitt i figur til venstre. Når varme fjernes fra vann, kan en kjenne at det blir kaldere, og temperaturen faller på termometeret. Når temperaturen faller til 0 grader, og en fortsetter å fjerne varme (som i en fryseboks), vil temperaturen være konstant til alt vannet har frosset. I denne prosessen øker vinkelen mellom hydrogenatomene i vannmolekylet, se figur side 11-8, slik at et krystallgitter kan skapes. I krystallgitteret opptar 24 molekyler det rommet 27 vannmolekyler opptar i flytende form. Dermed reduseres tettheten til 0,92 g/cm^3. Den energien som fjernes i fryseprosessen, kalles frysevarme (eller spesifikk frysevarme hvis vi regner pr. kg, se til venstre).

Temperaturer i havet

Temperaturen på store dyp i Norskehavet ligger i nærheten av minus 2 °C , mens den i overflaten ved ekvator kan komme opp i over 30 °C. Vannmassene i overflaten i verdenshavene varmes ofte opp av sollys samtidig som de blandes av bølger og turbulens til en relativt jevn temperatur. Under dette laget kommer det et lag der temperaturen synker raskt med økende dybde. Dette skillet kalles et sprangskikt, eller en **termoklin**. Skillet blir ofte sammenlignet med et ullteppe som skiller det varme turbulente overflatelaget fra det kaldere vannet i dyphavet. Dybden av termoklinen varierer med årstid og breddegrad. På våre breddegrader dannes det ofte grunne termokliner om sommeren (20—25 m). Disse forsvinner igjen om vinteren. Termokliner påvirker akustisk utstyr som ekkolodd, sonar og undervannskommunikasjon. Dette er viktige instrumenter for skipsfarten, fiskeriene, oljevirksomheten og forsvaret.

Lysforhold i havet

Fotosyntesen er grunnlaget for all produksjon av biomasse i havet. Denne produksjonen foregår i det tynne overflatelaget som kalles den fotiske sonen, hvor sollyset trenger ned. I svært klart tropisk vann kan lyset trenge ned til 600 meters dyp. Dette er svært uvanlig, i kystfarvann hvor det finnes mange små partikler og organismer, kan dybden være begrenset til 40 meter. Dybden lyset rekker ned til, avhenger av bølgelengde. Langbølget rødt lys varmer opp vannet og blir absorbert etter 4 meter, mens blått lys rekker ned til nærmere 250 meter. På ti meters dyp ser alle røde objekter grå ut.

Lydforhold i havet

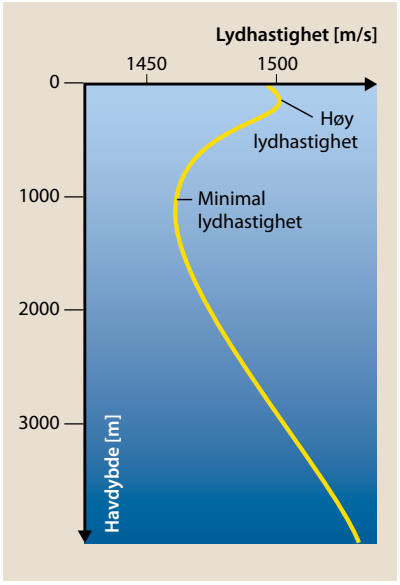
Lydhastigheten øker med temperatur og trykk. Lydhastigheten i sjøvann er på ca. 1500 m/s, nesten fem ganger lydhastigheten i luft. Lydhastigheten øker med temperatur, saltholdighet og trykk. Figuren viser hvordan lydhastigheten varierer med økende dybde. Hastigheten er høyest i det varme overflatevannet og blir redusert etter hvert som temperaturen faller ned til ca. 1000 meter. På større dyp er virkningen av økt vanntrykk større enn virkningen av temperaturfallet, og lydhastigheten øker igjen. Lydhastigheten er 5—7 % høyere i 20 °C saltholdig vann enn i brakkvann ved 5 °C.

Sjødyr bruker langbølget lyd for å kommunisere. Lydintensiteten reduseres i vannet på grunn av spredning og absorpsjon. Spredningstapet er proporsjonalt med kvadratet av avstanden til lydkilden. Absorpsjonen er proporsjonal med frekvensen i andre potens. Det innebærer at lavfrekvent, langbølget lyd bærer lenger enn kortbølget lyd. Lydbølger har mye større rekkevidde enn lys. Sjødyr bruker lyd for å kommunisere og for å "se" under vannet ved hjelp av lydbølger.

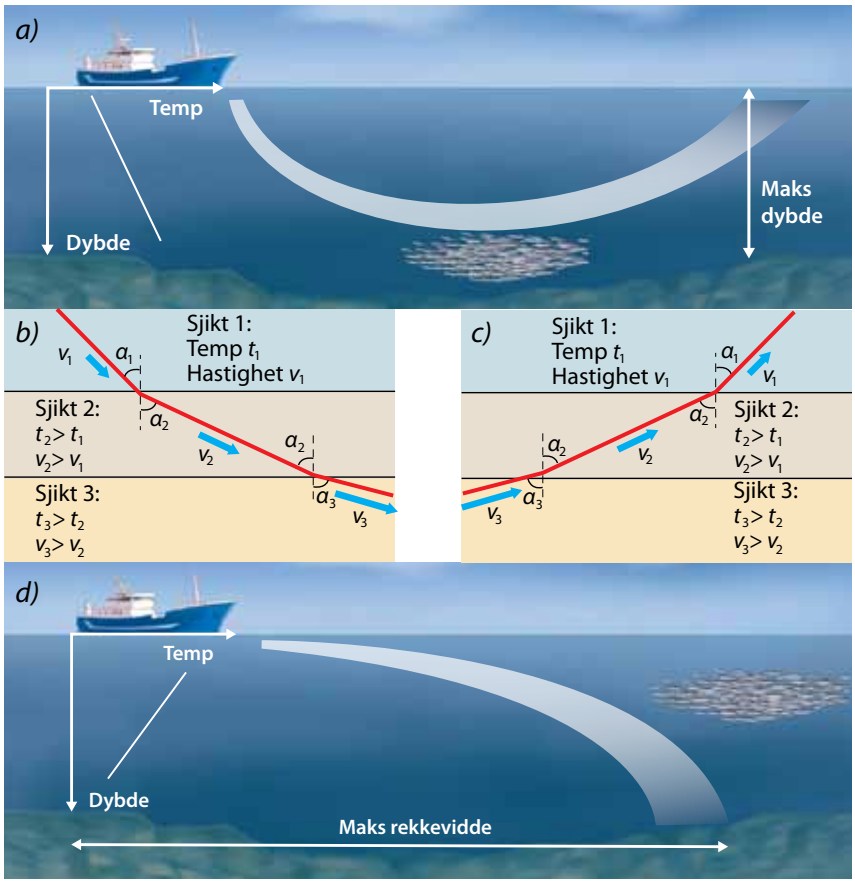
Alle elektromagnetiske bølger (som lys og radiobølger) absorberes raskt i vann. Lyd er derfor viktigere enn elektromagnetiske bølger for å kunne "se" og kommunisere under vann innen all marin aktivitet. Det er derfor viktig å bygge støysvake skip som ikke forstyrrer lydforholdene i havet eller påvirker havets fauna.

Virkningen på akustiske instrumenter, som ble nevnt i forbindelse med termokliner foran, oppstår når lydbølger brytes i vann på grunn av endringer i hastighet.

I figurene a og d nedenfor ser vi hvordan lydstrålen fra en sonar på et fartøy brytes avhengig av om temperaturen øker eller minker med økende dybde. Slike fenomener kan skape problemer for fiskeleting eller for leting etter ubåter. I begge de tilfellene som er vist, vil fartøyet ha vansker med å registrere fiskestimen som er avbildet.



Lydhastighet som funksjon av havdybde når det tas hensyn til både temp.- og trykkforhold



Brytning av lydstråle fra en sonar, avhengig av hvordan havvannets temperatur varierer med dybden.

a. Brytning når temperatur og dermed forplantningshastighet øker med dybden. Dypgangen begrenses.

*b. Fenomenet forklares ved å repetere brytningsloven i fysikken. Når hastigheten øker, brytes strålen **fra** innfallsloddet (α2>α1, α3>α2, osv. til α=90 °)*

*c. Pga. spredning vil strålen etter hvert få retning oppover igjen. Da avtar temperatur og hastighet og strålen brytes **mot** innfallsloddet*

d. Brytning når temperatur og hastighet avtar med dybden. Rekkevidden begrenses.

Havromsovervåking og kartlegging

Ny tenkemåte: Automatisert overvåking og kartlegging

Behov for automatiserte metoder

Både for å forvalte eksisterende norske havressurser og regioner og få oversikt over nye ressurser, vil det være hensiktsmessig å gå over til ny teknologi for overvåking og kartlegging. Dette gjelder både havoverflaten, havrommet og havbunnen. For å få så god romlig oppløsning som mulig, bør målingene skje nær objektene. Disse objektene kan blant annet være:

- organismer (makro og mikro, se sidene 0-19 og 11-10/21)
- petroleumsforekomster (seismiske undersøkelser)
- mineraler
- vrak og andre fortidsminner
- forskjellige bunntyper
- gasslekkasjer ved for eksempel CO_2-deponering)

Satsingen på overvåking og kartlegging er ikke minst viktig i Arktis.

Denne nye tenkemåten kan karakteriseres ved et supplement av dagens konvensjonelle "punktmålinger" fra havgående fartøyer til bruk av fjernstyrte og/eller autonome undervannsroboter som gir detaljerte målinger fra store områder. Dette gir en bedre forståelse av havstrømmer, klimaprosesser, marin biologi, geologi, kjemi og arkeologi. For overvåking og kartlegging av overflaten vil i tillegg bli brukt bemannede skip og fly, droner og satellitter.

Ny tenkemåte samhandling og integrerte operasjoner

Havrommets enorme dimensjoner gjør det nødvendig med ny teknologi ved framtidig utforsking

Mesteparten av havrommet er ikke utforsket, og lange avstander og store dyp gjør det lite tilgjengelig for mennesker. Havet sitter på enorme ressurser og mysterier for forståelse av artsmangfold, miljø og klima. For å kartlegge dette og finne og utvinne ressurser trengs det ny teknologi. Spesielt viktig er undervannsfarkoster som kan kartlegge store havområder og installere infrastruktur for utvinning av ressurser over og under havbunnen.

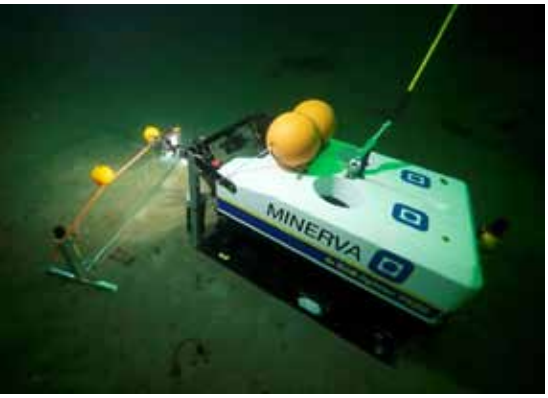
For å kartlegge hele havrommet må farkostene kunne navigere med høy nøyaktighet overalt og på alle dyp. Til dette trengs nye løsninger og sensorer siden GPS-signaler ikke er tilgjengelige under vann. Et posisjoneringssystem som fungerer for hele havrommet hadde gjort arbeidet med overvåking og kartlegging mye enklere.

I dag brukes en rekke typer ubemannede undervannsfarkoster (UUV) med ulike egenskaper. Noen er fjernstyrte og andre er autonome med egen kraftforsyning og intelligente styringssystemer og går helt av seg selv. De viktigste typene og bruksområdene er beskrevet i det følgende.

Glider på tokt

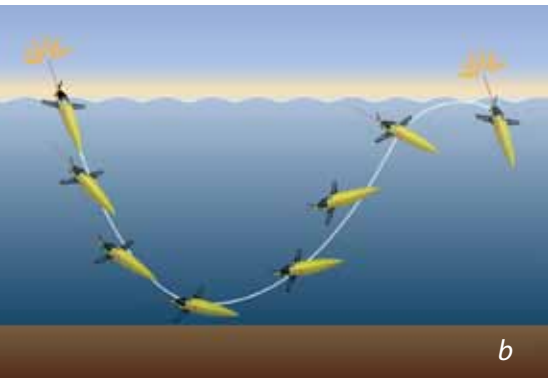
Havromsovervåking og kartlegging

Ubemannede undervannsfarkoster



ROV Minerva (NTNU har i dag flere ROV)

a



b

a. Norskprodusert sjøglider.
Sjøglideren er utviklet og produsert ved Kongsberg Maritime. Flere er innkjøpt av norske bedrifter og forskningsinstitutter. Når du leser dette, er sikkert noen ute på tokt i våre havområder

b. Frilegging av sjøgliderens antenne.
Når glideren er i overflateposisjon, må antennen være frilagt. Gliderens stilling i sjøen forandres da ved at tyngdepunktet flyttes, se neste side.

ROV – Fjernstyrt undervannsfarkost

Styring, energioverføring og kommunikasjon gjennom kabel. En ROV er en fjernstyrt, ubemannet undervannsfarkost (Remotely Operated Vehicle) som får strøm via en kabel fra et skip. ROVen har flere propeller montert slik at den kan gå framover, sidelengs og snu om sin egen akse. Kommunikasjon mellom ROV og piloten om bord på skipet går også via denne kabelen. Video, sonarbilder og andre sensordata blir sendt opp fra ROVen, og piloten styrer den med en joystick. Mange ROVer har manipulatorarmer for å gjøre arbeid under vann. Disse styres av piloten eller en co-pilot. ROVer kan utstyres med mye energikrevende utstyr siden de får strøm fra skipet, og de kan sende opp video og data via en fiber i ROV-kabelen.

ROV brukes til å inspisere og arbeide under vann. Med en sterk og presis manipulator kan den erstatte dykkere i mange arbeidsoperasjoner. ROVen kan også gå mye dypere. Arbeid på flere tusen meters dyp er mulig, og ROVer er helt uunnværlige for installasjoner av utstyr for utvinning av olje og gass på dypt vann. De er derfor, sammen med AUVer, omtalt også i kapittel 10, se side 10-26/27.

AUV – Autonom undervannsfarkost

Samler inn data, men utfører ikke fysiske arbeidsoperasjoner. En AUV (Autonomous Underwater Vehicle) er en autonom, ubemannet undervannsfarkost som får strøm fra et batteri om bord. Med autonom menes at den styrer seg selv. Den drives av en propell bak og styres ved hjelp av finner som på et fly. Kommunikasjon med omverdenen er svært begrenset siden den ikke har forbindelse med et moderskip, som en ROV. Se også side 10-27.

Innsamlede data lagres. En AUV kan motta og sende korte meldinger via akustikk når den er i nærheten av en mottaker, eller den kan gå opp til overflaten og kommunisere via satellitt for overføring av større datamengder. Mesteparten av data som AUVen samler inn, er tilgjengelig etter at den er ferdig med toktet sitt. Uten kabel har den begrenset med energi og kommunikasjonsmuligheter, men den er fri til å bevege seg over store avstander, opptil hundretalls kilometer, begrenset av batterikapasiteten. Siden den drives av batteri, må den være gjerrig med energien sin. Det gjør at AUVer ikke har manipulatorer eller energikrevende instrumenter om bord.

Kan samle inn mange ulike data. Mange ulike brukere og fagfelt har glede og nytte av AUVer. Geologer ønsker å kartlegge havbunnen, arkeologer vil søke etter vrak, biologer ønsker å hente inn prøver fra dypet eller studere planktonblomstringer, og oljeselskaper vil undersøke rørledningene sine. AUVer egner seg godt til disse oppgavene og flere til når den er utstyrt med de rette sensorene.

Tokter planlegges på forhånd, men en AUV kan også forandre planene. Vanligvis har AUVen toktet sitt planlagt på forhånd. Den har fått oppgitt en rute den skal følge og hvilke data som skal samles inn. Men siden det ikke er en pilot som styrer, må den takle uforutsette hendelser selv. For eksempel kan det være et fiskegarn som stenger for den planlagte ruten. Da må AUVen ha sensorer for å oppdage garnet og ha evne til å finne en vei rundt hindringen før den kan fortsette på oppdraget. Dette er en evne som kjennetegner autonome farkoster. De må kunne ta fornuftige veivalg selv, basert på hva de ser rundt seg, akkurat som deg.

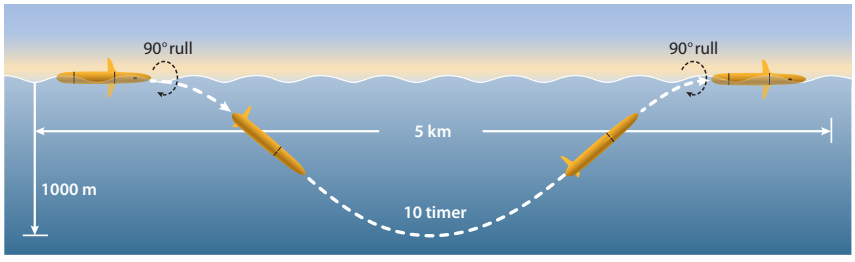
Liten rekkevidde i forhold til avstandene på de store havene. AUVer kommer i ulike størrelser. Små AUVer kan bæres og sjøsettes av en person, og store AUVer veier flere tonn og krever et skip til sjøsetting. Noen går ned til 100 meter, men andre kan gå ned til flere tusen meters dyp. Avhengig av batterikapasitet og forbruk kan AUVer være ute fra noen timer til døgn. AUVer går ganske sakte, 3—5 knop for å spare på energien, slik at rekkevidden maksimeres. Men med dagens batterier er rekkevidden liten i forhold til størrelsen på havet. En AUV kan gå 100-1000 km før batteriet er tomt, mens Atlanterhavet er ca. 4000 km bredt. For å samle inn data over hele hav, kreves ny teknologi. Her er det at de såkalte undervannsglidere kommer inn.

Undervannsglider (sjøglider), figur i venstre marg

Undervannsglidere bruker vinger og variabel oppdrift til framdrift. En glider ligner på en AUV men har vinger i stedet for propell. En typisk glider er omtrent 1,5 m lang, 0,25 m i diameter og veier omtrent 50 kg. Den har ingen bevegelige ytre deler bortsett fra et haleror. Inne i glideren er det ulike sensorer, batterier og et hydraulikksystem som regulerer oppdriften. Den får framdrift ved at oppdriften varierer, slik at glideren enten synker eller stiger. På grunn av vingene vil farkosten da samtidig enten gli skrått nedover i vannet eller stige skrått oppover.

Fortrengt vannvolum for glideren varierer. Systemet som gjør oppdriften variabel, består av en indre beholder og en ytre blære som er fylt med olje. Pumpen kan flytte oljen mellom disse. Når oljen pumpes til den indre beholderen, minker volumet i den ytre blæren. Da får glideren mindre oppdrift og begynner å synke på skrå nedover. Når glideren skal opp, pumpes oljen ut i den ytre blæren igjen, slik at glideren får positiv oppdrift og stiger på skrå oppover. Det er kun volumet av den ytre blæren som påvirker oppdriften og den totale tyngden av glideren er konstant.

Også tyngdepunktets beliggenhet varieres. Batteriene inne i skroget er montert på skinner, slik at de kan flyttes fram og tilbake automatisk for å endre tyngdepunktet til glideren. Dette brukes til å endre angrepsvinkelen til glideren og dermed vingene, noe som igjen påvirker forholdet mellom horisontal og vertikal hastighet. Vanligvis justeres tyngdepunktet slik at glideren kommer lengst mulig framover for hver meter den synker eller stiger.



Gliderens bevegelsesmønster
Når glideren synker eller stiger, går den samtidig framover på grunn av vingene, som den glir på. For hver meter den synker eller stiger, går den ca. 5 m framover. Jo dypere den går, desto lenger framover kommer den per dykk. Glideren er utstyrt med et altimeter som måler avstand til bunnen. Hvis den kommer for nær, vil den gå mot overflaten igjen. Når den er i overflaten, kan den rulle over på siden, slik at antennen til GPS og satellittelefon på vingetuppen får dekning. Da kan den ta imot nye oppdrag samt sende data til land.

Går veldig sakte, og bruker derfor svært lite energi. *Ulempen med glidere er at de går så sakte. For eksempel gir de data som er gitt i figuren nedenfor, en midlere framdriftshastighet på 0,14 m/s i horisontalretningen. En mer typisk verdi kan være 0,25 m/s. Fordi de bruker så lite energi, kan glidere til gjengjeld være svært lenge ute om gangen (opptil 10 måneder) og dermed likevel dekke enorme områder.*

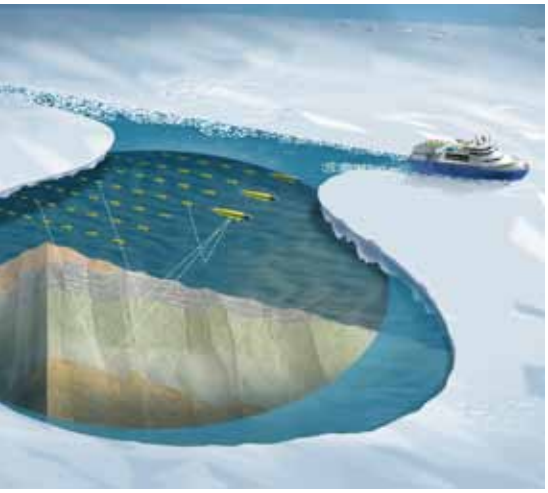
Kan krysse Atlanterhavet
I desember 2009 krysset en glider fra Rutgers University i USA Atlanterhavet fra New Jersey til Balona i Spania. Dette var den første ubemannede farkosten som krysset denne havstrekningen. Tokter i arktiske områder og i Nordatlanteren er eksempel på andre viktige anvendelser.

Kan brukes til automatisk miljøovervåking av store områder. *Ulike sensorer ombord kan for eksempel måle temperaturer, saltinnhold, oksygennivå, morild og estrømhastigheter til å sjekke tilstanden til miljøet i havet. Livet i havet (se side 11-10/18) kan også kartlegges.*

Typisk forhold mellom forflytning og dybde per dykk for en glider. *Kilde: WHOI.*
Forholdet er 5. Dessuten ser vi at denne glideren bruker en annen metode for frilegging av antennen i overflatestilling enn den som er vist på forrrige side.

Havromsovervåking og kartlegging

Undervannsnavigasjon. Dynamisk posisjonering. Datainnsamling



AUV´er vil bli viktige for seismiske undersøkelser under isen.

Posisjonssystemer

Undervannsnavigasjon

GPS – Ubrukbart under vann. Navigasjon på land og i luft er relativt lett med hjelp av GPS og detaljerte kart. Med en GPS mottaker og kartplotter kan du få oppgitt posisjonen din som et Nord-øst-koordinat og få vist dette i et kart. Da kan du få se om du er på en fjelltopp, holme, strand, slette eller annet, uansett hvor du er på kloden. Dette er mulig fordi GPS-signaler er tilgjengelige overalt og hele jordoverflaten allerede er kartlagt. Under vann er det vanskeligere. GPS-signalene trenger ikke ned i vannet, og det finnes ingen andre globale systemer som kan gi posisjoner under vann. Dessuten er mesteparten av havbunnen ikke kartlagt. Så selv om du hadde fått Nord-øst-posisjonen din, ville du ikke visst hva som var rundt deg.

Hydroakustiske posisjoneringssystemer. I dag brukes hydroakustiske posisjoneringssystemer for å finne posisjonen til undervannsfarkoster. Kort fortalt består et slikt system av sendere og mottakere av lydsignaler. En mulighet er at undervannsfarkoster posisjonerer seg relativt til et overflatefartøy som har sender og mottaker. En annen mulighet er at minst tre sendere/mottakere må være plassert på havbunnen med kjente posisjoner. En sender/mottaker monteres på undervannsfarkosten. Når denne kjører rundt, sender den ut lydsignaler som går i alle retninger med lydens hastighet i vann. Når et slikt signal mottas av de andre, faste sender/mottakere, gir de svar ved å sende ut et nytt lydsignal. Disse svarene mottas så av sender/mottakeren på farkosten. Posisjonen til farkosten kan så regnes ut, basert på tiden det tok å få svar fra hver av de faste sender/mottakerne. Denne måten å regne ut posisjon på, kalles trilatering. Det finnes flere varianter av akustiske posisjoneringsteknikker, men felles er at de har begrenset rekkevidde og oppdateringsfrekvens som følge av lydhastigheten i vann.

Siden det er vanskelig å få nøyaktige og hyppige posisjonsmålinger under vann, kreves flere sensorer for å finne posisjonen. De viktigste sensorene i bruk i navigasjonssystemer er kompass, trykkmåler og hastighetsmåler, se nedenfor.

Kompass. Kompasset gir retningen på undervannsfarkosten. Et magnetisk kompass viser retningen i farkosten i forhold til magnetisk nord. **Trykkmåler.** Når trykket er kjent, kan man regne ut hvilket dyp man er på når tettheten til vann og tyngdens akselerasjon også er kjent. **Hastighetsmåler.** For å måle hastigheten til en undervannsfarkost brukes en "Doppler Velocity Log" (DVL). Denne kan måle hastighet relativt til bunnen eller vannet. Målingene fra navigasjonssensorene kan kombineres med ulike metoder for å forbedre resultatene.

Datainnsamling

I tillegg til navigasjonsinstrumentene kan ubemannede undervannsfarkoster utstyres med en rekke sensorer ut fra hvilke typer data som skal samles inn. For de fleste brukere av ROV og AUV er ikke farkosten i seg selv så interessant, det er hvilke data den kan samle inn som er viktig eller hva dataene betyr for brukeren.

Sensorene tilpasses datainnsamlingen. Man kan tenke på undervannsfarkostene som plattformen for annen teknologi. Undervannsfarkosten tar med seg de påmonterte sensorene og gjør målinger der det er interessant for datasamleren. For geologen er det sonardataene som er viktige hvis han skal lage et kart. En arkeolog er ute etter bilder fra et vraksted, og en biolog vil kanskje vite hva som finnes av organismer i overflaten, vannkolonnen og på havbunnen. Eieren av olje- og gassledningen som ble inspisert, vil vite om den må repareres eller ikke.

Dynamisk posisjonering. Automatisk styring

Automatiserte kontrollfunksjoner i ROVere er viktig. Når en ROV styres av en pilot med joystick, må han hele tiden bruke joysticken aktivt for å få ROVen dit han vil, eller for å holde en fast posisjon. Et øyeblikks uoppmerksomhet kan være nok til at farkosten kommer ut av den ønskede posisjonen. Mange arbeidsoppgaver bør derfor automatiseres slik at ROVen kan holde en ønsket posisjon over lengre tid eller følge en planlagt rute med høy nøyaktighet. Dette er det et kontrollsystem som sørger for.

Operasjonssentral for ROV

Når undervannsfarkosten kan styre seg selv i større grad, kan piloten heller bruke kreftene på å planlegge oppdraget og analysere data som kommer inn.

Dynamisk posisjonering. Den enkleste, automatiserte kontrollfunksjonen kalles for automatisk dybde. Da sørger undervannsfarkosten selv for å ligge på den ønskede dybden ved å regne ut hastigheten på de vertikale propellene som kreves for å holde dybden. Hvis den målte dybden er større enn den ønskede dybden, vil kontrollsystemet få propellene til å bevege ROVen oppover. Og omvendt hvis ROVen kommer for grunt. Når dette utvides til å holde retning og nord—øst-posisjon automatisk, kalles det for dynamisk posisjonering (DP).

Tracking. Utregning av propellpådrag basert på sammenligning mellom målt og ønsket posisjon, kalles for feedback og er et svært viktig prinsipp ved posisjonskontroll av farkoster. Dette er også aktuelle metoder for overflatefartøyer, se sidene 8-8/9/10. I tillegg til DP kan undervannsfarkoster følge en planlagt rute automatisk, dette kalles for tracking. Dette er selvsagt også brukt for overflatefartøyer, se side 8-16.

Når farkosten selv kan finne en passende rute, basert på hva den ser rundt seg, sier vi at den kjører *autonomt*.

Oppgaver

Oppgave 1.1
Se side 1-2, hvor det framgår at volumet av havvannet er mer enn 10 ganger volumet av de land / fjellområder som ligger over havoverflaten.
a) Beregn en nøyaktigere verdi for dette forholdet. Bruk data oppgitt på side 1-2.
b) Beregn forholdet mellom volumet av havvannet og volumet av land / fjellområdene når vi bruker midlere havdybde i grunnflaten for det sistnevnte volumet.
c) Lag en skjematisk figur av profilen mellom jordas høyeste fjell og dypeste havbunn

Oppgave 1.2
En bølge har spesifikasjoner som gitt på side 1-24. Bølgeprofil er vist i en startposisjon (t = 0 ved x = 0). Et bølgekraftverk ligger så langt fra bølgens startposisjon at et karakteristisk punkt i kraftverket ligger 475 m fra startpunktet.
a) Hva må du sette inn for x og t hvis du skal bruke ligningen

$$A=A_o \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t)$$

til å bestemme bølgens amplitude i det nevnte punktet 34 s etter at den forlot startpunktet? Hvor stor er amplituden da?

Oppgave 1.3
Et sportsfly skal fly fra et sted med breddegrad 60° og til en flyplass som ligger 200 km rett østover. Flyets hastighet er 300 km/h, og kursen korrigeres ikke underveis.
a) Beregn Coriolisakselerasjonen som flyet utsettes for under turen. Vi regner med at denne er like stor ved ankomst som ved start
b) Hvor stort kursavvik (i km) har flyet fått når det kommer fram? Ligger ankomstpunktet syd eller nord for målet?

Oppgave 1.4
Vi ser på en bølge med bølgelengde L=50 m og bølgehøyde H =1, 0 m, som beveger seg på dypt vann under rolige væreforhold. Beregn:
a) bølgehastighet, periode og frekvens
b) energiinnhold per flateenhet
c) effektoverføring per meter bredde for et bølgetog (bruk gruppehastighet)

Oppgave 1.5
Det vises til side 1-21, nederst. Bruk ligninger for sammenhengen mellom bølgefart og bølgelengde og ligning for effektoverføring per m bredde i et bølgetog til å bestemme bølgehøyde når overført effekt er 50 kW per m bølgebredde. Sett T = 9 s for bølgen.

Oppgave 1.6
En bølge, dannet under storm, har en bølgelengde L = 320 m. En gruppe av slike bølger overfører en effekt lik 2000 kW/m. Beregn:
a) bølgehastigheten og bølgehøyden
b) energiinnholdet per flateenhet

Oppgave 1.7
Vi skal se nærmere på tsunamien som ble beregnet i eksemplet på side 1-29. Data for tsunamien var T = 40 min og H = 1 m på et havdyp 4000 m. Vi beregnet at dette svarte til L = 475 km og v_b = 713 km/h på åpent hav og L = 18,4 km og v_b = 27,6 km/h ved en strand med dybde 6 m. For å kunne beregne bølgehøyden på denne dybden, antar vi tilnærmet at den effekt som overføres med tsunamien er konstant under forplantningen. Dermed kan vi bruke det uttrykket for P/B som er gitt på side 1-23.
a) Beregn den bølgehøyde som tsunamien får ved en vanndybde på 6 m
b) Vil tsunamien ha begynt å bryte?

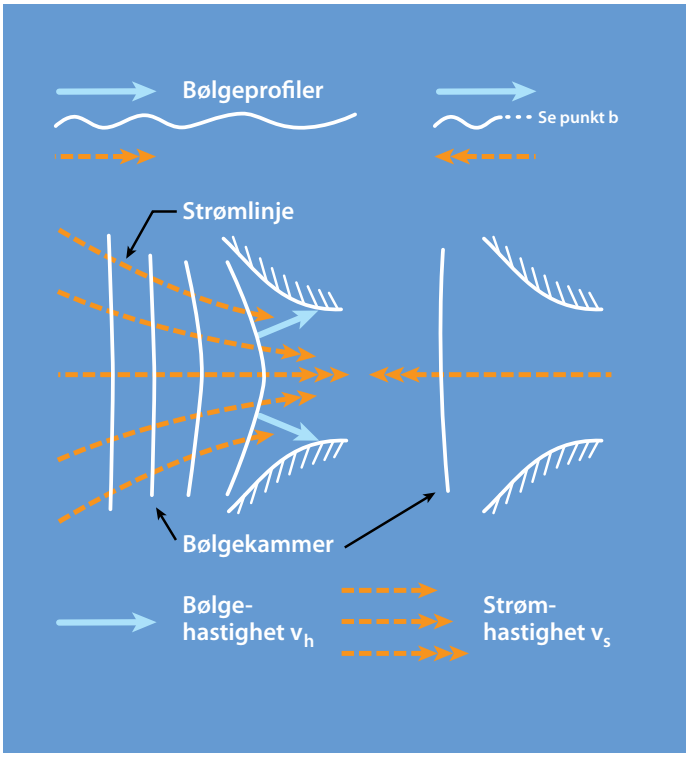
Oppgave 1.8
En dønning med bølgehøyde 2,0 m og bølgelengde 100 m kommere fra dypt hav mot en strand. Beregn:
a) På dypt vann: Bølgefart og overført effekt per meter for en enkeltbølge.
b) Bølgehastighet i området med 4 m dybde

Oppgave 1.9
Det vises til figur nederst på side 1-18.
a) Beregn banehastigheten for partikler som beveger seg i de øverste sirklene for den bølgen som er beskrevet i oppgave 1.4
b) Hvor stor er banehastigheten i % av bølgehastigheten

Oppgave 1.10
Det vises til avmerket område C-D i Norskehavet på kartet på side 1-14.
a) Beregn geostrofisk vindhastighet som i eksemplet på side 1-14
b) Hvor stor var vindhastigheten utenfor Mørekysten denne dagen ifølge prognosekartet? Hvilken retning hadde vinden?
c) Noen ganger oppgis lufttrykk i enheten millibar (mbar) i stedet for hPa. Vis at disse to enhetene er like store.

Oppgave 1.11
Tegn opp på rutepapir et bølgetog med tre sinusbølger med bølgehøyde 2 cm og bølgelengde 4 cm. Begynn med bunnen av en bølgedal. Tegn under denne en ny bølge med bølgehøyde 2 cm og bølgelengde 12 cm. Begynn også denne med bunnen av en bølgedal.
a) Bestem bølgemønsteret som framkommer når disse to bølgene summeres (blandet interferens). Bruk herunder en tredje tidsakse.

Oppgave 1.12
Vi skal se litt på vekselvirkning mellom bølger og strøm ved inngangen til en fjord. I den venstre del av figuren går strømmen inn i fjorden og bølgene forplanter seg også innover (medstrøm). Bølgelengden vil da komme til å øke, samtidig som bølgehøyden avtar og bølgenes retning forandres som figuren viser. I høyre del av figuren går strømmen utover (motstrøm).
a) I figuren til høyre er skissert en strømlinje og en bølgekam. Fullfør figuren ved å skissere beliggenhet og kurveform for ytterligere 4 strømlinjer og 3 bølgekammer. Vis også retninger av forplantningshastighetene.
b) Skisser hvordan bølgeprofilen forandrer seg innover i fjorder når det er motstrøm



Oppgave 1.13 (integralregning)
Vis ved hjelp av integralregning og kommentarer på side 1-22 at den potensielle energien per m^2 av en bølge kan skrives som det framgår på denne siden.

Referanser

1.1 Petter Callin, Jan Pålsgård, Rune Stadsnes, Cathrine Wahlstrøm Tellefsen:
Ergo, Fysikk 1 og 2.
H.Aschehoug & Co. 2007

1.2 Per Jerstad, Bjørn Sletbak, Arne Auen Grimenes, Reidun Renstrøm:
Rom Stoff Tid, Fysikk 1 og 2.
J. W. Cappelens Forlag AS. 2007

1.3 Godfrey Boyle:
Renewable Energy. Second Edition.
Oxford University Press in Association with The Open University. 2004

1.4 Bjørnar Pettersen:
Marin Teknikk 3, Hydrodynamikk. Kompendium i fag TMR4247.
Institutt for marin teknikk, NTNU. 2007

1.5 Fridtjov Irgens:
Dynamikk. 4.utgave.
Tapir forlag. Trondheim. 1999

1.6 Black Holes in Deep Ocean Space.
Greenpeace, 2008

1.7 Leo H. Holtuijsen:
Waves in Oceanic and coastal Waters.
Delft University of Technology and UNESCO-IHECambridge University Press. XXXX

1.8 Wikipedia, the free encyclopedia

1.9 Pål Furset Lader:
Geometry and Kinematics of Breaking Waves.
Doktor ingeniør (Ph.D) avhandling ved NTNU. 2002

1.10 Dag Myrhaug:
Oceanography. Wind and waves.
Kompendium i fag TMR4230 ved Instutt for marin teknikk, NTNU. 2006

1.11 The Tasa Collection Shorelines.
Macmillan Publishing, New York (Tasa Graphic Arts)

1-12 Harold V. Thurman, Elizabeth A. Burton:
Introductory Oceanography.
Ninth Edition Prentice Hall. 2001

1-13 Dag Myrhaug:
Oceanography. Current.
Kompendium i fag TMR4230 ved Institutt for marin teknikk, NTNU. 2012

1-14 Bjørn Gjevik:
Flo of fjære 2009. Farleia forlag

Forfatter: Håvard Holm

Oppdrift og stabilitet

Havromsteknologi

Innhold

Innledning....2
Skipets hoveddimensjoner....4
Linjetegninger....6
Grunnlag fra fysikk....8
Tyngdepunkt og oppdriftssenter....10
Tverrskipsstabilitet....12
Grunnlag for beregning av metasenterhøyde....14
Beregning av metasenterhøyde for skip....16
Stabilitet ved store krengevinkler....18
Effekt av fri overflate....20
Oppgaver....21

NTNU
Institutt for marin teknikk

2

Krigsskipet Vasa, skrekkeksempel på skip med altfor dårlig stabilitet.

God stabilitet er like viktig for et skip som oppdrift.
I tidens løp har det forekommet en rekke katastrofer med skip som var designet med for dårlig stabilitet eller som fikk stabiliteten ødelagt, for eksempel ved inntrenging av vann på dekk eller forskyvning av lasten.

Det svenske krigsskipet Vasa er kanskje det mest beryktede eksempelet på et skip som har blitt laget med for dårlig stabilitet. Det ble sjøsatt i Stockholm i 1628. Med en gang vinden tok tak i seilene, begynte skipet å krenge og ta inn vann gjennom de laveste kanonportene. Det kom seg ikke engang ut av havnen før det sank, med en sjokkert kong Gustav II Adolf og bybefolkningen som tilskuere på land. Hovedårsaken var at skipet hadde blitt utstyrt med for mange og tunge kanoner. Dermed ble tyngdepunktet liggende for høyt i forhold til det såkalte metasenteret som vi skal lære mer om senere.

På den tiden fantes det ennå ikke noe vitenskapelig grunnlag for å beregne stabiliteten slik som beskrevet i dette kapitlet. Skipet Vasa har i dag eget museum i Stockholm.

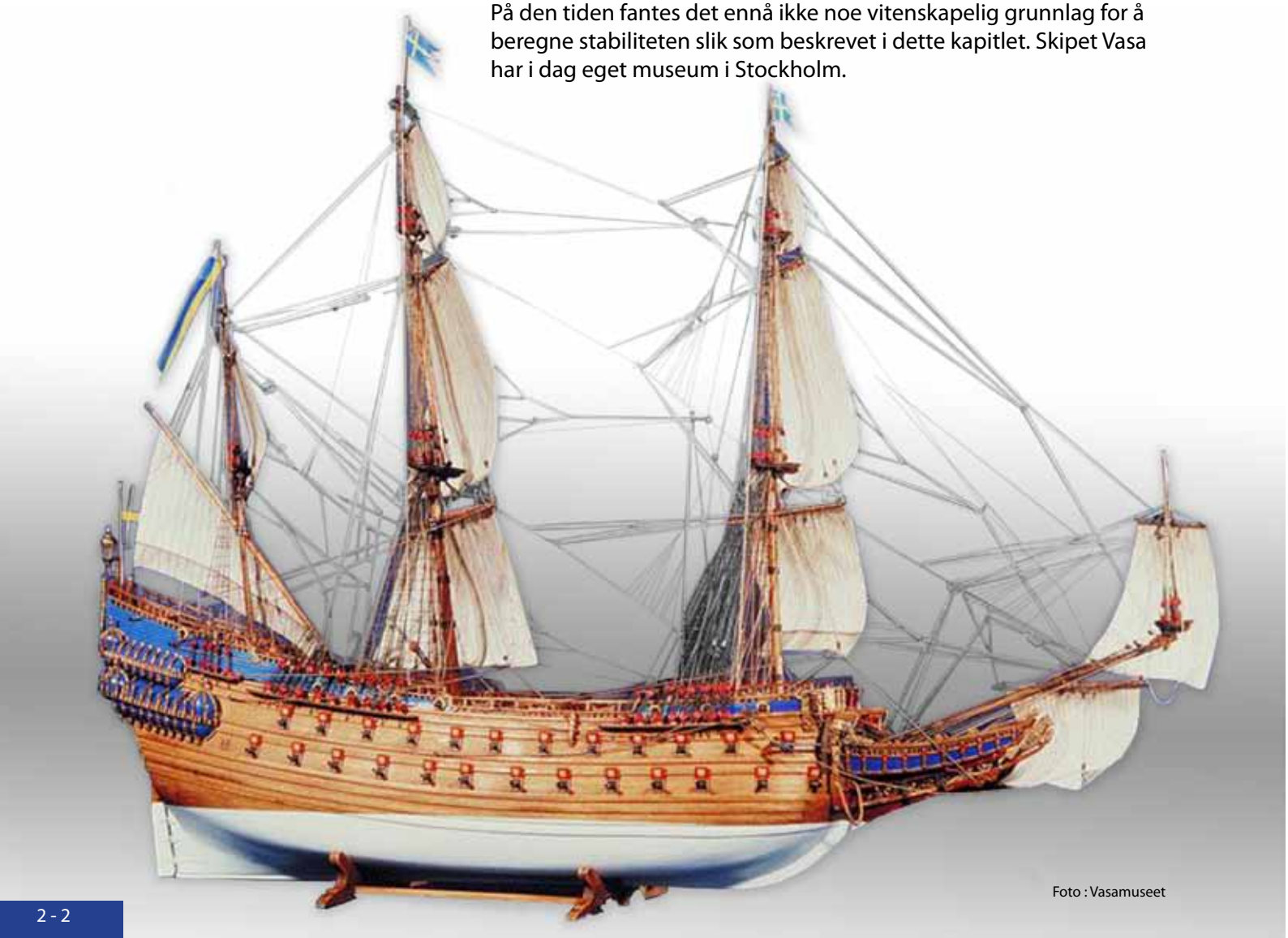


Foto : Vasamuseet

Oppdrift og stabilitet

Hvert år kantrer mange skip langs norskekysten. Vi skal nå lære om oppdrift og stabilitet for skip. Dette er noe av det viktigste man må ha kontroll over når man skal designe skip. Skip kan kantre og dermed føre til tap av både liv og verdier. Eksempler på tragiske hendelser på grunn av dårlig stabilitet finnes det utrolig mange av.

Den siste store ulykken er kanskje skipet Rocknes, som kantret innaskjærs i nærheten av Bergen i 2004. Et av problemene i dette tilfellet var at lasten ikke var jevnet ut, slik at den forskjøv seg da skipet støtte på en grunne og krenget.

I 1994 hadde M/S Estonia problemer med baugporten i Østersjøen. Vann kom inn på bildekket, skipet fikk 30—40° slagside og sank etter en drøy halvtime.

Årlig kantrer mellom fem og ti skip langs norskekysten.

Et skips bevegelse er meget komplisert når det utsettes for bølger og vind. Vi skal her begrense oss til å studere rulling siden denne bevegelsen er mest kritisk for kantring. Rulling definerer vi som rotasjon om en langsgående akse i senter av skipet. Med stabilitet mener vi den evnen skipet har til å rette seg opp igjen etter en slik rulling eller krengebevegelse. Stabilitet kan også defineres som den motstand skipet yter mot rulling eller krengebevegelse.

MÅL

Etter å ha studert dette kapitlet skal du:

- ha en oversikt over sentrale begreper for å beskrive skroget til et skip
- forstå en linjetegning
- beherske grunnleggende hydrostatikk
- forklare betydningen av metasenter
- forklare hva som skjer ved store krengevinkler
- vite hva som skjer dersom vi får vann på dekk
- forklare betydningen av tyngdepunktets beliggenhet på et skip

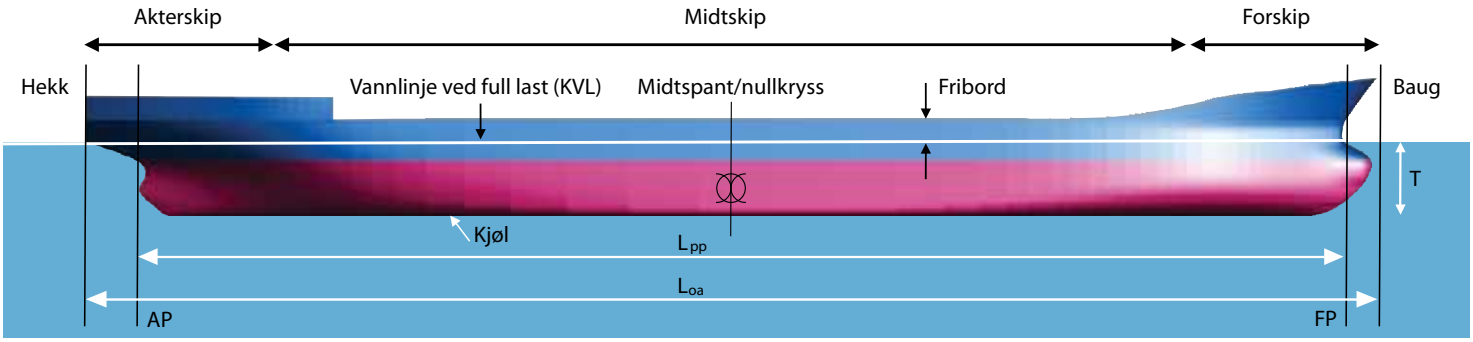
Undringsoppgave:

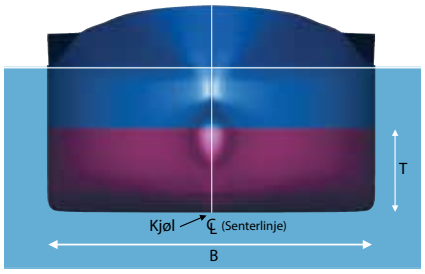
Nedenfor er gitt tre forskjellige måter for å beskrive at et skip har god stabilitet. Alle er riktige, men hvilken synes du er best pedagogisk sett ?

- Stor evne til å rette seg opp igjen etter krenging
- Stor evne til å motsette seg krengebevegelse
- Stor treghet overfor en krengebevegelse

Skipets hoveddimensjoner

Et skip kan ha mange former. For å kunne regne stabilitet ol. er det nødvendig med størrelser som representerer skipets form.





Skipet sett forfra

Viktige størrelser, begreper og symboler :

L_{oa} – Lengde overalt, angir skipets totale lengde
L_{pp} – Lengde mellom perpendikulærene
KVL – Konstruksjonsvannlinjen, vannlinjen ved full last
AP – Aktre perpendikulær, vertikal linje gjennom rorstammens senterlinje
FP – Forre perpendikulær, vertikal linje gjennom KVLs forreste punkt. Midtspantet – midt mellom FP og AP, kalles også nullkryss
B – Største bredde
T – Dypgang, kan også betegnes som D
LCB = Langskips plassering av oppdriftspunkt målt fra AP
LCG = Langskips plassering av tyngdepunkt målt fra AP
VCG = Vertikal plassering av tyngdepunkt målt fra kjølen (punkt K)
∇ = Volumdeplasement [m^3], volum av fortrengt væskemengde
$\triangle$ = Vektdeplasement [tonn], skipets vekt (masse) bør helst kalles massedeplasement
Wls = Lettskipsvekt [tonn], vekten (massen) av skipet uten last av noen art
Dwt = Dødvekt [tonn], skipets maksimale lasteevne

Forholdstall som har betydning for motstand og sjøegenskaper og ofte inngår i beregninger av for eksempel motstand.:
Blokkoeffisient = $C_b = \nabla / (L_{pp} \cdot B \cdot T)$
Slankhet = L_{pp}/B

I denne boka bruker vi ordet tyngde når vi tenker på en kraft (N), og vekt når vi tenker på en masse (kg og tonn) Ordet vekt brukes i stedet for masse fordi det er fullstendig innarbeidet i skipsterminologien fra gammelt av og dermed er vanskelig å forandre

Eksempler på berømte norskbygde skip med god stabilitet og gode sjøegenskaper

Gokstadskipet. Vikingeskipene hadde en forbausende god sjødyktighet. De var lette og elastiske, kunne både seiles og ros med stor fart og gjorde i sin tid Norge til en stormakt på sjøen i store deler av Europa. Hoveddimensjoner: L_{oa} = 23,8 m, B = 5,2 m, T = 0,85 m, fribord = 1,1 m, Wls = 20,2 tonn, hastighet = 12 knop.

Seilskuten Colin Archer (1893) var opprinnelig bygd som ei skute for Redningsselskapet, designet av nordmannen Colin Archer. Mange regner dette som en av de beste seilbåtdesignene som noen gang er laget. Dette på bakgrunn av stabilitet, sjødyktighet, manøvrerbarhet og toleranse for vann på dekk. Særlig var stabiliteten suveren. Hoveddimensjoner: L_{oa} = 13,95 m, B = 4,66 m, T = 2,25 m.

Hurtigruteskipet MS Richard With
Hurtigruten Bergen–Kirkenes–Bergen er enestående også i internasjonal sammenheng. Til sammen 11 skip seiler rundturer og bruker litt mer enn 5 døgn hver vei. Hver dag, hele året og i all slags vær, er disse skipene enten på vei oppover eller nedover langs Norges værdharde kyst med gods og passasjerer. Hoveddimensjoner for det viste skipet (oppkalt etter rutens grunnlegger): L_{oa} 121,3 m, B = 19,2 m, T = 4,7 m, Dwt = 930 tonn, hastighet = 18 knop.

Undringsoppgave:

Bestem slankheten for de tre skipene ovenfor (sett Lpp = Loa). Hva slags betydning tror du slankheten har for et skips stabilitet og for dets motstand mot framdrift?

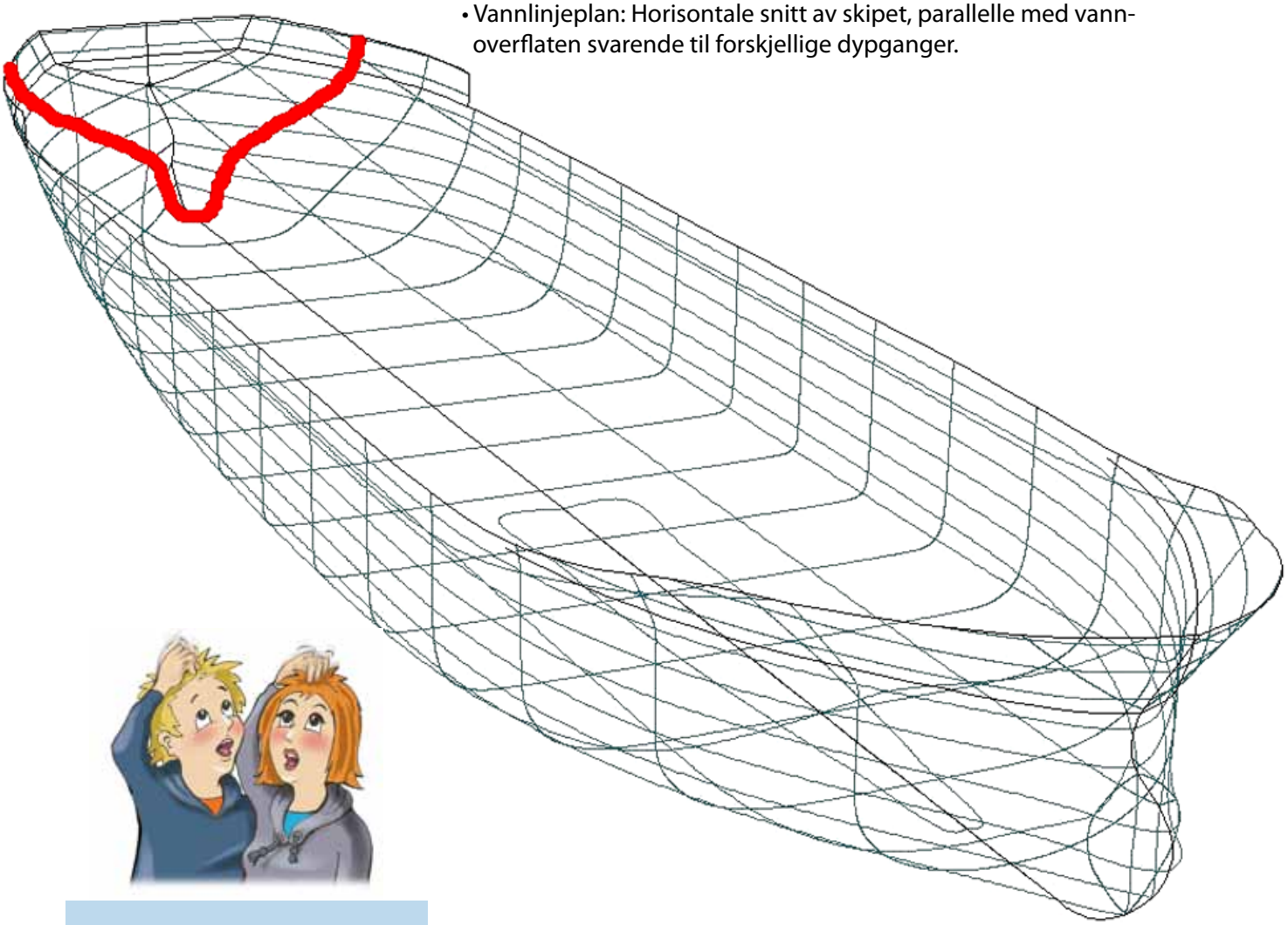
Linjetegninger

Skipet som er avbildet her og på neste side, finner du igjen i programpakken "Freeship". Her er skipet kalt "FREE! ship demo 5".

Skipskonstruktører benytter mange slags tegninger for å beskrive skipet. De viktigste er linjetegninger, arrangementstegninger, skrogtegninger og systemtegninger.

Vi skal konsentrere oss om linjetegningene. Den beskriver skrogets form, som er avgjørende for stabiliteten. Linjetegningene består av:

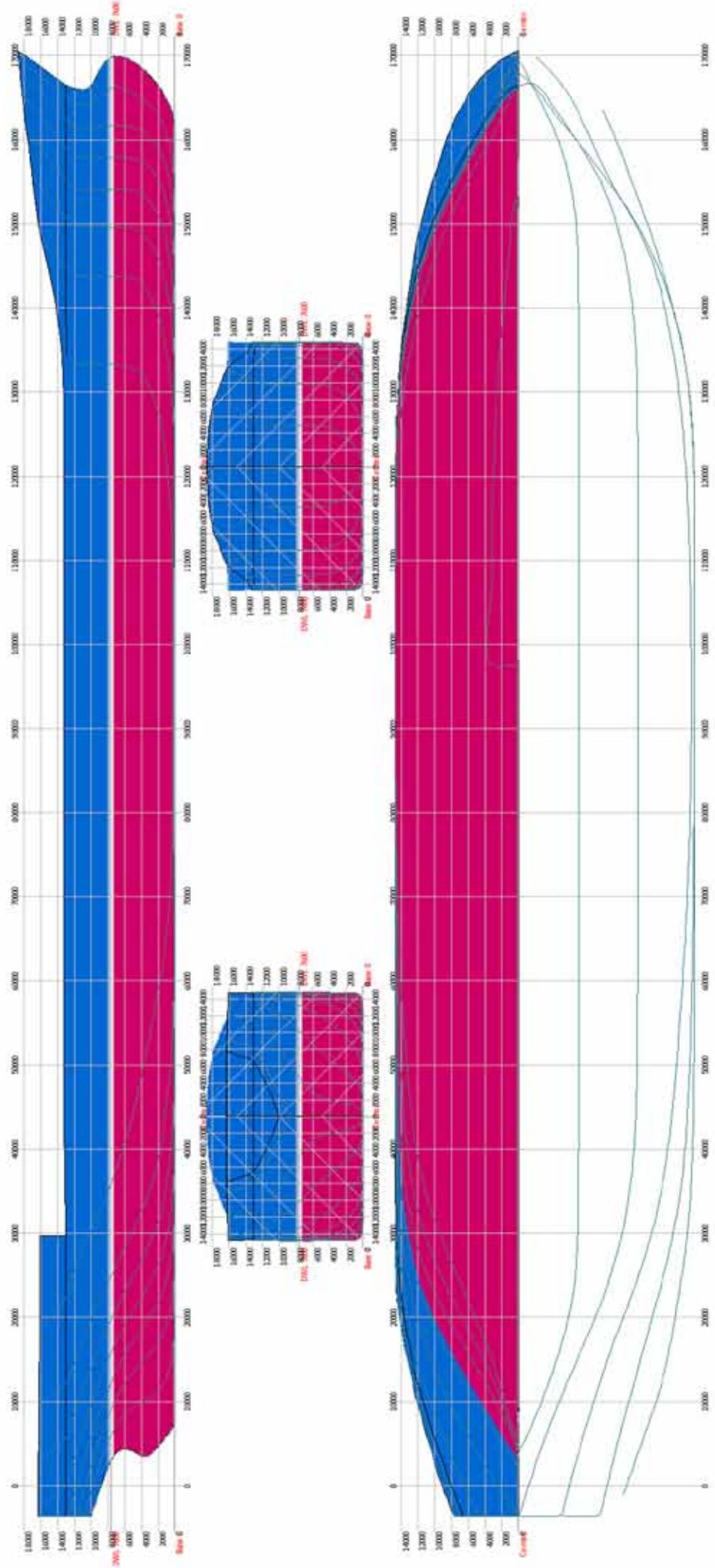
- Profil (også kalt oppriss) : Lengdesnitt av skipet sett fra siden (baugen mot høyre)
- Spanteriss: Tverrsnitt av skipet sett bakfra og forfra
- Vannlinjeplan: Horisontale snitt av skipet, parallelle med vannoverflaten svarende til forskjellige dypganger.



Undringsoppgave:

I perspektivtegningen over er det tegnet inn et spant. Kan du finne igjen samme spant i linjetegningene ? Marker hvordan spantet vises i disse.

Figuren på neste side er hentet fra programmet "Freeship". De grønne/blå linjene er selve linjetegningen. De grå strekene er hjelpelinjer. Det er satt på noen tall for å vise posisjoner. Disse er vanligvis oppgitt i millimeter på tegninger. Perspektivtegning av det samme skipet er vist under.



Grunnlag fra fysikk. Hydrostatikk

Hydrostatisk trykk

Hydrostatikk er læren om trykk i stillestående væske

Trykk er definert som :

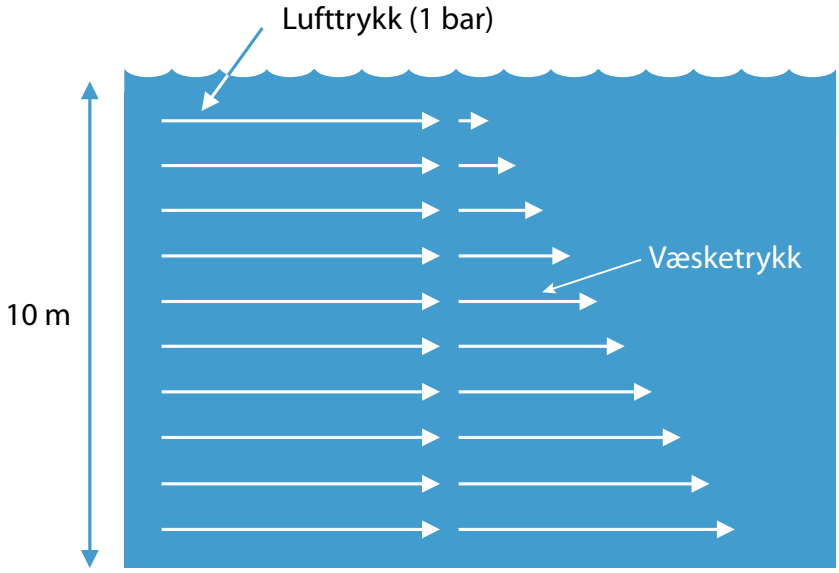
Trykk = p = kraft/areal [Pa = Pascal = N/m^2]

Trykk i vann øker med dybden etter følgende formel :

$$p = p_o + \rho \cdot g \cdot h$$

ρ = tetthet = 1025 [kg/m^3] for sjøvann, 1000 [kg/m^3] for ferskvann
g = tyngdens akselerasjon = 9.81 [m/s^2]
h = dybden [m]
p_o = lufttrykket [Pa] (ofte setter vi dette lik 1 bar = 10^5 Pa = 100 kPa)

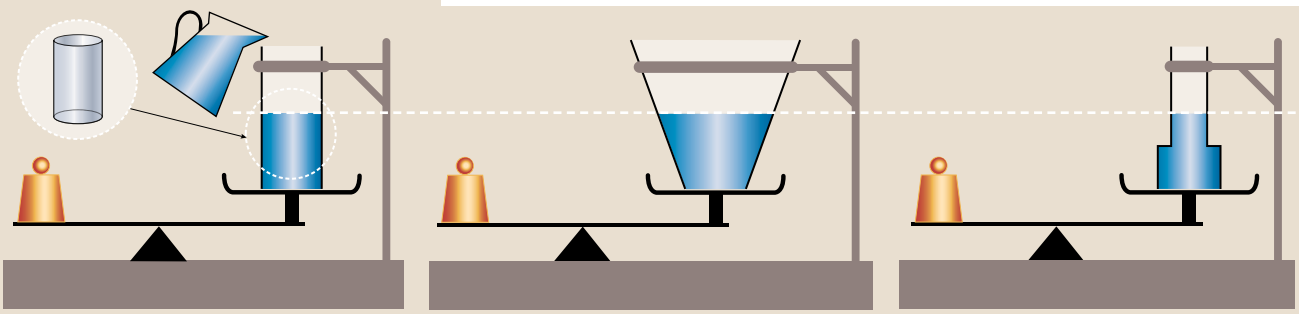
Trykket i en væske vil altså være likt uavhengig av posisjon så lenge høyden er den samme. Dette forutsetter at væsken er i ro, og kalles Pascals lov.



Væsketrykk øker med dybden. *På 10 m dybde er trykket økt fra 1 bar ved overflaten, til 2 bar.*

Undringsoppgave:

På figuren nederst sørger loddet for at skålen blir presset opp og tetter. Alle de tre "glassrørene" har samme åpningsdiameter nederst. Vann begynner å lekke ut ved en viss vannstand. Vil denne vannstanden være forskjellig for de tre tilfellene? Begrunn svaret.



Arkimedes lov

Oppdriften av et legeme i vann er lik tyngden av det fortrengte vannet.

Oppdriften er altså en kraft. Den angriper i oppdriftssenteret (se side 10).

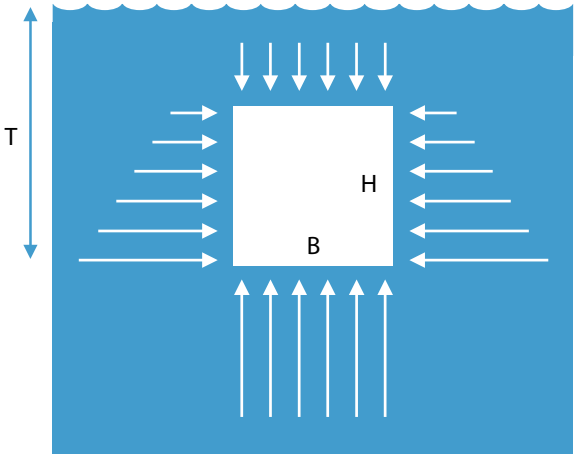
Et skip som sjøsettes, vil derfor synke nedover helt til tyngden av det fortrengte vannet er lik tyngden av skipet.

Vi ser på en isoporbit som er holdt under vann.
Målene på isoporstykket er : Lengde L, bredde B og dypgående T.
Vi ser på et tverrsnitt av isoporbiten.

Trykk på undersiden : $p_0 + \rho \cdot g \cdot h$
Trykk på oversiden : $p_0 + \rho \cdot g \cdot (T-H)$

Kraft på undersiden : $F_u = B \cdot L \cdot (p_0 + \rho \cdot g \cdot T)$
Kraft på oversiden : $F_o = B \cdot L \cdot (p_0 + \rho \cdot g \cdot (T-H))$
Netto kraft oppover : $F_{oppdrift:}\ F_u - F_o = B \cdot L \cdot H \cdot \rho \cdot g$

$B \cdot L \cdot H$ er volumet av fortrengt masse. Når vi multipliserer med $\rho \cdot g$, får vi oppdriften, som nettopp er det Arkimedes lov uttrykker.



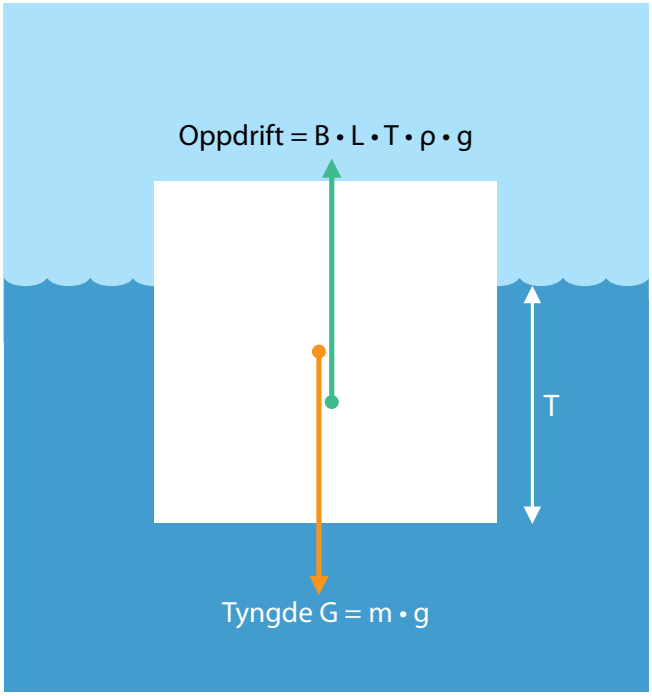
Trykk på et legeme som holdes under vann

For et legeme som flyter med dypgang T, gjelder:

Oppdrift = tyngde
$B \cdot L \cdot T \cdot \rho \cdot g = m \cdot g$

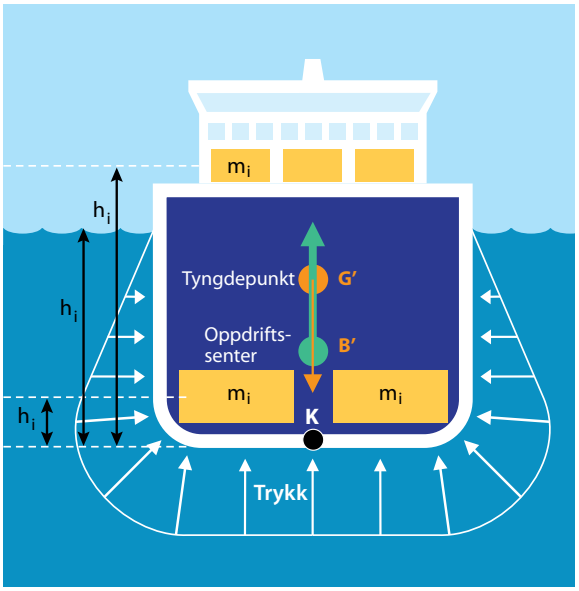
og

$\nabla \cdot \rho = \triangle$
Volumdeplasement • tetthet
= vektdeplasement (massedeplasement).



Arkimedes lov:
Tyngde og oppdrift balanserer

Tyngdepunkt og oppdriftssenter



Trykket summeres opp til en kraft (oppdrift) som angriper i oppdriftssenteret, B' .

Plassering av tyngdepunktet og oppdriftssenteret er av stor betydning for skipets stabilitet.

Bestemmelse av tyngdepunktet

Tyngdepunkt (G') = det punkt hvor vi kan samle hele skipets tyngde og samtidig opprettholde dets egenskaper = massesenter
Oppdriftssenter (B') = det punkt hvor vi kan samle hele skipets oppdrift og samtidig opprettholde skipets egenskaper = volumsenter av skrog under vann

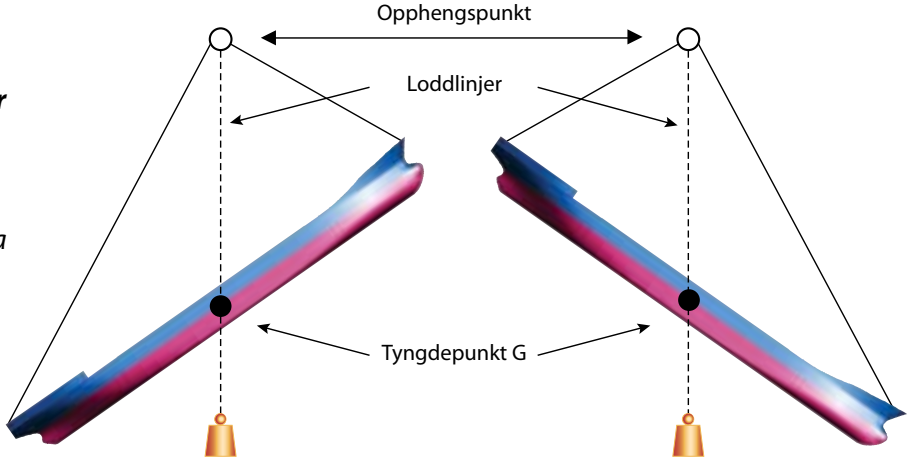
Vi ser først på hvordan vi kan beregne hvor høyt tyngdepunktet G' blir liggende i et skip, uttrykt ved hjelp av avstanden KG', se figur. Siden tyngde alltid kan uttrykkes som masse multiplisert med tyngdeakselerasjon, kan vi like gjerne regne direkte med masser som med tyngder. Vi deler derfor skipets masser opp i hensiktsmessige delmasser (m_i) og finner hvor høyt hver delmasse ligger, uttrykt som avstand langs den vertikale linjen gjennom punktet K (h_i). Da kan massesenterets høydebeliggenhet i skipet (KG') beregnes av:

$$KG' \cdot \sum(m_i) = \sum(h_i \cdot m_i)$$

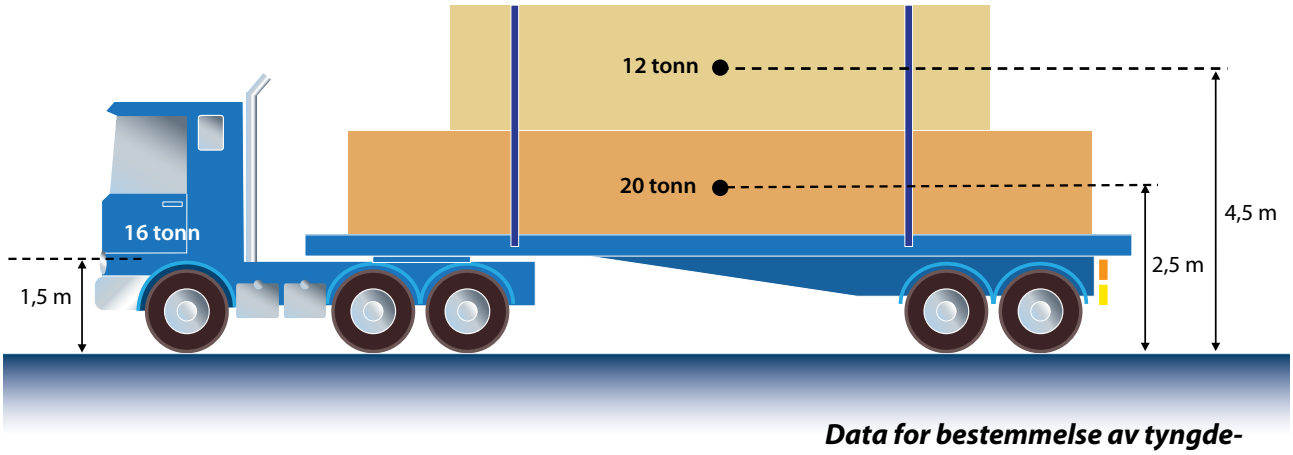
Likningen over kan enkelt utledes ved å tenke seg skipet dreid 90° om momentaksen (horisontal, langsgående akse gjennom K) og se på de momenter som tyngden av de enkelte delmomenter gir om denne aksen. Moment blir definert som på side 12.

Beliggenheten av tyngdepunktet for nye skip forlanges alltid bestemt ved hjelp av såkalt krengeprøve. Se oppgave 2.24.

Det kan også være aktuelt å bestemme beliggenheten av et tyngdepunkt eksperimentelt, se figur. Dersom vi henger opp en modell av et skip i snorer som vist, vil tyngdepunktet alltid ligge rett under opphengspunktet. Ellers ville vi fått et moment som rettet opp modellen. Dermed kan vi bruke skjæringspunktet mellom loddlinjene til å finne hvor tyngdepunktet ligger.



Bestemmelse av tyngdepunkt for en skipsmodell
Modellen henges opp i to skråstillinger som vist på figuren. Ved hjelp av lodd og inntegning av loddsnora på modellens sideflate i begge situasjonene, vil tyngdepunktets beliggenhet framkomme som et kryss.



Data for bestemmelse av tyngdepunktets beliggenhet for lastebil

Eksempler

Eksempel 2.1. Beregning av tyngdepunkt/massesenter

Tore Tøff kjører lastebilen sin inn på et fergedekk. Vi skal finne hvor høyt lastebilens massesenter ligger over dekket. Vi kaller denne avstanden DG'. Vi benytter tyngdepunktsatsen, som vist på forrige side :

$DG' = \sum(hi \cdot m_i) / \sum(m_i) = (1.5\ m \cdot 16\ tonn + 2.5\ m \cdot 20\ tonn + 4.5\ m \cdot 12\ tonn)/(16+20+12)\ tonn = 2.67\ m$

Eksempel 2.2. Beregning av KG' og KB':

Geir Grei sitter på flåten sin. Den er laget av isopor og har målene L=1.2 m, B=0.8 m og H= 0.2 m. Isoporen veier 5 kg. Geir veier 53 kg. Når han sitter, vil Geirs tyngdepunkt ligge 0.4 m over flåten. KG' blir nå:

$KG' = (5\ kg \cdot 1\ dm + 53\ kg \cdot (2\ dm + 4\ dm))/(5\ kg + 53\ kg) = 5{,}6\ dm$

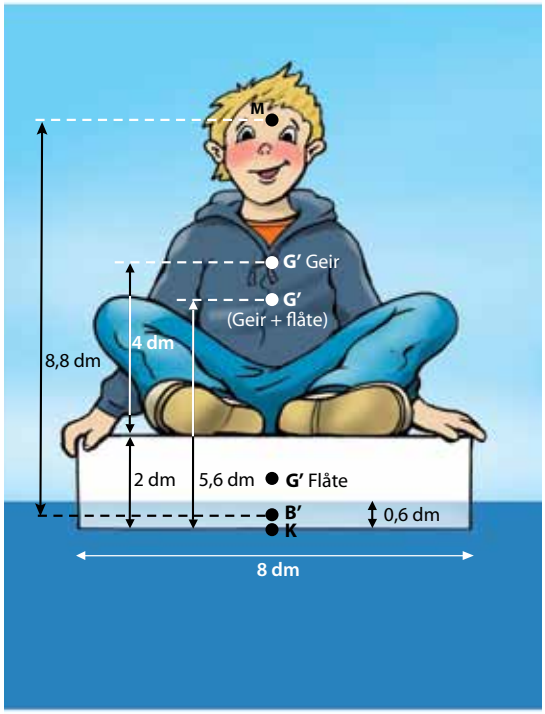
Vi kan bestemme avstanden til oppdriftssenteret KB' slik:

Dypgang T :

$$T = \frac{(5\ kg + 53\ kg) \cdot g}{L \cdot B \cdot \rho \cdot g} = 0{,}6\ dm$$

Siden flåten er utformet som et prisme, vil oppdriftssenteret, B', ligge slik at :

$KB' = 0.6\ dm / 2 = 0.3\ dm$



Data for bestemmelse av beliggenhet til tyngdepunkt og oppdriftssenter for Geir + flåte.

Undringsoppgave:

Bokstaven B brukes ofte for oppdrift og B' for oppdriftssenter. Hvorfor velges bokstaven B så ofte i forbindelse med oppdrift?

Tverrskipsstabilitet

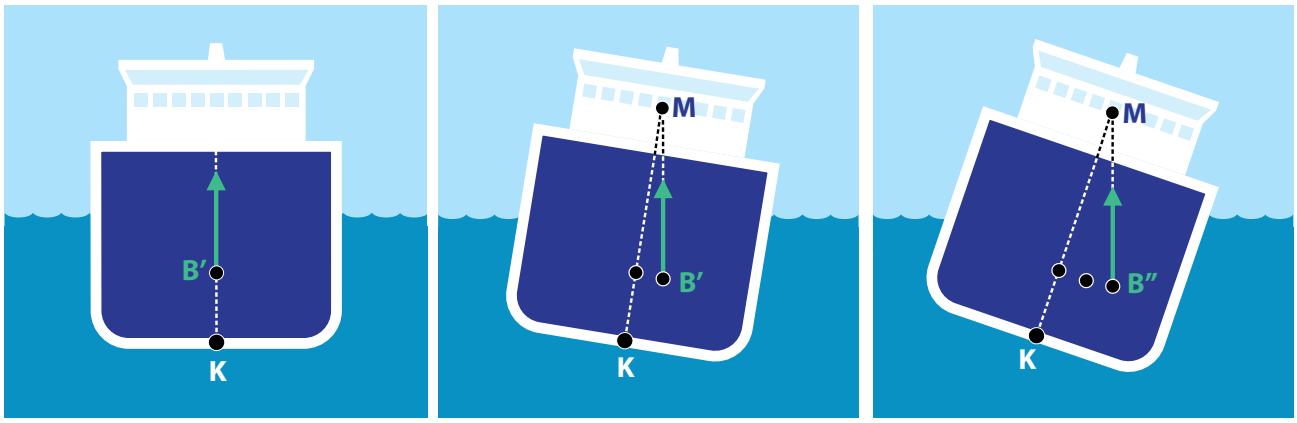
To sentrale begrep:

Metasenter (M) = punkt som oppdriften B alltid virker gjennom

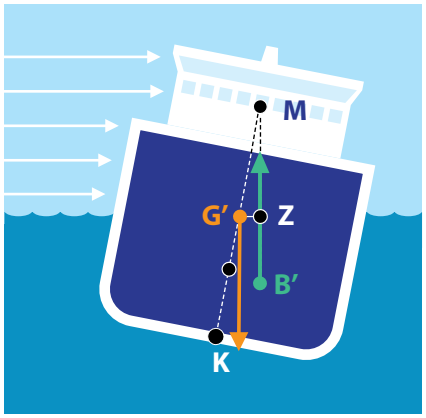
Moment M_d = "dreiekraft" = kraft • arm

Med arm mener vi den vinkelrette avstanden mellom oppdriftens retning og den akse skipet dreier seg om.

La oss studere et snitt av et skip. Når skipet krenger, vil oppdrifts-punktet flytte seg :



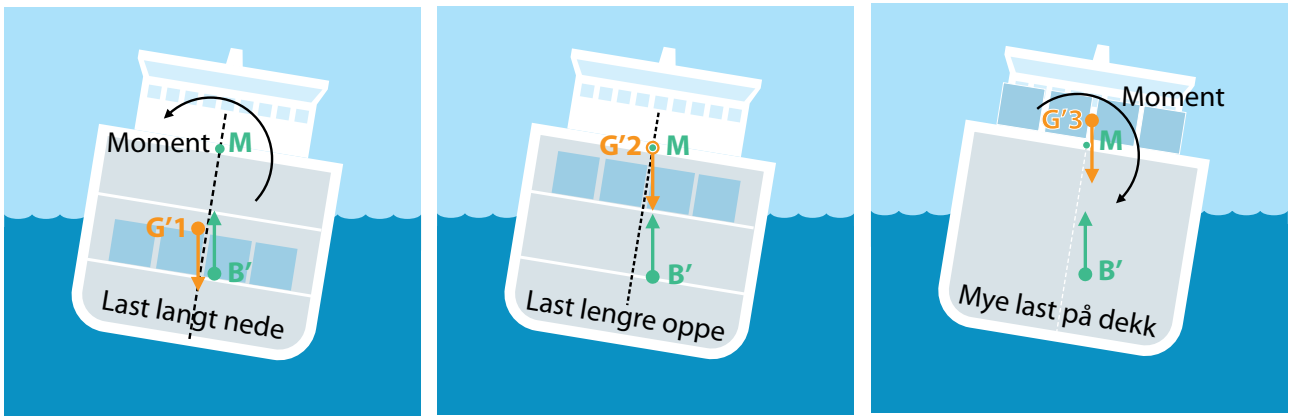
Vi ser at oppdriftskraften virker gjennom det samme punktet M, som kalles metasenteret. Dette gjelder kun så lenge krengingsvinkel er liten (typisk mindre enn 10°).



Skipet kan krenge av mange årsaker, for eksempel lastforskyving eller sidevind. Figurene over og til venstre illustrerer kreftene som er med i spillet. Tyngdepunktet er på samme plass, mens oppdrifts-senterets plassering endrer seg som illustrert. Sammen danner disse kreftene et opprettende moment. Størrelsen på momentet er av-hengig av den horisontale avstanden G'Z, som også blir kalt oppret-tende arm. Stor G'Z gir god stabilitet.

Viktig lov om stabilitet

Nå vet vi altså at oppdriften alltid virker gjennom metasenteret. La skipet rulle med klokken.
Vi ser på hva som skjer ved tre forskjellige plasseringer av tyngdepunktet G' :



Dersom tyngdepunktet G' ligger i G'1, gir oppdriften et opprettende moment.
Dersom tyngdepunktet G' ligger i G'2, gir oppdriften null moment (labil situasjon).
Dersom tyngdepunktet G' ligger i G'3 (mye tung last på dekk), gir oppdriften et veltende moment.

Vi kan dermed fastslå kriteriet for at skipet skal være stabilt:

G'M > 0

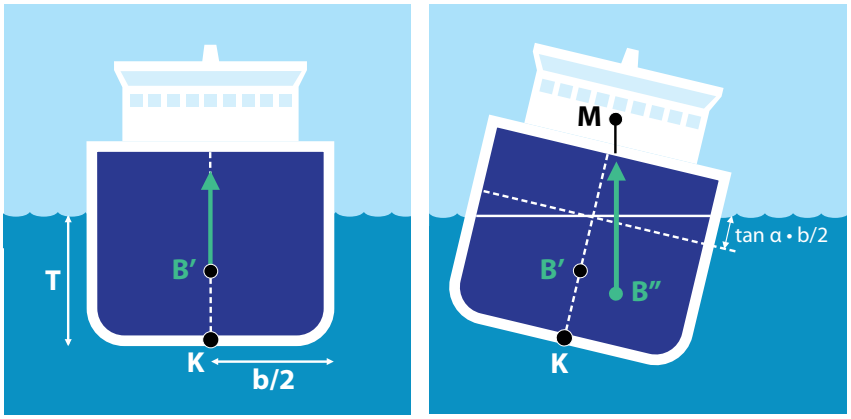
Eller med andre ord:

Tyngdepunktet (G') for skipet må ligge lavere enn metasenteret (M).

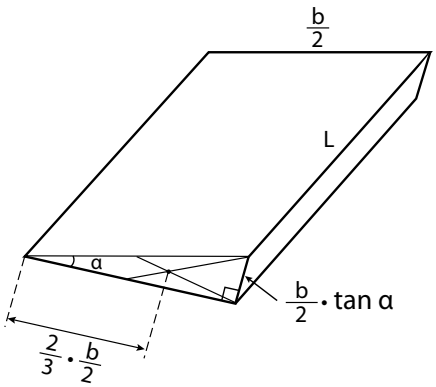
Undringsoppgave:

Hvordan er stabiliteten for en katamaran i forhold til et konvensjonelt skip? Begrunn svaret.

Grunnlag for beregning av metasenterhøyde



Bestemmelse av metasenter-høyde
B′ og B″: Oppdriftssentre



Neddykket kile
Et slikt legeme kan også kalles prisme. Planet i vannflaten er et rektangel

Bestemmelse av arealtreghetsmoment

La oss se på situasjonene over, hvor skipet har fått en krengingsvinkel. Etter krengingen dannes to langsgående kiler, en neddykket og en frilagt. Disse gir et opprettende moment.

$M_d = 2 \cdot \text{arm} \cdot \text{kraft}$.

To-tallet kommer av at vi har to kiler som virker i samme rotasjonsretning.
Med kraft mener vi her oppdriften fra den høyre kilen

arm = horisontal avstand fra rotasjonssenter til kraftretningen gjennom arealsenteret til kilen
= (2/3) * (b/2), se oppgave 20.

kraft = oppdrift fra hver kile = volum • ρ • g
= ½ • (b/2) • (b/2) • tan(α) • L • ρ • g

Vi setter inn i momentligningen øverst, og får:

$$M_d = 2 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{b}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{b}{2} \cdot \frac{b}{2} \cdot \tan\alpha \cdot L \cdot \rho \cdot g = \frac{1}{12} b^3 \cdot L \cdot \rho \cdot \tan\alpha \cdot g$$

Vi kan også regne opprettende moment ved å se på endret posisjon for oppdriftssenteret :

$M = \text{arm} \cdot \text{kraft}$

Arm = horisontal avstand mellom B′ og oppdriftens retning = B′M • tan α
Kraft = oppdrift for hele legemet = b • L • T • ρ • g

Vi setter inn og får :

$M_d = B'M \cdot \tan\alpha \cdot b \cdot L \cdot T \cdot \rho \cdot g$

Bestemmelse av metasenterhøyden

Dersom vi nå setter de to uttrykkene for M_d lik hverandre, ender vi opp med følgende uttrykk for metasenterhøyden :

$$B'M = \frac{b^3 \cdot L}{12 \cdot b \cdot L \cdot T} = \frac{b^3 \cdot L}{12} \cdot \frac{1}{\nabla} = \frac{\text{arealtreghetsmoment}}{\text{volumdeplasement}} = \frac{I}{\nabla}$$

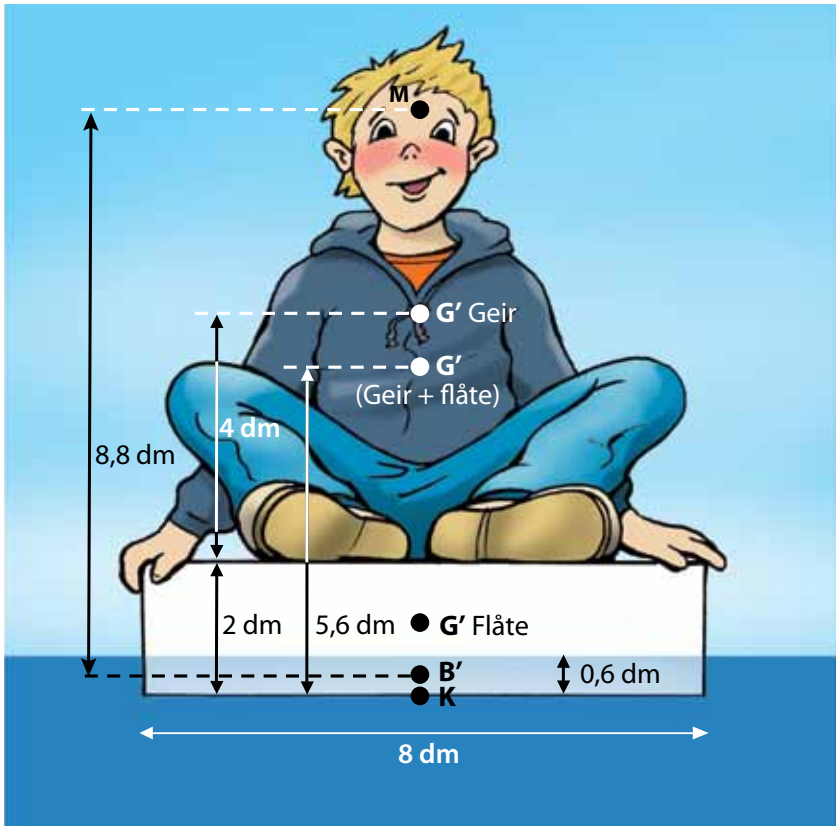
$I = b^3 L / 12$ er en størrelse som kalles arealtreghetsmoment. Uttrykket gjelder for et rektangel, og vi har her forutsatt at neddykket del av skipet er et prisme, slik at vannlinjeplanet blir et rektangel.

Eksempel 2.3 Beregning av metasenterhøyde for Geir på flåte:
På side 2.11 har vi regnet ut at volumdeplasementet for flåten med Geir var 58 dm^3. Med en bredde på flåten b = 8 dm og en lengde L = 12 dm, ble dypgangen for flåten T = 0.6 dm. Beliggenheten av metasenteret kan beregnes slik:

Arealtreghetsmoment = L • b^3 / 12 = 12 dm • (8 dm)^3 / 12 = 512 dm^4

Metasenterhøyde BM = 512 dm^4 / (58 dm^3) = 8.8 dm

Siden tyngdepunktet for flåten med gutt ligger 5.6 dm - 0.3 dm = 5.3 dm over oppdriftssenteret, skjønner vi at stabiliteten er tilfredsstillende. Avstanden GM er positiv og blir 8.8 dm – 5.3 dm = 3.5 dm. Forholdene er illustrert i figuren under.



Undringsoppgave:

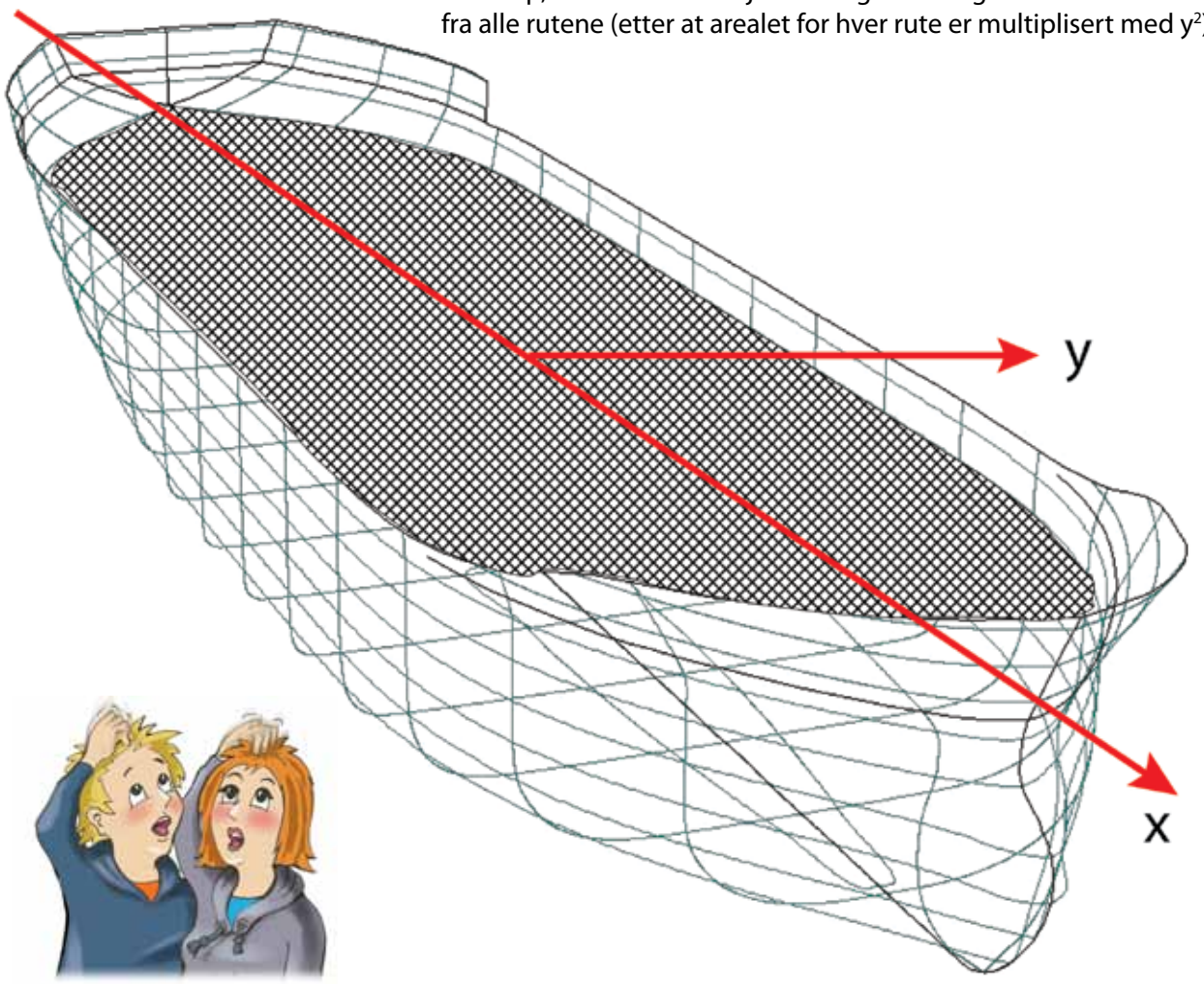
Geir har blitt interessert i å undersøke fenomenet stabilitet nærmere. Han har også en annen flåte av isopor med samme lengde og tykkelse, men med en bredde b = 5 dm. Han prøver å sette seg forsiktig på denne. Går det bra?

Beregning av metasenter-høyde for et skip

Beregning av arealtreghetsmomentet

Arealtreghetsmomentet regner vi som: $I = I_x = \int y^2 da$.
Vi skriver I_x fordi vi regner momentet om x-aksen (som går i skipets lengderetning mens y peker ut til siden).

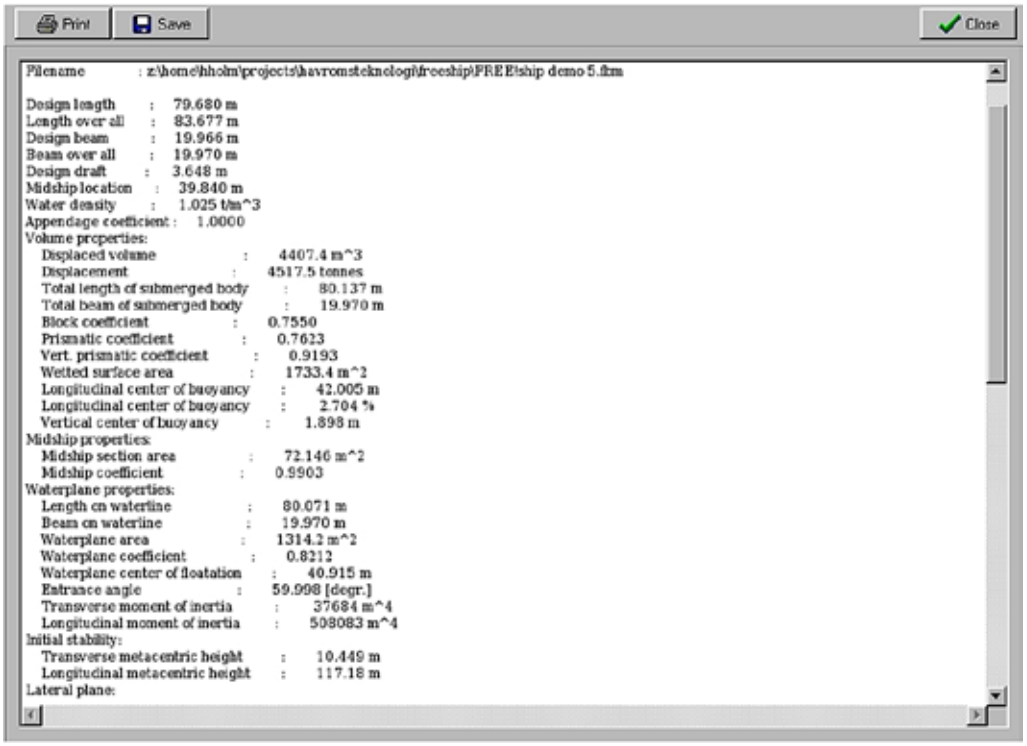
Arealtreghetsmomentet I er en størrelse som du kan regne ut for enkle geometriske former. Foran er dette gjort for et rektangel. For skip som har en kompleks vannlinje, må vi ha hjelp av datamaskin for å regne arealtreghetsmoment. Datamaskinprogrammer, som f.eks. Freeship, kan dele vannlinjen i mange ruter og så summere bidrag fra alle rutene (etter at arealet for hver rute er multiplisert med y^2).



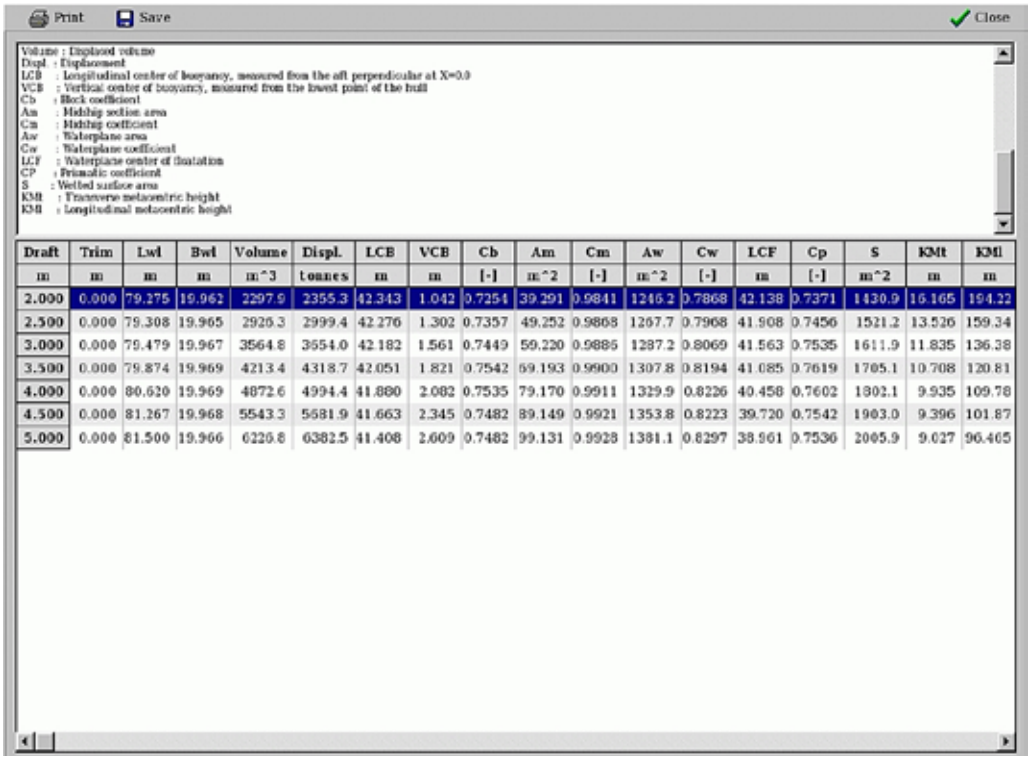
Undringsoppgave:
På side 2-3 har vi påpekt at et skip har god stabilitet dersom det har stor evne til å rette seg opp igjen etter krenging. Denne evnen bestemmes først og fremst av hvor stort arealtreg-hetsmoment ($I_x = \int y^2 \cdot da$) skipet har i vannplanet. Forklar med ord:
1 - Hvorfor det er dimensjonene akkurat i vannplanet som er av betydning.
2 - Hvorfor dimensjonene på tvers av skipet kommer inn i 2. potens, altså som y^2 og ikke bare som y.

Rapportering av hydrostatiske størrelser fra dataprogrammet "Freeship"

I "Freeship" kan vi få to rapporter om hydrostatiske størrelser



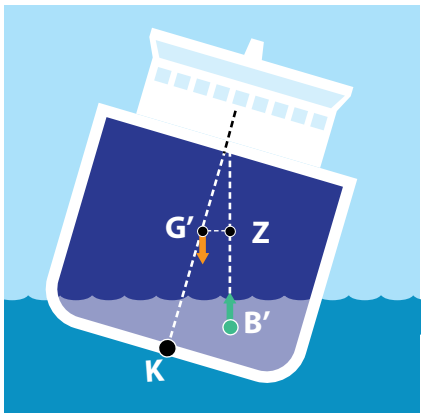
Vi kan klikke "Calculations->Design hydrostatics". Eksempel på output har vi på figuren under. Dette er for en bestemt "design dypgang". Langt nede ser vi "transverse metacentric height". Dette er metasenterhøyden som vi har omtalt.



Draft	Trim	Lwl	Bwl	Volume	Displ.	LCB	VCB	Cb	Am	Cm	Aw	Cw	LCF	Cp	S	KMt	KMl
m	m	m	m	m^3	tonnes	m	m	[-]	m^2	[-]	m^2	[-]	m	[-]	m^2	m	m
2.000	0.000	79.275	19.962	2297.9	2355.3	42.343	1.042	0.7254	39.291	0.9841	1246.2	0.7868	42.138	0.7371	1430.9	16.165	194.22
2.500	0.000	79.308	19.965	2926.3	2999.4	42.276	1.302	0.7357	49.252	0.9868	1267.7	0.7968	41.908	0.7456	1521.2	13.526	159.34
3.000	0.000	79.479	19.967	3564.8	3654.0	42.182	1.561	0.7449	59.220	0.9885	1287.2	0.8069	41.563	0.7535	1611.9	11.835	136.38
3.500	0.000	79.874	19.969	4213.4	4318.7	42.051	1.821	0.7542	69.193	0.9900	1307.8	0.8194	41.085	0.7619	1705.1	10.708	120.81
4.000	0.000	80.620	19.969	4872.6	4994.4	41.880	2.082	0.7535	79.170	0.9911	1329.9	0.8226	40.458	0.7602	1802.1	9.935	109.78
4.500	0.000	81.267	19.968	5543.3	5681.9	41.663	2.345	0.7482	89.149	0.9921	1353.8	0.8223	39.720	0.7542	1903.0	9.396	101.87
5.000	0.000	81.500	19.966	6220.8	6382.5	41.408	2.609	0.7482	99.131	0.9928	1381.1	0.8297	38.961	0.7536	2005.9	9.027	96.465

Dersom vi klikker "Calculations-> Hydrostatics", får vi opp hydrostatiske verdier for forskjellige dypganger. Langt til høyre ser vi en kolonne merket "KMt". Dette er samme størrelse – avstanden fra kjøl til metasenteret.

Stabilitet ved store krengevinkler



Oppdriften går ikke gjennom metasenteret ved store krengevinkler. *Da bruker vi gjerne armen for det opprettede momentet G'Z når vi skal analysere stabiliteten.*

Opprettende moment

Hittil har vi tatt for oss stabilitet som er gyldig ved små krengevinkler. Ved store krengevinkler (>10°) finnes det ikke noe punkt som oppdriften alltid virker gjennom. Ved store krengevinkler benytter vi i stedet armen GZ til å angi stabilitet. Oppdriften virker nå gjennom et "falskt" metasenter, Mf. Plasseringen av Mf vil være avhengig av krengevinkelen.

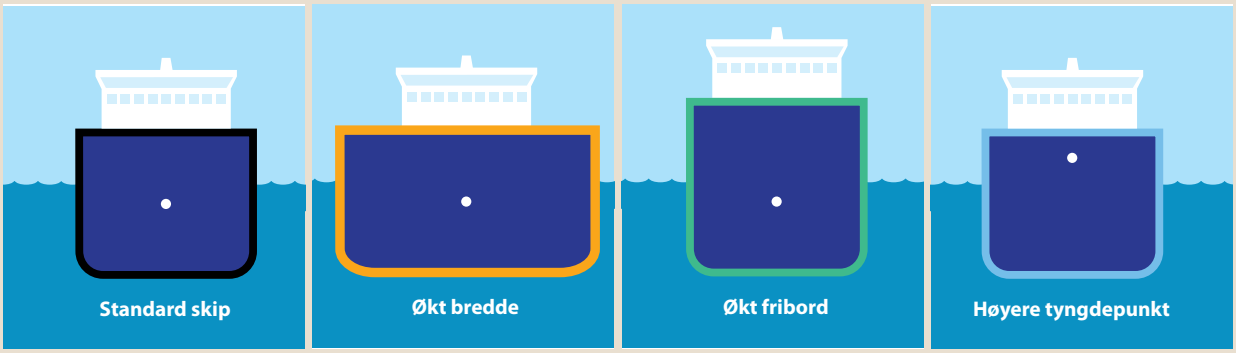
Armen G'Z beskriver det opprettende momentet fra oppdrift. Denne er en funksjon av krengevinkelen. Myndighetene krever at GZ-kurve skal være tilgjengelig for alle skip.

Fartøyets tyngde = fartøyets oppdrift = $\triangle \cdot g = \nabla \cdot \rho \cdot g$

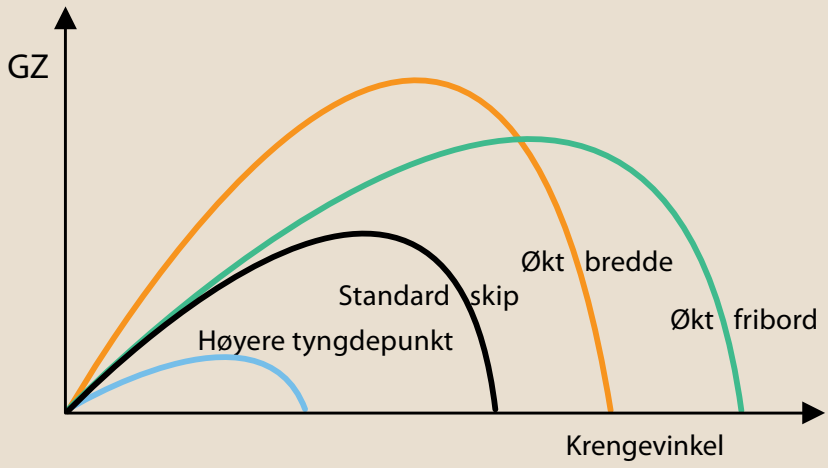
Opprettende moment

$M_d = \nabla \cdot \rho \cdot GZ \cdot g$

En GZ-kurve er avhengig av skipets form og kan se ut som på figuren under :

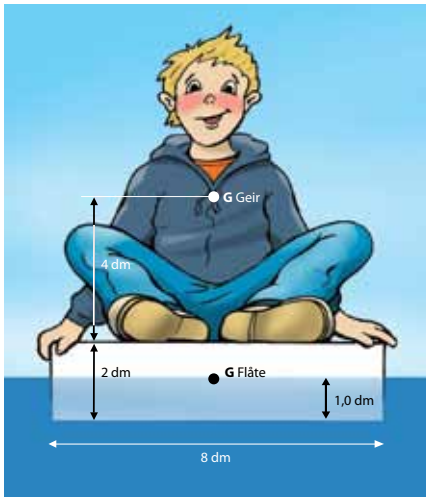


Eksempler på GZ-kurver
For fiskebåter og større skip setter myndighetene krav til størrelsen på arealet under G'Z-kurven.



Bruk av trykkforhold til bestemmelse av armen G'Z

Bruk av trykk som virker på et neddykket legeme, er ofte en fin metode for bestemmelse av armen G'Z. Hvordan dette kan gjøres, framgår av eksemplet nedenfor. Aller først skal vi imidlertid peke på at det generelt alltid er fullt mulig å bruke de trykk som påvirker neddykkede deler av et legeme, til å bestemme oppdrift og beliggenhet av legemets oppdriftssenter. Dette sier seg egentlig selv siden det er sammensetning av vanntrykk som jo er grunnlaget for Arkimedes´ lov. Denne metoden er derfor ofte grei å benytte også når vi skal analysere stabiliteten av andre legemer enn skip, for eksempel undervannskonstruksjoner og rørledninger. Nedenfor skal vi anvende metoden på den flåten som vi ofte har brukt som eksempel tidligere i dette kapitlet.



Geir har tatt med 38 kg last på flåten, bak ryggen. *Dette senker metasenterhøyden fra 8,8 dm til BM = 5,3 dm (ved små krengevinkler). Systemets tyngdepunkt ligger slik at BG' Syst = 3,5 dm. Ved små krengevinkler tilfredsstilles hovedkravet til stabilitet, men vi bør sjekke denne også for større krengevinkler, se beregning av armen GZ i eksempel. Aktuell vinkel settes lik 14°, da er tan =2 / 8 = 0,25, cos = 0,97.*

Eksempel 2.4. GZ-arm for flåte ved stor krengevinkel. Det vises til eksemplene 2.2 og 2.3 på sidene 2-11 og 2-15. Geir vil ta med 38 kg last på flåten og plasserer denne bak ryggen sin. Han finner fram til en posisjon både for lasten og seg selv som gjør at flåten flyter horisontalt både på langs og tvers når han sitter rolig.

a) Bestem ny oppdrift og dypgang for flåten i horisontal stilling. Vis at systemets tyngdepunkt blir liggende 4,5 dm over bunnen i horisontal stilling og at maksimal krengevinkel er 14° når Geir vil unngå å få vann på "dekket".

b) Bestem armen GZ ved en krengevinkel på 14° ved først å bestemme trykkene og de krefter som disse gir på neddykkede flater. Deretter finnes oppdrift og oppdriftssenter ved å sette sammen kreftene. Armen GZ kan beregnes, men finnes enklere ved utmåling på en figur. Lag en slik figur og bestem også opprettende moment.

c) Hva kan vi si om stabiliteten til flåtesystemet?

Løsninger:

a) Massedeplasement = 53 kg +5 kg + 38 kg = 96 kg

Dypgang: $T = \frac{\Delta}{B \cdot L \cdot \rho} = \frac{96\ \text{kg}}{8\ \text{dm} \cdot 12\ \text{dm} \cdot 1{,}0\ \text{kg/dm}^3} = 1{,}0\ \text{dm}$

Tyngdepunktets høyde over bunnen:

$$KG'_{syst} = \frac{5\ \text{kg} \cdot 1\ \text{dm} + 53\ \text{kg} \cdot 6\ \text{dm} + 3{,}8\ \text{kg} \cdot 2{,}87\ \text{dm}}{(5 + 53 + 38\ \text{kg})} = 4{,}5\ \text{dm}$$

b) Trykk ved B: $p_B = 1{,}0 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9{,}8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0{,}2\ \text{m} \cdot 0{,}97 = 1900\ \text{Pa}$

Kraft på sideflate: $F_s = \bar{p}_{AB} \cdot A_s =$
$= (1900\ \text{Pa}/2) \cdot (0{,}2 \cdot 1{,}2)\text{m}^2 = 228\ \text{N}$

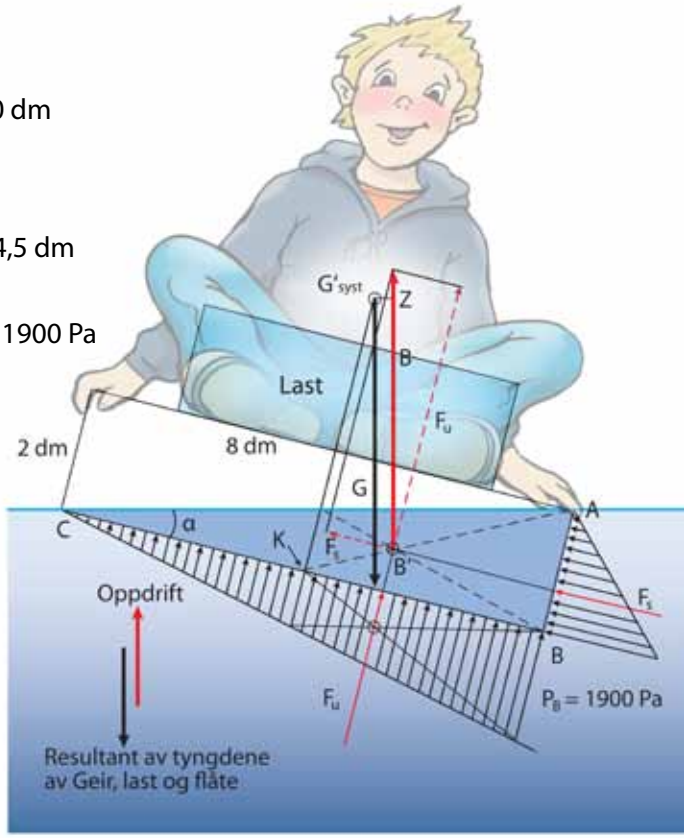
Kraft på underside: $F_u = \bar{p}_{BC} \cdot A_u =$
$= (1900\ \text{Pa}/2) \cdot 0{,}8 \cdot 1{,}2\ \text{m}^2 = 912\ \text{N}$

Total oppdrift: $B = \sqrt{228^2 + 912^2}\ \text{N} = 940\ \text{N}$

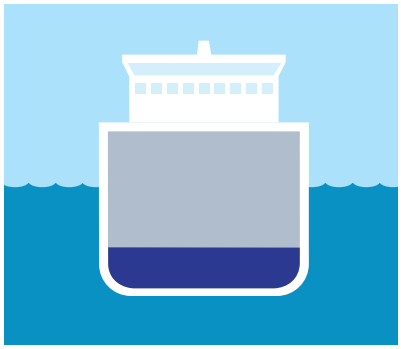
Utmålt: $G'_{syst}Z = 3{,}5\ \text{mm} \cdot 10 = 0{,}035\ \text{m}$

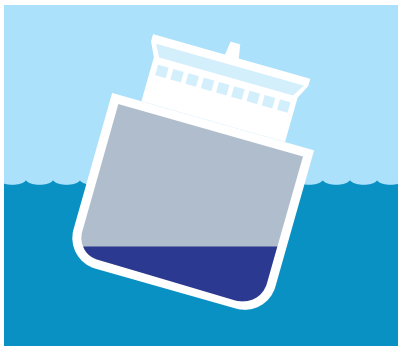
Opprettende moment:
$M_d = B \cdot G'_{syst}Z = 940\ \text{N} \cdot 0{,}035\ \text{m} = 33\ \text{Nm}$

c) Flåten vil nok rette seg opp igjen, men er nå på grensen av hva den tåler av krenging. Geir må være meget forsiktig.



Effekt av fri overflate





Vann i bunn av skip

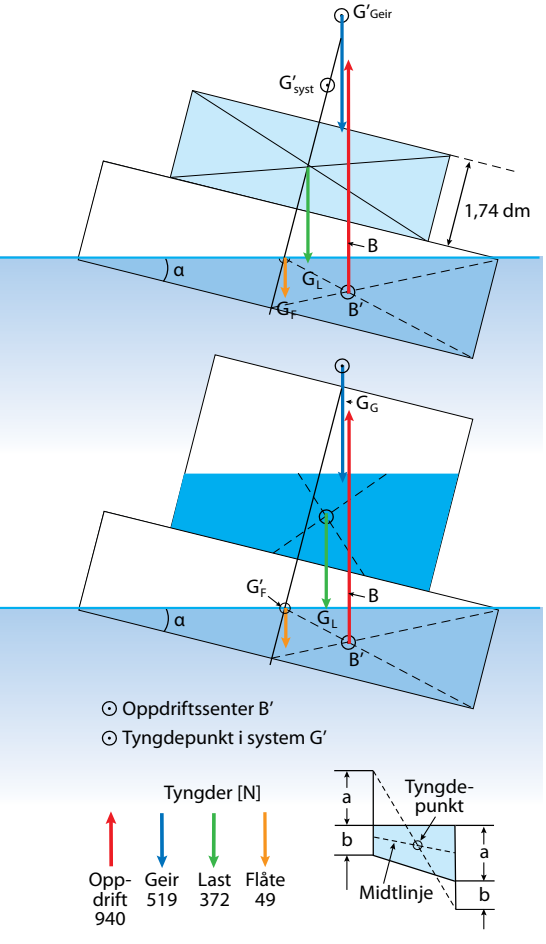
La oss tenke oss at det har kommet inn vann på bunnen av et skip. Når skipet krenger, vil dette vannet strømme til det laveste punktet og medvirke til et moment som gir enda større krenging, se figurer.

Vann på dekk, fri væskeflate i tanker

Mange katastrofer til sjøs skyldes vann på dekk. Spesielt utsatt er ferger. Dersom det kommer vann inn på dekket, for eksempel gjennom baugporten, vil stabiliteten forverres. Dersom det opprettes langsgående skott, vil denne effekten reduseres. Det kan vises at metasenteret senkes når vi får vann på dekk. I tillegg vil vannet heve plasseringen av tyngdepunktet. Begge deler vil framgå av eksemplet nedenfor.

I 1994 kantret skipet Estonia i Østersjøen. Vann kom inn gjennom baugporten og destabiliserte skipet. 852 mennesker mistet livet.

Væske i tanker. Effekten av fri væskeoverflate i tanker i et skip påvirker stabiliteten av et skip på samme måte som om vi hadde hevet tyngdepunktet til skipet. Det er arealtreghetsmomentet av fri overflate som teller. Derfor bør store tanker enten deles opp eller utføres med liten bredde i tverrskipsretningen, se side 6-21 om inndelingen i tankskip.



Eksempel 2.5. Reduksjon av G`Z-arm forårsaket av fri overflate i vanntank. Det vises til eksemplet på side 2-19, hvor lasten var et legeme med masse 38 kg og tetthet 1,0 kg/m^3. Denne lasten erstattes nå med en vanntank med 38 kg vann og med samme bredde og lengde som den tidligere lasten hadde (henholdsvis 5,2 og 4,2 dm).

a) Lag figurer i passende skala med de to lastene liggende sentralt på flåten.

b) Overfør til figurene oppdrift fra eksempel 2.4 , samt beliggenhet av oppdriftssenter og samlet tyngdepunkt for hele flåtesystemet.

c) G`Z med vanntank blir så liten at den er vanskelig å måle ut, men beskriv hva som har skjedd med tyngdevektoren for lasten når denne er i væskeform. Beskriv også hvordan tyngdevektoren for vannet virker inn på beliggenheten av tyngdepunktet for hele systemet.

Løsninger:

a), b): Se figurer til venstre

c) Ved krenging vil væskevolumet få et trapesformet tverrsnitt, og volumets tyngdepunktet forskyves dermed til høyre. Dette betyr at også resultanten av alle tyngdevektorene i systemet forskyves mot høyre, slik at armen G`Z reduseres. Hvis vi hadde hatt plass til å beregne den nye armen, ville vi sett at den ville vært nesten lik null. Med andre ord er det trolig at Geir ville fått et ufrivillig bad hvis flåten fikk en så stor krengevinkel når den hadde vanntank ombord.

Oppgaver

Generelt kan vi i følgende oppgaver bruke disse tetthetene:
For ferskvann: 1000 kg/m^3, for sjøvann: 1025 kg/m^3 og for is: 900 kg/m^3

Oppgave 2.1
Hvor mange meter ferskvann og hvor mange meter sjøvann svarer til et lufttrykk på 100 kPa?

Oppgave 2.2
Definer størrelsen trykk og SI-enheten for trykk.

Oppgave 2.3
I et glass som er fylt til randen med vann, flyter det en isbit. Isbiten er av vann. Vil vann renne over når isen smelter? Begrunn svaret.

Oppgave 2.4
Et skip går inn til de store sjøene i Amerika og tar inn last. Så seiler skipet ut i Atlanteren (via de store elevene). Flyter skipet høyere eller lavere når det kommer ut i Atlanteren? Begrunn svaret.

Oppgave 2.5
En flåte som måler 6,0 m x 4,0 m, flyter på ei elv. Vi vil bruke flåten til å frakte en bil over elva. Idet vi kjører bilen om bord, synker flåten 3,0 cm dypere i vannet. Finn tyngden av bilen.

Oppgave 2.6
En av grunnene til at havnivået kan komme til å stige, er at isen i polområdene holder på å smelte. Drøft dette. Kan det være noen forskjell på virkningen av issmelting i Arktis og i Antarktis?

Oppgave 2.7
En miniubåt ligger i ro på 80 m dyp. Inne i ubåten er trykket 100 kPa, som også er lik lufttrykket over vannflaten. Et sirkulært vindu har radius 14 cm. Hvor stor er resultanten av trykkreftene mot vinduet?

Oppgave 2.8
Et luftputefartøy er 40 m langt, 24 m bredt og har massen 166 tonn. Når fartøyet svever, må trykket i luftputen under skipet være større enn i lufta utenfor. Hvor stort må dette overtrykket være?

Oppgave 2.9
Et isflak med volum 20 m^3 flyter i ferskvann. Regn ut hvor stor tyngde isflaket kan bære uten å gå under.

Oppgave 2.10
En gutt med masse 50 kg står midt på et isflak som har et areal lik 1,5 m^2. Isflakets overside ligger akkurat i vannskorpa i ferskvann. Hvor stor er isflakets tykkelse?

Oppgave 2.11
Et isfjell flyter i sjøen. Hvor stor del av isfjellets totale volum ligger over vannflaten?

Oppgave 2.12
Hvilke symboler brukes i skipsteknikken for volumdeplasement og vektdeplasement (massedeplasement)? Oppgi også typiske måleenheter for disse størrelsene. Lag en formel for sammenhengen mellom størrelsene.

Oppgave 2.13
Et lasteskip har en lettskipsvekt på 22000 tonn og en dødvekt på 82000 tonn. Hvor stort er skipets volumdeplasement?

Oppgave 2.14 (eksperiment)
Sett en tom toliters isboks på vannet. Sett så en kvartliters melkekartong fylt med vann oppe i isboksen. Hvordan vil du karakterisere stabiliteten? Tøm vannet ut isboksen. Er stabiliteten endret? Gjenta eksperimentet med en halvliters melkekartong med vann. Hva kan du si om stabiliteten nå? Hvilke kriterier vil du bruke for å beskrive stabiliteten?

Oppgaver

Oppgave 2.15
Tenk deg en tom brusflaske som flyter i vann. Hva kan du si om stabiliteten til denne? Begrunn svaret.

Oppgave 2.16
Det skal gjennomføres beregninger av et lignende oppsett som det vi brukte i oppgave 14. Isboksen er laget av 0,2 cm tykk plast og har innvendige mål L = 18 cm, B = 13 cm og H = 8,6 cm. Boksens bunn har en masse lik 104 g og de fire veggene en masse på 228 g totalt.
Sentralt (i diagonalenes skjæringspunkt) oppe i den tomme isboksen plasseres det en halvliters melkekartong hvor melken er erstattet med vann. Denne har et kvadratisk tverrsnitt med sidekant 5,8 cm og en høyde 14,9 cm. Vi ser bort fra massen av selve kartongen, slik at massen av "båtens last" altså kan settes lik 500 g.

a) Beregn volumdeplasement og dypgang for oppsettet ovenfor.

b) Lag en tegning (tverrsnitt) av oppsettet i skala 1 : 1. Avmerk vannlinjen, oppdriftssenteret (B) og sentralt punkt på bunnens underside (K). Hvor stor er avstanden KB?

c) Bestem beliggenheten av oppsettets tyngdepunkt G, uttrykt ved avstanden KG. Dette gjøres ved å anvende tyngdepunktsatsen på momentene som de enkelte delmassene gir om en horisontal, langsgående akse gjennom punkt K. (For å forstå tyngdepunktsatsen bedre kan du som et tankeeksperiment dreie hele oppsettet 90 grader om denne aksen. Dermed får tyngdene av både de enkelte delmasser og den samlede massen armer å virke på, slik at de skaper virkelige momenter om aksen gjennom K). Avmerk den beregnede tyngdepunktbeliggenhet i figuren.

d) Beregn metasenterhøyden BM, og marker metasenterets beliggenhet (M) på tegningen.

e) Bestem avstanden GM. Forklar hvorfor systemet kan defineres som stabilt, men med en stabilitet som er meget dårlig.

f) Hvor stor blir avstanden GM hvis vi heller vannet i kartongen ut i isboksen? Hvilken konklusjon kan du trekke av dette?

Oppgave 2.17
Det vises til eksemplene med Geir Grei på isoporflåten på sidene 11og 15 foran. Her ble det påvist at stabiliteten var tilfredsstillende så lenge Geir satt i ro på flåten.

a) Er det tilstrekkelig stabilitet i systemet hvis Geir reiser seg opp på kne midt på flåten? Geirs tyngdepunkt heves da fra 4 dm til 7 dm over flåtens dekk.

b) Geir vil undersøke om han kan bli stående oppreist på flåten og reiser seg opp. Hans tyngdepunkt heves da til 1,0 m over dekket. Kan han bli stående slik, eller får han et ufrivillig bad? Begrunn svaret.

Oppgave 2.18
Geir vil ta med en kamerat på padletur med den samme flåten som er beskrevet foran. Han hadde tenkt at guttene skulle sitte etter hverandre langs flåtens lengdeakse og slik at denne holdt seg horisontal. Kameraten har samme masse og tyngdepunktbeliggenhet som Geir.

a) Påvis ved beregning hvorfor guttene ikke vil få noen padletur sammen.

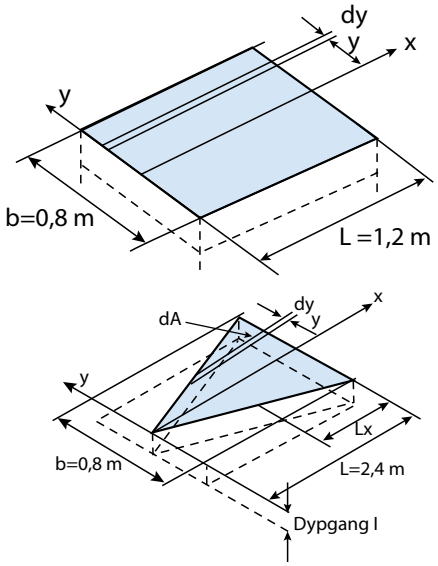
b) Hva er hovedgrunnen til at systemet nå er blitt ustabilt?

Oppgave 2.19

Geir Grei har etter hvert blitt meget interessert i fenomenet stabilitet. Han har også funnet et annet isoporlegeme som han vil bruke til en ny flåte som skal bli lettere å padle. Denne er imidlertid formet som en likebent trekant med grunnlinje 0,8 m og høyde 2,4 m (se figur A). Dimensjonene gir samme vannlinjeareal som for den rektangulære flåten. Videre er tykkelsen den samme, og dermed blir også den nye flåtens masse og dypgang den samme som tidligere. Men Geir lurer veldig på om stabiliteten virkelig kan være den samme som før, nå når vannlinjearealet er blitt trekantformet i stedet for rektangulært. Det har blitt så kaldt i vannet at han ikke tar sjansen på å gjøre et realistisk, fullskala eksperiment. Geir har imidlertid blitt så fascinert av bruk av integralregning til bestemmelse av arealtreghetsmoment, slik som forklart på side 16 for et rektangel, at han bestemmer seg for å prøve metoden først for et rektangel og for en trekant. Men han "kjører seg fast". Kanskje du kan hjelpe ham?

a) Bevis ved hjelp av integralregning at arealtreghetsmomentet om aksen x-x for en trekant som vist i figur, kan skrives:
$I = L \cdot b^3/12$

b) Påvis at det ville endt med katastrofe dersom Geir hadde forsøkt å sette seg på en slik trekantet flåte.



Oppgave 2.20

Med arealsenter for en flate mener vi det samme som tyngdepunktet for flaten. (Tenk deg flaten klippet ut av en plate og balansert på en spiss plassert i arealsenteret). For en trekant ligger arealsenteret i skjæringspunktet mellom medianene. En median er en linje fra et hjørne til midtpunktet på motstående side.

a) Bevis geometrisk at arealsenteret ligger som vist på nederste figur til høyre.

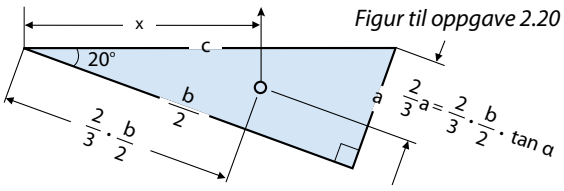
b) Hvor stor blir feilen i prosent hvis vi regner med at også avstanden x er lik 2/3 av kateten b?
Det er nettopp dette som ble gjort under utledningen for beregning av metasenterhøyden. Beregn feilen både for en trekant med vinkel 10 grader og en trekant med vinkel 20 grader.

Oppgave 2.21

Geir er ute og padler med flåten sin. Plutselig ser han noe i vannet som han vil ta opp. Han flytter seg derfor så mye til styrbord at systemets tyngdepunkt forskyves 0,12 m horisontalt til siden. Flåten vil da krenge, men ikke så mye at nedre hjørne på sideflaten kommer over vannspeilet.

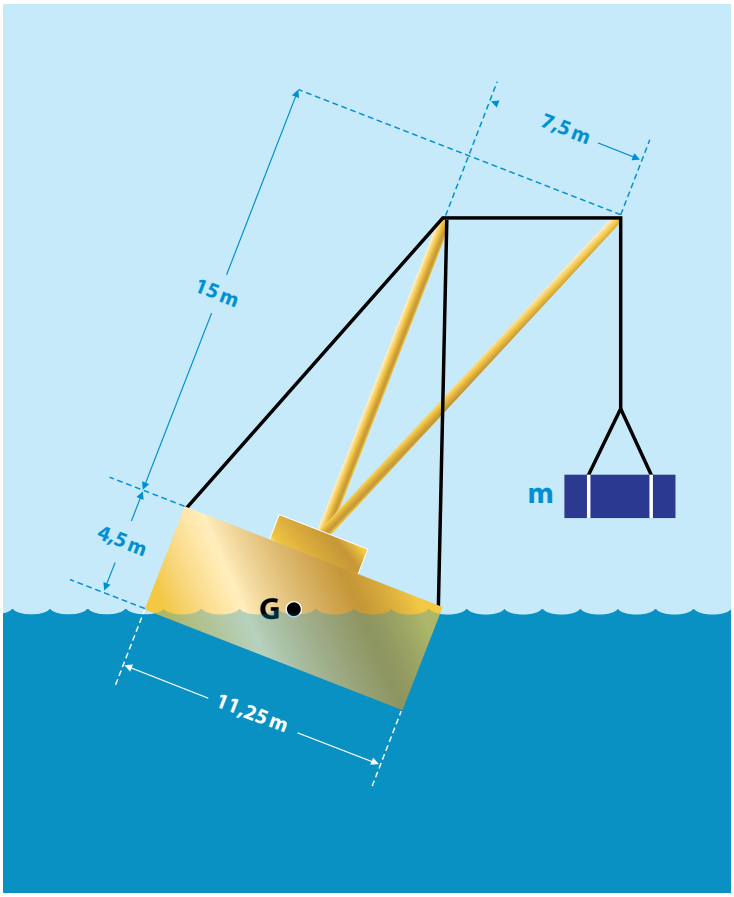
a) Lag en figur som viser situasjonen før og etter krengingen og marker punktet som krengingen skjer om. Avmerk systemets tyngdepunktbeliggenhet etter krengingen og tegn inn hvordan systemets tyngde og oppdrift nå virker (både angrepspunkt og retning for kreftene).

b) Beregn hvor vannlinja nå vil bli liggende på styrbord side av flåten. Hint: Bruk samme resonnement som i første del i utledningen av formelen for metasenterhøyden foran, og sett det opprettende momentet lik det momentet som genereres om senterlinjen når Geir flytter seg. Beregn også krengingsvinkelen.



Figur til oppgave 2.20

Oppgaver

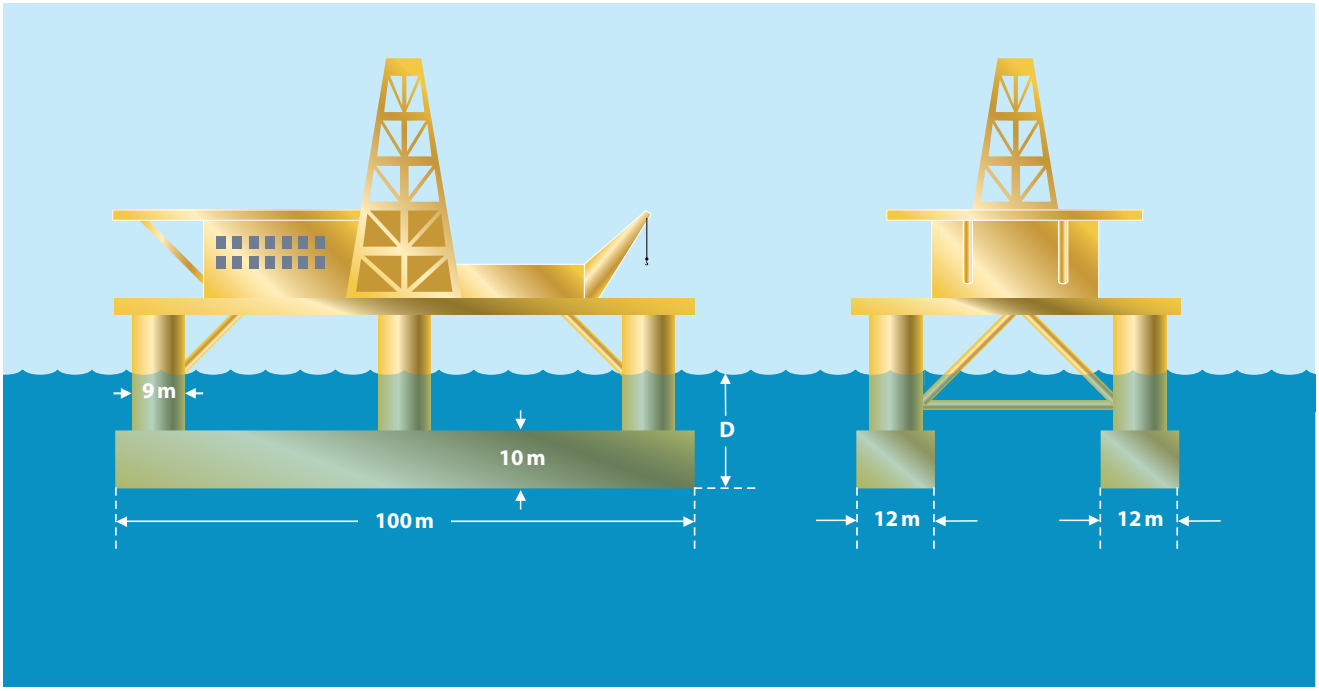


Oppgave 2.22

En lekter med kran er utformet som et rektangulært prisme med dimensjoner 11,25 m x 30 m x 4,5 m. Lekteren må aldri brukes slik at vannspeilet kommer inn på dekket. Dette gir en maksimal krenging som framgår av figuren. Selve lekteren, ballasten, maskinelt utstyr og krana uten last gir en tyngdepunktsplassering (punkt G) som inntegnet.

a) Skisser de ytre krefter som virker på systemet.

b) Bestem ved hjelp av grafisk metode hvor stor masselast (m) som krana kan ta i den situasjonen som er vist i figuren. Oppdriftssenteret må da tegnes inn i en nøyaktig tegning av systemet (for eksempel i skala 1:100), slik at nødvendige momentarmer kan måles ut direkte på tegningen.



Oppgave 2.23

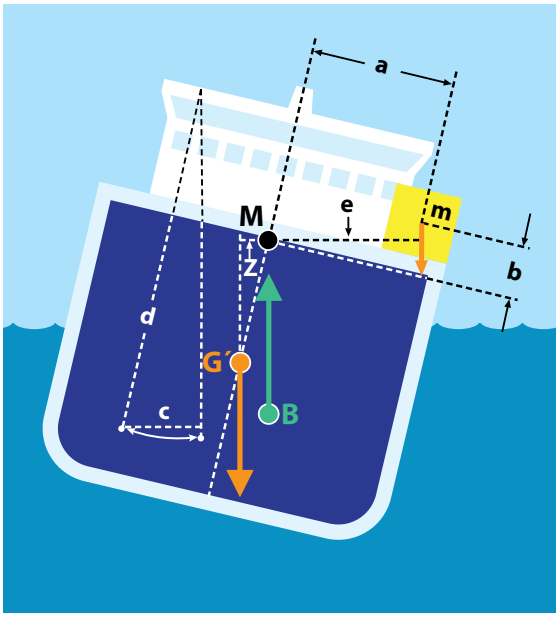
En flytende leteplattform er utført med to pongtonger og seks sylindriske søyler med dimensjoner som framgår av figur. Pongtongene gir plass for bl.a. en rekke ballasttanker og eventuelt framdriftssystem. Ballasttankene brukes til å trimme (balansere) plattformen og regulere dekkets høyde over havoverflaten. Den viste plattformen har et totalt massedeplasement lik 29000 tonn.

a) Beregn plattformens dypgang (D). Vi ser bort fra vertikalkomponenter av krefter som virker på pongtongene gjennom ankerkjettingene.

b) På grunn av værmelding om ekstremt høye bølger beslutter plattformsjefen at plattformen skal heves 1,2 m. Hvor mye vann må pumpes ut fra ballasttankene for å oppnå dette ?

Oppgave 2.24

Oppgaven omhandler en såkalt **krengeprøve.** En slik prøve er et fysisk eksperiment som myndighetene forlanger skal gjennomføres for alle nye skip og skip som er bygget om. Eksperimentet foregår under offentlig kontroll, og skipet skal alltid ha en kopi av tilhørende rapport om bord. Hovedhensikten med eksperimentet er å fastlegge nøyaktig den vertikale plassering av skipets tyngdepunkt, helst både uten last og i den mest aktuelle lastsituasjon. Det har foran i dette kapitlet blitt påpekt at det er av avgjørende betydning å kjenne avstanden G´M , altså avstanden mellom tyngdepunktet (G´) og metasenteret (M). Vi har tidligere også sett hvordan metasenterets beliggenhet kan beregnes. Nøyaktig beregning av tyngdepunktets beliggenhet er imidlertid meget vanskelig å gjennomføre, og i stedet skal dette altså bestemmes eksperimentelt. Dette gjøres som vist i figuren. En kjent masse (m) plasseres på kanten av dekket slik at skipet krenger. Plasseringen er gitt ved hjelp av avstandene a og b fra metasenteret M, som er blitt beregnet da skipet ble designet. Krengevinkelen bestemmes ved måling av utslaget (c) av et lodd i ei snor, som skjematisk vist på figuren.



For et skip med massedeplasement lik 14000 tonn gjennomføres en krengeprøve med en krengelast m = 30 tonn, som plasseres a = 8,0 m og b = 2,0 m fra metasenteret, se figuren. Horisontalt utslag av loddet utmåles til c = 192 mm, og loddsnoras lengde er d = 8020 mm.

a) Beregn momentarmen som tyngden fra krengelasten virker på i forhold til en horisontal, langsgående akse gjennom metasenteret. Husk at arm defineres som den vinkelrette avstand mellom kraftens retning og den horisontale "dreieaksen" gjennom metasenteret M (som vist ved hjelp av linjen e i figuren).

b) Beregn momentarmen (z) som skipets tyngde virker på i forhold til den samme horisontale aksen som nevnt ovenfor. Momentet fra skipets tyngde må være like stort som momentet fra krengelasten. Forklar hvorfor det ikke er nødvendig å ta hensyn til oppdriften i denne forbindelse.

c) Fastlegg beliggenheten av tyngdepunktet (G´) ved å beregne avstanden G´M. Denne må være så stor at krengevinkelen gir en momentarm (z) lik den som ble beregnet i punkt b.

Forfattere: Håvard Holm og Sverre Steen

Motstand og framdrift

Havromsteknologi

Innhold

Innledning. Sammenheng framdrift og miljø-belastning.Generelt om motstand i vann....2
Metoder for bestemmelse av motstand for skip....4
Grunnleggende hydrodynamikk
Strømlinjer. Bernoullis ligning. Viskositet....6
Friksjonsmotstand for neddykket kule....8
Friksjon/bølgemotstand .Reynolds/Froudes tall....10
Deplasementsskip
Motstandstall, med beregning av totalmotstand....12
Bruk av dataprogram for beregning av motstand og effektbehov....14
Modellforsøk, med beregning av totalmotstand....16
Hurtiggående fartøyer
Definisjoner og oversikter....18
Semideplasementsfartøyer og planende fartøyer....20
Hydrofoilfartøyer....22
Framdriftssystemer
Oversikt over systemer. Propellens virkemåte....24
Oversikt over virkningsgrader. Propulsjons virkningsgrad....26
Kavitasjon. Dataprogramberegning av propell....28
Ukonvensjonelle propellsystemer....30
Vannjet....32
Seil, seilbåter og vikingsskip (Per Werenskiold)....34
Oppgaver....38
Referanser....40

NTNU
Institutt for marin teknikk

3

All transport, også transport til sjøs, gir luftforurensning. Det er derfor viktig å designe alle fartøy med så liten motstand mot bevegelse i vann som mulig.

Sammenheng mellom framdrift og miljøbelastning

Det kreves tilførsel av energi for å drive skip og andre farkoster gjennom vannet, på samme måte som det kreves energi for å drive en bil framover på en vei. Hvor mye energi som må tilføres et fartøy, avhenger av motstanden som fartøyet møter i vannet og i luften, hvor langt det skal seile og i hvor stor grad den energien som tilføres, blir nyttiggjort av fartøyet.

Redusert energibehov vil føre til mindre utslipp av CO_2 og miljøgifter. Innsats for å utforme energieffektive skip er dermed en innsats for både nærmiljøet og det globale klima. Transport ved hjelp av skip regnes allerede som en meget miljøvennlig måte å frakte både mennesker og gods på, men kan forbedres ytterligere.

I dette kapitlet skal vi konsentrere oss om forståelse og beregning/estimering av motstand og framdrift av skip. Beregningen av motstanden og valg av propell er en relativt kompleks oppgave. Beregningene legger grunnlaget for valg av blant annet maskineristørrelse og er derfor en viktig del av prosjekteringsprosessen.

De vanligste propulsjonsinnretningene er propell, vannjet og seil. I denne boka fokuserer vi på konvensjonelle skip, og da er det i praksis propellen som er mest aktuell for å gi framdrift og som derfor gis størst plass.

Foto : Kjell Holden. Kystekspressen/Smøla

Motstand og framdrift

Generelt om motstand

Har du noen gang prøvd å løpe i vann? Du klarer neppe å løpe særlig raskt. Dette skyldes at motstanden vi møter i vannet er mye større enn den motstanden vi møter i luften. Motstanden er en kraft som virker mot bevegelsesretningen, og siden motstanden i vannet er større enn i luften, må vi bruke mye mer krefter for å bevege oss med samme hastighet i vann enn på land.

Vi forstår dermed at mengden av energi som må tilføres et fartøy, avhenger av motstanden fartøyet møter i vannet og i luften. Det vil være av stor interesse for oss å kunne bestemme motstanden på et skip.

Først ser vi på hvordan motstanden på en båt kan måles/bestemmes. La oss anta at en dag du og noen venner er ute på sjøen, treffer dere en fortvilet fisker i en liten båt som har fått garn i propellen. Dere tilbyr fiskeren å slepe båten hans inn til en brygge. En slepeline blir festet til båten hans, og du får i oppgave å holde linen. Idet slepet starter, strammes slepelinen, og du merker at det er en trekkraft (et drag) i slepelinen som gjør at du må yte en motsatt rettet kraft for å holde den igjen. Trekkraften i slepelinen skyldes motstanden som fiskerens båt møter i vannet.

Dersom hastigheten økes, vil du merke at trekkraften/draget i slepelinen øker, og dette må bety at båtens motstand i vannet også øker. Draget i slepelinen kan man enkelt måle ved å feste slepelinen til en kraftmåler, for eksempel en fjærvekt av samme type som man benytter til å veie fisk på fisketur. Ved hjelp av vekten kan man måle trekkraften, det vil i praksis si motstanden, ved ulike slepehastigheter. Måledataene kan man plotte opp i et motstandsdiagram som viser sammenhengen mellom motstand og hastighet. Det viser seg i praksis at motstanden øker vesentlig raskere enn lineært med hastigheten, se undringsoppgave.

MÅL.

Etter å ha studert dette kapitlet skal du:

- Ha en oversikt over de viktigste motstandskomponentene som et skip møter under fart
- Kunne overføre modellmålinger til et virkelig skip
- Ha oversikt over de forskjellige typer framdriftssystemer og hvordan de virker

Undringsoppgave:

Når hastigheten til et skip ligger over en viss grense, kan vi anta at skipets motstand øker proporsjonalt med kvadratet av hastigheten.Videre kan vi anta at brenselsforbruket er proporsjonalt med motstanden. Hvor stort er brenselsforbruket pr. nautisk mil ved en hastighet lik 18 knop i forhold til forbruket ved 15 knop?

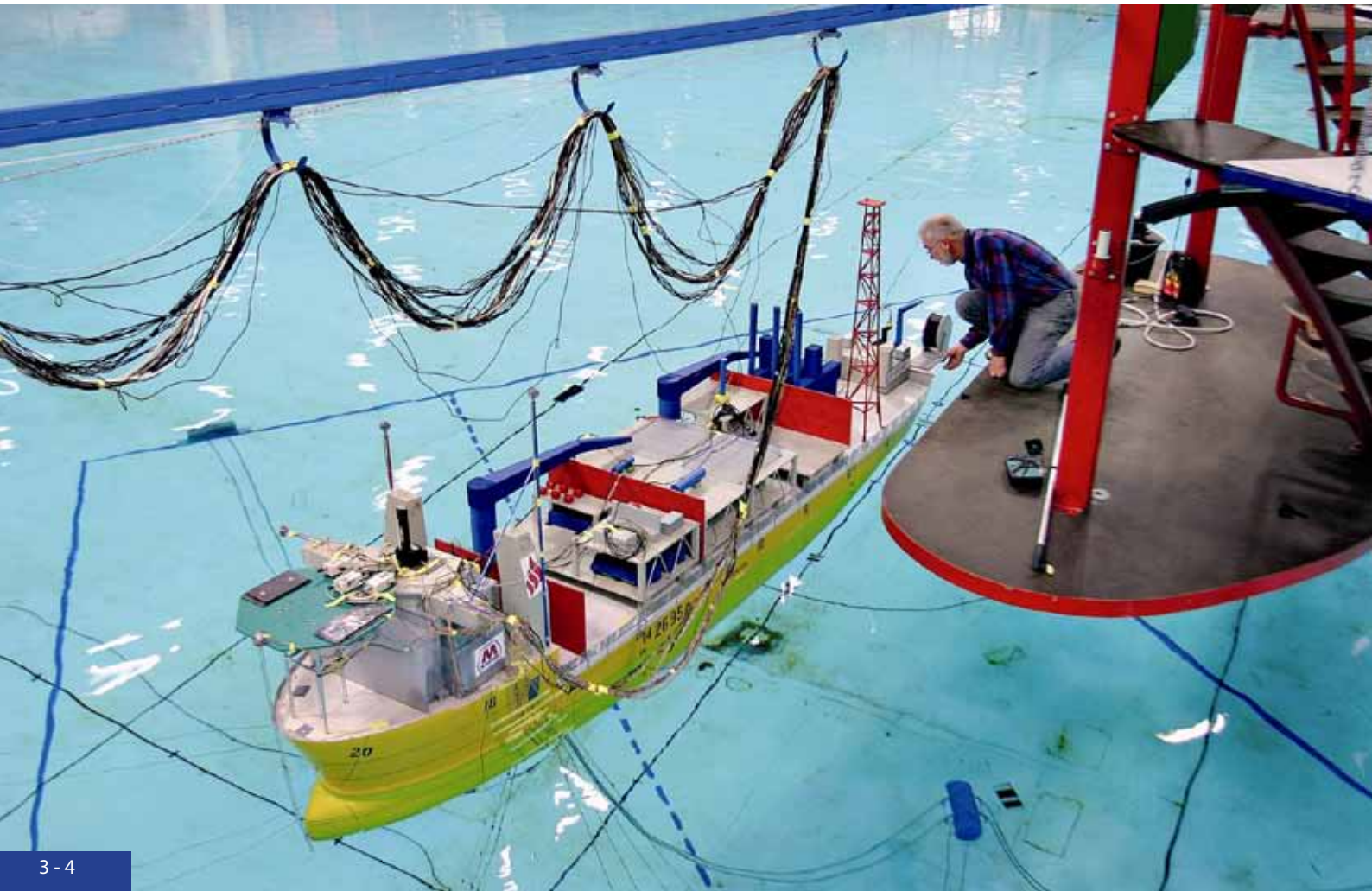
Metoder for bestemmelse av motstand for skip

Modellforsøk

Motstanden til et skip fastsettes normalt på grunnlag av modellforsøk. Modellforsøkene utføres i slepetanker med 200—300 m lengde, 10—12 m bredde og en dybde på 4—6 m. Modellene som slepes, er nøyaktige kopier av skrogene til de virkelige skipene. De lages vanligvis med lengder på 3 - 8 m og slepes med modellhastigheter i området 2—8 m/s. Modellene festes til en slepevogn som drar dem gjennom vannet. En kraftmåler måler motstanden som virker på modellen, men også modellens trim kan måles i slike modellforsøk. Motstandsdataene som foreligger etter sleping av modellen ved ulike modellhastigheter (som tilsvarer bestemte hastigheter for fullskalaskipet), gjør oss i stand til å beregne motstanden på skipet som modellen er en forminsket kopi av. Det beste estimatet man kan få på et skips motstand, er i dag å gjøre modellforsøk og skalere opp, som vist senere.

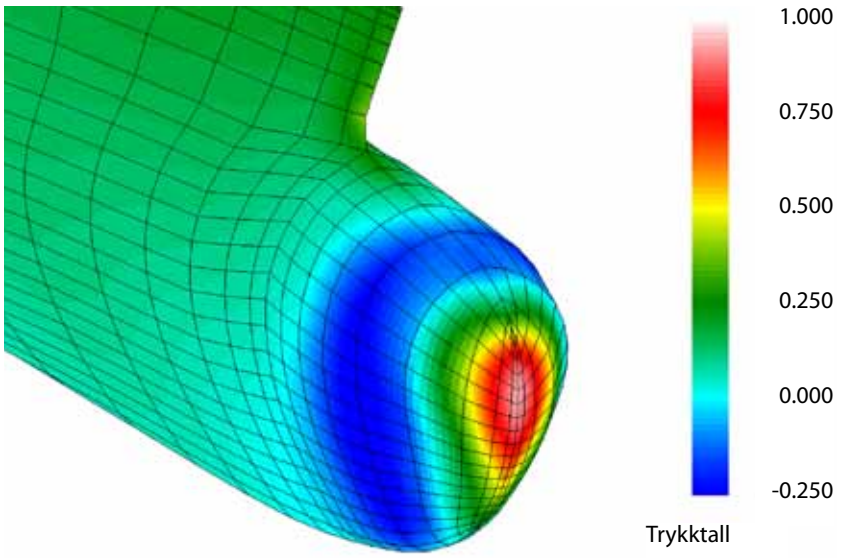
Modellforsøk brukes også til å teste skipets sjøgangsegenskaper (hvor mye skipet beveger seg i bølger), manøvreringsegenskaper (hvor lett det er å styre og kontrollere skipet), marine operasjoner (om man for eksempel kan laste olje fra en plattform i en gitt sjøtilstand), framdriftsegenskaper (hvor stort dreiemoment/skyvekraft propellen vil kreve/yte) og mye annet.

Skipsmodell klargjøres for testing i Havlaboratoriet ved Marinteknisk Senter i Trondheim



Numeriske metoder, computational fluid dynamics (CFD)

Store dataprogrammer kan benyttes for å simulere strømning rundt skip og plattformer. I programmet deles vannstrømmen inn i små celler, og det settes opp ligninger for væskehastighet og trykk i cellene. Deretter beregnes krefter, blant annet motstanden. Ligningene er basert på bevarelse av masse og bevegelsesmengde. Metoden leder til ligninger med mange millioner ukjente, og det er bare Norges kraftigste datamaskiner som kan brukes til å løse slike ligningssett.



Eksempel på simulering. *Figuren viser trykkfordeling forårsaket av strømningen rundt bulben på et skip. De viste trykktallene beskriver trykkene i forhold til en basisverdi. Stort tall svarer til høyt trykk, negativt tall til undertrykk.*

Empiriske metoder

Gjennom tidene er det gjort mange modellforsøk og fullskalaforsøk hvor man har målt motstand. Resultater fra slike forsøk er samlet og brukt til å lage formler som estimerer motstanden på lignende konstruksjoner. Input til slike formler er for eksempel hoveddimensjoner (lengde, bredde, osv.), blokkoeffisient og lengde på bulb. Et slikt formelsett som er mye brukt, er laget av Holtrop. Dette er inkludert i dataprogramet som vi kommer tilbake til på side 3-14.

Motstand og øvrige designparametere

Det arbeides stadig mye med å utarbeide gunstige skrogformer som reduserer motstanden som skip møter i vannet. Skip med liten motstand er billigere i drift, da de benytter mindre drivstoff for å opprettholde samme hastighet. Reduserte drivstoffkostnader vil i framtiden bli en viktigere konkurransefaktor enn tilfellet er i dag, ettersom skipsfarten blir stadig sterkere preget av internasjonal konkurranse, økte brenselskostnader og synkende fortjenestemarginer. Miljøbetraktninger er også meget sentrale i samme forbindelse. Ved utforming av skrog må man imidlertid også ta hensyn til andre forhold enn motstanden. Sjødyktighet, stabilitet, manøvrerbarhet og dødvekt er også viktige egenskaper ved skip, og den endelige skrogformen er derfor et resultat av en optimalisering når det gjelder alle disse forholdene. Det er derfor ikke sikkert at den endelige skrogformen er den beste med hensyn til motstand.

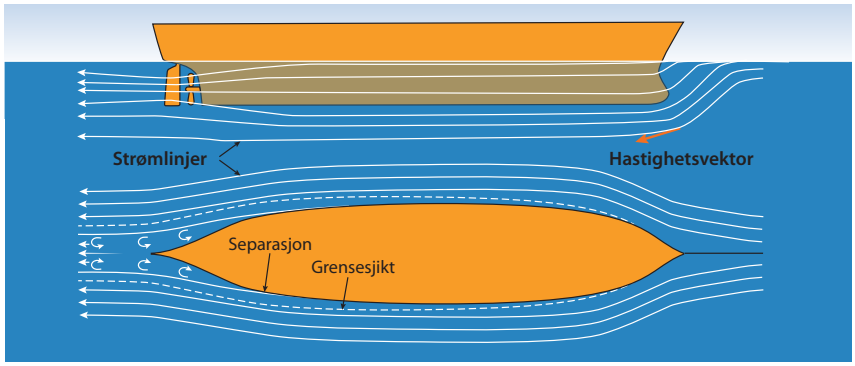
Undringsoppgave:

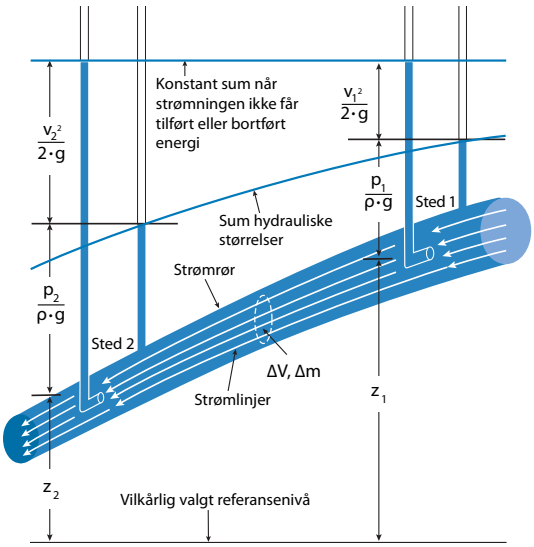
Hvilke fordeler og ulemper tror du man får om man skal benytte en beregning på datamaskinen i stedet for modellforsøk ?

Grunnleggende hydrodynamikk

Strømlinjer. Bernoullis ligning. Viskositet

Strømlinjer og hastighets-vektorer rundt et skipsskrog





Illustrasjon av Bernoullis ligning
Når et skip beveger seg i sjøen, vil det i alle områder rundt skipet oppstå bevegelser i vannet. Disse bevegelsene kan beskrives ved hjelp av såkalte strømlinjer. Vi tenker oss nå at strømlinjer foran skipet opptrer som vist. For å illustrere Bernoullis ligning på en pedagogisk god måte, samler vi en "bunt" av strømlinjene i et tenkt "strømrør" som vist. Videre tenker vi oss at vi måler trykk på forskjellige steder i strømrøret. Vi gjør dette ved å bruke glassrør plassert på to forskjellige måter: enten slik at strømpartiklene glir forbi åpningen på rørene eller slik at de samler seg opp i disse. I siste tilfelle får vi med også såkalt dynamisk trykk i strømmen.

Strømlinjer

Det er ofte behov for å illustrere hvordan en strømning forløper rundt et legeme i en væskestrøm, for eksempel et skipsskrog. Dette kan gjøres ved hjelp av såkalte strømlinjer. En strømlinje er en linje som en tenkt partikkel vil følge, se figur. Hastighetsvektoren er alltid tangentiell til strømlinjen som partikkelen følger. Det vil være en konstant strømningsmengde mellom to strømlinjer.

Bernoullis ligning

Bernoullis ligning er viktig både når vi skal forklare for eksempel hvorfor det dannes bølger rundt skip og hvordan hydrofoiler og propeller virker.

For partikler som beveger seg langs en strømlinje, vil både hastighet (v), høydebeliggenhet i tyngdefeltet (z) og trykk (p) kunne forandres. Bernoullis ligning tar utgangspunkt i at summen av tilhørende energiformer er konstant. Ser vi på en partikkelsamling med masse Δm og volum ΔV som beveger seg langs strømlinjen, kan vi derfor skrive:

$$\text{kinetisk energi} + \text{stillingsenergi} + \text{trykkenergi} = \text{konstant}$$

$$\frac{1}{2} \cdot \Delta m \cdot v^2 + \Delta m \cdot g \cdot z + p \cdot \Delta V = \text{konstant}$$

Leddene for både kinetisk energi og stillingsenergi er velkjente fra Fysikk 1, kapitlet om arbeid og energi. Når det gjelder begrepet trykkenergi, vises til kapitlet om termofysikk. Her er påvist at den energi som skal til for å presse et volum ΔV inn i et rom som står under trykk p, nettopp er $p \cdot \Delta V$. Ved å dividere alle ledd med ΔV, får vi følgende, vanlige form på Bernoullis ligning (trykkform):

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot z + p = \text{konstant}$$

Alle ledd har her *trykk* som måleenhet ($N/m^2 = Pa$). Det første leddet kaller vi da gjerne dynamisk trykk. Det midterste leddet kan vi kalle "stillingstrykk" (eller kanskje "reservetrykk"). Det siste leddet gir det egentlige væsketrykket (statisk trykk) på det aktuelle stedet. Divideres alle ledd med $\rho \cdot g$, framkommer ligningen på såkalt *høydeform*. Denne formen er brukt i illustrasjonen av Bernoullis ligning i margen. Det vises for øvrig til eksemplet på neste side.

Eksempel 3.1. Anvendelse av Bernoullis ligning. Følgende data gjelder i figuren på forrige side. Vi kan regne med tetthet 1000 kg/m^3.

Trykk; $p_1 = 0{,}15$ bar

Hastigheter: $v_1 = 2{,}0$ m/s og $v_2 = 6{,}0$ m/s

Forskjell i høyder over referansenivå: $z_1 - z_2 = 5{,}1$ m.

a) Beregn trykk på sted 2 (p_2). Regn i bar (1 bar = 10^5 Pa)

b) Beregn dynamisk trykk på stedene 1 og 2. Regn i bar

c) Hvorfor er det en grov feil å sette $p_2 = p_1 + \rho \cdot g \cdot (z_1 - z_2)$?

Løsning:

a) Vi tar for oss ligningen på trykkform og løser ut p_2 fra denne:

$$p_2 = p_1 + \rho \cdot g \cdot (z_1 - z_2) + \tfrac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_1^2 - v_2^2)$$

Innsetting av verdiene ovenfra, utregning og overføring til bar, gir:

$$p_2 = 0{,}15 \text{ bar} + 0{,}25 \text{ bar} + (-0{,}16) \text{ bar} = \underline{0{,}24 \text{ bar}}$$

b) $p_{d1} = \tfrac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 = \tfrac{1}{2} \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot (2 \text{ m/s})^2 \cdot 10^{-5} \text{ bar/Pa} = \underline{0{,}02 \text{ bar}}$

$p_{d2} = \tfrac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 = \tfrac{1}{2} \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot (6 \text{ m/s})^2 \cdot 10^{-5} \text{ bar/Pa} = \underline{0{,}18 \text{ bar}}$

c) Da ville vi fått: $p_2 = 0{,}15 \text{ bar} + 0{,}25 \text{ bar} = 0{,}40$ bar, i stedet for 0,24 bar. Tar vi derimot med de dynamiske trykkene, får vi samme svar som i punkt a). **Når vi har med en strømning å gjøre, må vi også ta hensyn til dynamiske trykk. Hydrodynamikk er noe helt annet enn hydrostatikk, som gjelder når væsken er i ro.**

Viskositet

Væskers seighet. Viskositet sier noe om en væskes seighet, det vil si hvor stor indre friksjon det er i væsken. Slik indre friksjon medfører at et legeme som slepes med en gitt hastighet gjennom væsker med ulik viskositet, vil møte ulik friksjon. For eksempel vil motstanden som legemet får i sirup være vesentlig større enn den det møter i vann. Sirup har en mye større viskositet enn vann.

Seigheten i væsker kommer av kohesjonskreftene mellom molekylene. Disse avtar ved økende temperatur, og dermed avtar også viskositeten.

Bestemmelse av væskers seighet. I prinsippet kan væskers seighet bestemmes som vist i figur. Et legeme er skilt fullstendig fra underlaget ved et tynt skikt av den væsken som skal undersøkes. Et lodd har en tyngde G som er valgt slik at det gir en konstant hastighet på det glidende legemet. Dermed vil tyngden G gi et snordrag F som svarer til friksjonen som oppstår på grunn av væskens viskositet. På grunn av adhesjonskrefter mellom væskens molekyler og flatene på begge sider av væskeskiktet, vil molekylene nærmest underlaget holde seg i ro, mens molekylene nærmest legemet beveger seg med samme hastighet som dette. Vi forutsetter at sjiktet er så tynt at hastighetsprofilen blir lineær, se forstørret figur.

Gjør vi forsøk med ulike tykkelser og arealer på væskesjiktet, vil vi finne at friksjonen er proporsjonal med arealet (A) og hastighetsgradienten (v/y). Proporsjonalitetskonstanten kaller vi væskens absolutte viskositet eller bare viskositet, og vi symboliserer den med μ. Vi skjønner at denne konstanten må ha enheten $N \cdot s/m^2$ eller $kg/(m \cdot s)$.

$$\text{Viskositet } \mu = \frac{F}{A \cdot \frac{v}{y}} \left[\frac{N \cdot s}{m^2} = \frac{kg}{m \cdot s} \right]$$

Viskositet kan også oppgis som: $\nu = \mu/\rho$ [m^2/s]. Da kaller vi den for kinematisk viskositet.

Tetthet og viskositet for vann og luft ved 15°C og 1 atm

Tetthet

Ferskvann: $\rho = 999$ kg/m^3

Saltvann: $\rho = 1025$ kg/m^3

Luft: $\rho = 1{,}23$ kg/m^3

Viskositet (dynamisk):

Ferskvann: $\mu = 1{,}135 \cdot 10^{-3}$ kg/(m·s)

Saltvann: $\mu = 1{,}218 \cdot 10^{-3}$ kg/(m·s)

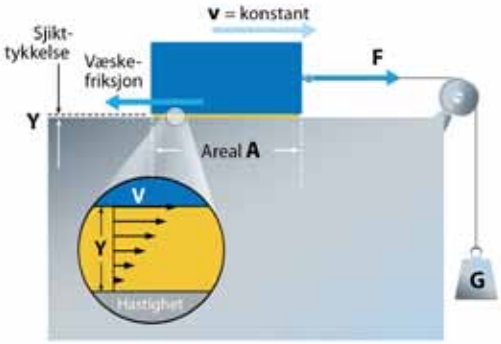
Luft: $\mu = 1{,}8 \cdot 10^{-5}$ kg/m^3

Kinematisk viskositet:

Ferskvann: $\nu = 1{,}136 \cdot 10^{-6}$ m^2/s

Saltvann: $\nu = 1{,}219 \cdot 10^{-6}$ m^2/s

Luft: $\nu = 15 \cdot 10^{-5}$ m^2/s



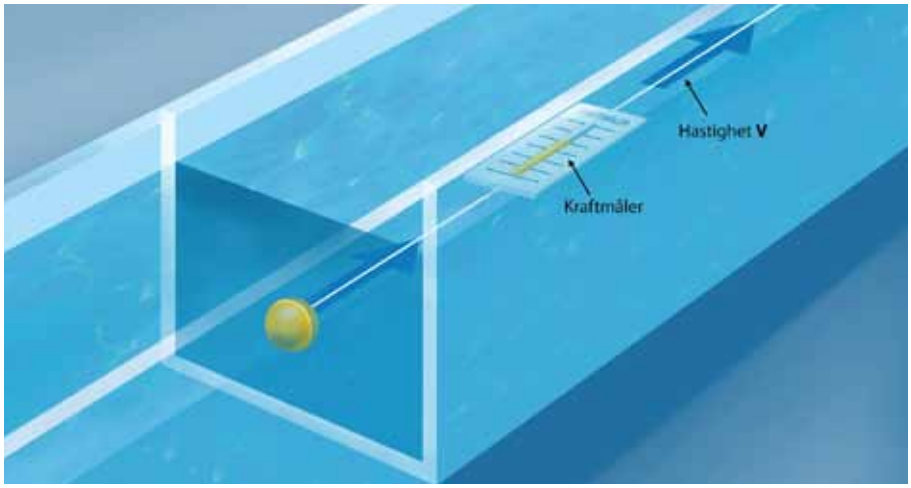
Prinsipiell metode for bestemmelse av viskositet i meget seige væsker *(for eksempel olje og sirup). For vann og andre væsker med liten seighet brukes i stedet såkalte viskosimetere. Her måles tiden som ei kule bruker på å falle en bestemt lengde i et vertikalt glassrør fylt med den aktuelle væsken. Glassrøret har en diameter som bare er litt større enn diameteren på kula.*

Undringsoppgave:

Hva er forskjellen på hydrodynamikk og hydrostatikk?

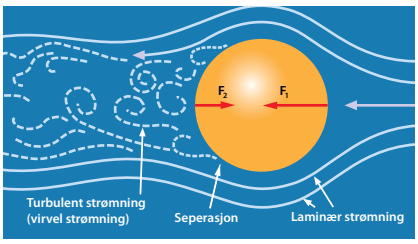
Grunnleggende hydrodynamikk

Motstand for neddykket kule og andre legemer



Måling av motstand for en neddykket kule i forskjellige hastigheter.

På figuren til venstre ser vi en kule som dras med konstante hastigheter på så dypt vann at det ikke danner seg bølger på overflaten. Kulen har samme tetthet som vann. Vi er interessert i å finne den motstand F som kulen møter under bevegelsen og hva det er som bestemmer denne motstanden. Den måles ved hjelp av en kraftmåler.



***Strømning og motstand for kule i vann**. To hovedformer: I laminær strømning beveger væskepartiklene seg i velordnede sjikt ved siden av hverandre. I turbulent strømning oppstår det i tillegg til hovedbevegelsen vekslende, ukontrollerte, små virvelbevegelser. Disse oppstår på baksiden av kulen. Strømlinjene blir her separert fra kulen, og trykket i væsken blir mindre enn på forsiden. Dermed blir summen av trykkreftene som virker på forsiden større enn kraftsummen på baksiden. Kulen merker differensen som en "trykkmotstand" (R_{trykk}) når den dras gjennom vannet. I tillegg møter den også en friksjonsmotstand (R_{frik}) på overflaten. For ikke-strømlinjedeformede legemer er det imidlertid trykkmotstanden som dominerer. Begge typer motstand vil bli tatt med i den målemetoden som er skissert øverst. Samlet motstand kan altså settes $R_d = R_{trykk} + R_{frik} \sim R_{trykk}$, hvor $R_{trykk} = |F_1| - |F_2|$*

Dimensjonsanalyse og dimensjonsløse grupper.

Vi kan tenke oss at det er fire fysiske størrelser som bestemmer den femte størrelsen, motstanden R_d (R = resistance)

- kulens diameter, D (m)
- kulens hastighet, v (m/s)
- vannets tetthet, ρ (kg/m^3)
- vannets viskositet (seighet), μ (kg/(m · s), se siden foran

Vi ønsker å kartlegge den virkning som disse fire størrelsene har på friksjonsmotstanden R_d. To av størrelsene, vannets tetthet og viskositet, synker litt med temperaturen, men dette er så lite at vi i praksis kan betrakte dem som konstante størrelser. Dermed er det først og fremst virkningen av varierende diameter D og varierende strømningshastighet som må undersøkes eksperimentelt. For å få full oversikt kunne vi da gjøre f. eks. 10 forsøk med ulike strømningshastigheter og samme kule. Så kunne vi gjenta forsøksserien med 9 andre kulediametere. Alt dette ville i så fall krevd totalt 100 forsøk og 10 grafer for presentasjon av resultatene. Det er imidlertid mulig å gå fram på en "lurere" måte. Vi kan nemlig samle to eller flere størrelser i dimensjonsløse grupper.

Det er viktig at gruppene er dimensjonsløse. Med det mener vi at alle størrelsene skal inngå som faktorer eller divisorer på en måte som medfører at grunnenhetene kan forkortes bort, se nedenfor.

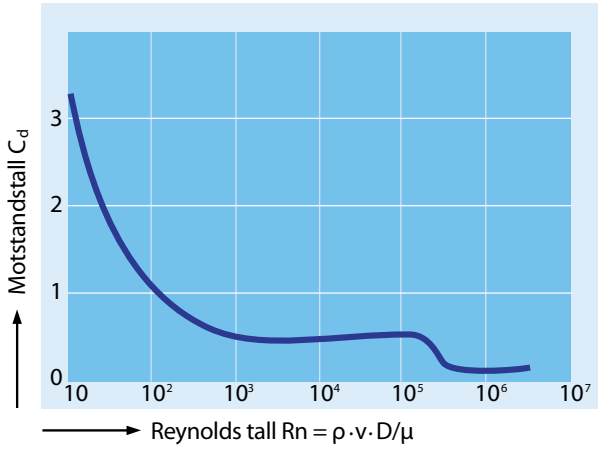
I vårt aktuelle problem kan dette gjøres ved å opprette følgende to *dimensjonsløse* grupper:

$$\text{Gruppe 1} = \frac{R_d}{\frac{1}{2}\cdot\rho\cdot v^2\cdot\frac{\pi}{4}\cdot D^2} \left[\frac{\text{kg}\cdot\text{m/s}^2}{(\text{kg/m}^3)\cdot(\text{m/s})^2\cdot\text{m}^2} = 1\right]$$

$$\text{Gruppe 2} = \frac{v\cdot D\cdot\rho}{\mu} \left[\frac{(\text{m/s})\cdot\text{m}\cdot(\text{kg/m}^3)}{\text{kg/(m}\cdot\text{s)}} = 1\right]$$

Motstandstall og Reynolds tall

Det er vanlig å kalle den første gruppen for motstandstall og symbolisere den med C_d. Den andre dimensjonsløse gruppen kaller vi Reynolds tall og symboliserer den med Rn (engelsk: Reynolds number). Siden gruppene er dimensjonsløse, kommer de altså ut som rene tallverdier. Nå blir det tilstrekkelig å gjennomføre *en eneste forsøksserie* med forskjellige Reynolds tall (som kan varieres for eksempel ved å variere strømningshastigheten), beregne motstandstallet etter formelen for gruppe 1 og framstille resultatene som vist i figur til høyre. Totalt blir det nå altså tilstrekkelig med ca. 10 forsøk. Likevel gir denne *ene grafen* nå *full oversikt* over hele problemkomplekset som knytter seg til motstanden for en kule som beveger seg i et medium, enten det dreier seg om en stor eller liten kule som beveger seg i vann eller sirup, og den har liten eller stor hastighet.



Motstand på kule
Motstandstall som funksjon av Reynolds tall for kule som beveger seg på dypt vann (uten bølgedannelse på overflaten).

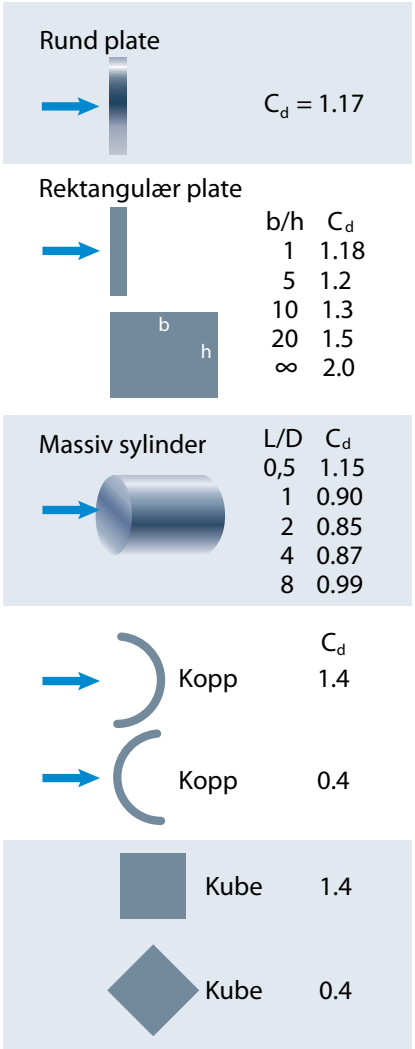
Når vi i gruppe 1 har tatt med brøken 1/2, er det for å kunne "koble" motstandstallet til den størrelsen som vi kaller dynamisk trykk, se side 3-6. Tilsvarende vil vi også koble det til et karakteristisk areal for legemet. Derfor har vi tatt med π/4 i gruppe 1, slik at vi kan bruke projisert areal i strømningsretningen, i dette tilfelle arealet av en sirkel.

Sammendrag

Det er ofte behov for å kunne beregne motstanden av legemer som flyttes under vann i fullt neddykket tilstand. Eksempler på typiske motstandstall for noen legemer er vist i margen. Når motstandstallet er kjent, fra tabeller eller eksperimenter med modeller, kan motstanden i N for et legeme beregnes av følgende ligning:

$$R_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot C_d \qquad [N]$$

ρ = tetthet av strømningsmediet, kg/m³. Ligningen kan også brukes i luft, eksempelvis for overbygningen på et skip. Fysiske data for vann og luft er gitt på side 3-7
v = relativ hastighet mellom legeme og medium, m/s
A = projisert areal i strømningsretningen, m²
C_d = motstandstall for legemet, ubenevnt. Omfatter både trykk- og friksjonsmotstand; for ikke-strømlinjeformede legemer er trykkmotstanden klart dominerende, verdier finnes i tabeller eller bestemmes av modelleksperimenter. Tallet er avhengig av om strømningen er laminær eller turbulent, noe som bestemmes av Reynolds tall:
R = ρ · v · legemets karakteristiske lengdedimensjon / μ.



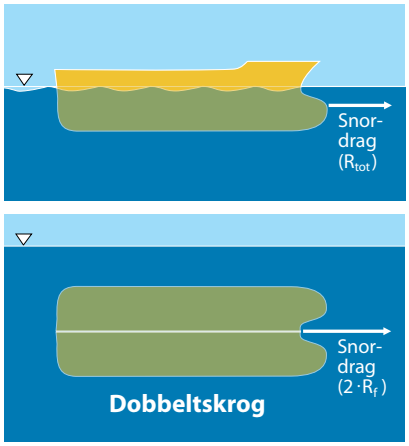
Motstandstall C_d for noen legemer ved Rn > 10^4. *Ofte kalles C_d for dragkoeffisient. Fra [3.6]*

To hovedtyper motstand:

Friksjonsmotstand og bølgemotstand. Beveger et legeme seg på *overflaten* av en væske i stedet for neddykket i væsken, vil det dannes bølger. Vi vet at bølger egentlig er forplantning av energi. Denne energien må hentes fra legemet selv, som dermed vil merke en ekstra motstand i tillegg til friksjonsmotstanden. Denne motstanden kaller vil bølgemotstand. Vi skal i det følgende studere nærmere både friksjonsmotstanden og bølgemotstanden for skip.

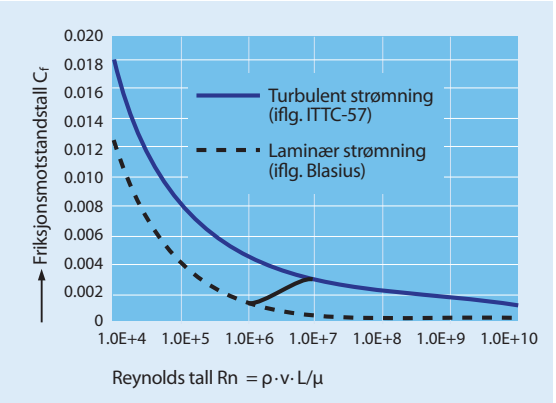
Grunnleggende hydrodynamikk

Friksjons- og bølgemotstand for skip Reynolds tall og Froudes tall



Bestemmelse av totalmotstand (R_{tot}), friksjonsmotstand ($2 \cdot R_f$) og bølgemotstand ($R_W = R_{tot} - R_f$) for en skipsmodell

Egentlig vil den målte motstanden på det neddykkede dobbeltskroget også omfatte et ledd med trykkmotstand, slik som beskrevet for kulestrømningen på side 3-8. I motsetning til en kule er imidlertid et skip strømlinjeformet, og da er det friksjonsmotstanden som klart dominerer. Derfor bruker vi dette ordet i det etterfølgende når det gjelder skip.



Friksjonsmotstandstall for strømning forbi skipsskrog som funksjon av Reynolds tall. Strømningen går over fra laminær til turbulent i området $Rn = 10^6 - 10^7$.

Måling av friksjonsmotstand og bølgemotstand

Vi kan måle motstandene ved å bruke skipsmodeller som vist på figuren. Dette kan gjøres ved først å måle motstanden når skipsmodellen slepes med en dypgang som svarer til den som fullskalaskipet normalt vil gå med. Denne totalmotstanden omfatter nå både bølgemotstanden og friksjonsmotstanden for den delen av skroget som befinner seg under vann. Deretter kan vi måle kun friksjonsmotstanden ved å lage en "dobbeltmodell" (se figur) som slepes på så dypt vann at det ikke dannes bølger under bevegelsen. Friksjonsmotstanden for den modellen som ble slept i vannflata, vil nå bli lik halvparten av "dobbeltmodellens" motstand. Når denne halvparten så subtraheres fra totalmotstanden, har vi fått bestemt også bølgemotstanden.

Friksjonsmotstand for deplasementsskip

Deplasementsskip defineres som gitt på side 3-18. Vi bruker samme resonnementer som forklart tidligere for kulen. Det projiserte arealet ($\pi \cdot D^2/4$) og "lengdedimensjonen" av kula (D) må imidlertid for "slanke" legemer erstattes av henholdsvis skrogets "våte" overflate (S) og lengde (L, som regel brukes her lengde i vannlinjen). Dermed definerer vi for skip:

$$\text{Friksjonsmotstandstall} \quad C_f = \frac{R_f}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S}$$

$$\text{Reynolds tall} \quad Rn = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu}$$

Måler vi friksjonsmotstanden R_f ved forskjellige hastigheter (og beregner tilhørende Reynolds tall), framkommer friksjonsmotstandstall som vist i graf i figur til venstre. Slike forsøk har vært gjort for en rekke ulike deplasementsskip, og en middelverdi av disse kan med god tilnærming beskrives ved hjelp av følgende erfaringsformel (fra ITTC-57):

$$\text{Friksjonsmotstandstall} \quad C_f = \frac{0{,}075}{(\log Rn - 2)^2}$$

Bølgemotstand for deplasementsskip. Froudes tall

Bølgemotstand kommer av at et skip i bevegelse danner bølger på vannoverflaten. Bølgeenergien hentes fra skipet selv, som dermed merker en ekstra motstand i tillegg til friksjonsmotstanden.

Det vil nå være andre størrelser som er med på å bestemme bølgemotstanden enn de som motstanden av neddykkede legemer var avhengig av. Vannets viskositet spiller ikke noen rolle for bølgedannelse. Det gjør derimot tyngdeakselerasjonen, som dermed må tas inn som en ny størrelse av betydning. Dermed kan vi tenke oss at bølgemotstand omfatter følgende størrelser som på en eller annen måte virker inn på problemkomplekset:

- bølgemotstand, R_b ($N = kg \cdot m/s^2$)
- karakteristisk lengde av modellen, L (m)
- modellens "våte" overflate, S (m^2)
- modellens hastighet, v (m/s)
- vannets tetthet, ρ (kg/m^3)
- tyngdeakselerasjonen, g (m/s^2)

Som tidligere undersøker vi nå hvordan vi kan samle størrelsene i grupper slik at disse blir *dimensjonsløse* samtidig som alle blir tatt med minst én gang. Vi finner:

$$\text{Gruppe 1} = \frac{R_b}{\frac{1}{2}\rho v^2 \cdot S}\left(\frac{kg \cdot m/s^2}{(kg/m^3)\cdot(m/s)^2 \cdot m^2} = 1\right)$$

$$\text{Gruppe 2} = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}}\left(\frac{m/s}{\sqrt{(m/s^2)\cdot m}} = 1\right)$$

Det er vanlig å kalle den første gruppen for bølgemotstandstallet og symbolisere den med C_W (engelsk: wave coefficient). Den andre gruppen kaller vi Froudes tall, Fn. Ved å gjennomføre forsøk ved diverse hastigheter som beskrevet foran, kan det fastlegges *én* graf for et skips bølgemotstandstall som funksjon av Froudes tall. Denne har form som vist i figur. Tallfesting av en typisk graf vises på side 3-13.

Bølgedannelse ved deplasementsskip.
Bølgedannelsen rundt skip i fart er komplisert, og vi har bare plass til en meget kortfattet forklaring. Ved skipets baug vil det hope seg opp vann, mens det normalt oppstår en nivåsenkning på midtre partier og en nivåheving igjen ved akterenden, se nederste figur i margen. Baugen og akterenden vil sette opp hvert sitt bølgesystem med spredebølger og tverrbølger, se figur. Bølgesystemene vil interferere, og ved bestemte skipshastigheter framkommer det som i kapittel 1 er kalt konstruktive og destruktive interferenser. Ved konstruktiv interferens vil bølgene ha ekstra mye energi, noe som må bety en større bølgemotstand enn forventet. Dette gjenspeiler seg som en rødfarget "hump" ved N=1 på grafen for bølgemotstandstallet. Tilsvarende gir en situasjon med destruktiv interferens en "dump" i grafen som vist ved N=2. Det samme gjentar seg ved N=3 og N=4.

Sammendrag

Bølgemotstanden for et skip beskrives ved hjelp av ligningen:

$$R_w = \frac{1}{2}\ \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot C_w\ (N)$$

Bølgemotstanden øker altså kraftig med hastigheten, både fordi denne kvadreres og fordi bølgemotstandstallet øker med Froudes tall og dermed farten. Dette tallet baseres på skipets lengde L og defineres slik:

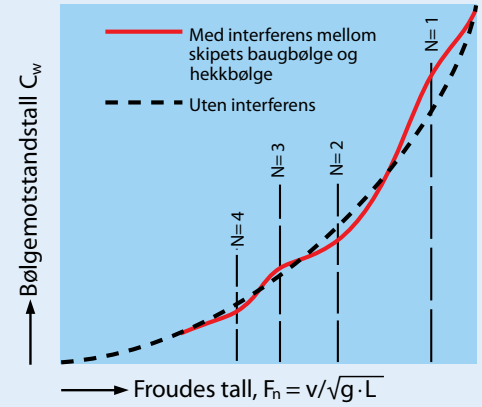
$$Fn = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}}$$

Når det gjelder friksjonsmotstanden, kan denne beskrives av en tilsvarende ligning:

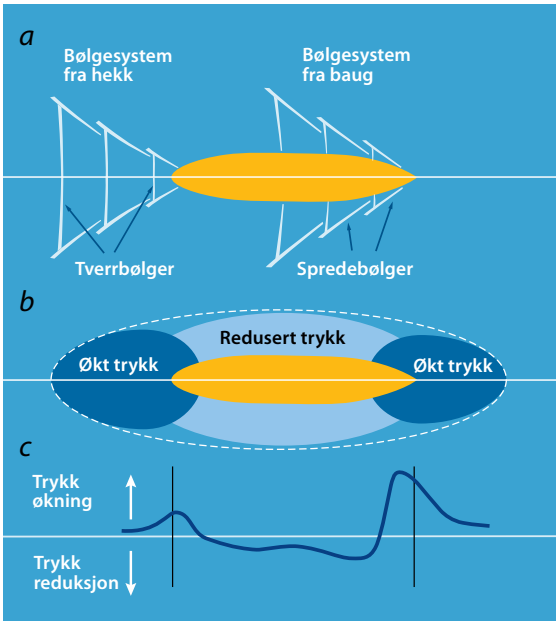
$$R_f = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot C_f\ (N)$$

Friksjonsmotstandstallet C_f kan enten beregnes av ITTC erfaringsformelen på forrige side eller finnes av modellforsøk med dobbeltskrog, som beskrevet foran.

Til slutt summeres friksjonsmotstanden og bølgemotstanden for å bestemme den samlede motstanden på skipet. Vi skal i det etterfølgende se nærmere på hvordan dette kan gjøres. Foreløpig merker vi oss at de har helt ulike karakteristikker. Friksjonsmotstanden avtar med skipets fart, mens bølgemotstanden øker kraftig med farten.



Typisk graf for bølgemotstandstall (C_w) som funksjon av Froudes tall (Fn) for et deplasementsskip.
Avvikene fra glatt graf skriver seg fra interferens mellom skipets bølgesystemer.



a. Bølgedannelse ved skip i fart *Bølgene utgår fra økt trykk (høyt vannivå) ved baug og akterut.*
b) Trykkforhold i vannet rundt skip i fart. *Undertrykk (sug) langs og under midtre partier av skroget. Se også figur a på side 8-5.*
c) Vannivåer langs et skip i fart (på dypt vann), *beregnet av Bernoullis ligning på høydeform (nivåform), se side 3-6. Se også figur a på side 8-5.*

Deplasementsskip

Motstandstall og beregning av total-motstanden

Vi har foran sett at et skip vil møte både friksjonsmotstand og bølge-motstand når det er i fart. Det er imidlertid også andre typer mot-stander som opptrer, men de som er nevnt, er klart de to største.

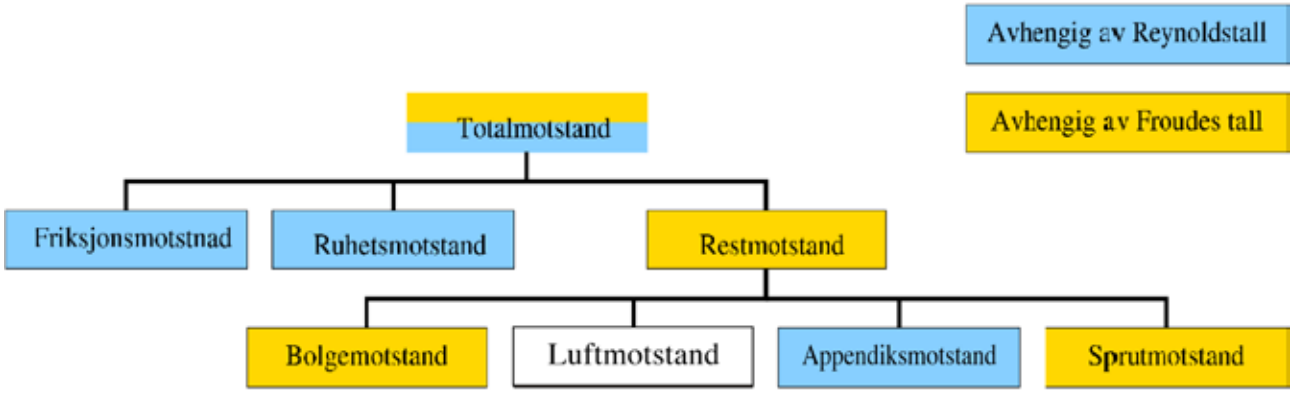
Totalmotstand for skip

Figuren nedenfor gir en komplett oversikt over alle komponenter som et skips totalmotstand omfatter. Her framgår også om det er Reynolds tall eller Froudes tall som de enkelte komponentene er avhengige av.

Når det gjelder friksjonsmotstanden, ser vi av figuren at det kommer en såkalt ruhetsmotstand i tillegg til den motstanden vi har behandlet hittil. Ruhetsmotstanden forårsakes av ujevnheter i skroget. Disse kan skyldes selve framstillingen, men senere skader i maling og rust samt begroing spiller også inn. En slik ruhetsmotstand vil ikke opptre under modellprøving og må adderes separat, basert på erfaringsverdier. Selv om ruhetsmotstanden er av betydning i praktisk drift av et skip, behandler vi ikke denne nærmere her.

Når det gjelder bølgemotstanden, ser vi videre at det er vanlig å legge denne inn i en "samlepost"som vi kaller restmotstand, og som omfatter følgende tillegg til den vanlige bølgemotstanden:

- *Luftmotstand* på alle arealer over vannflaten. Denne forårsakes både av friksjon fra lufta som strømmer forbi skrog og overbygning og den ujevne trykkfordeling som denne strømningen gir (større trykk på frontarealer enn på bakre arealer).
- *Appendiksmotstand* fra utvendig tilleggsutstyr på skipsskroget, som for eksempel rorbraketter, stabilisatorer og slingrekjøler.
- *Sprutmotstand*. Som for bølger, inneholder sprut energi som må hentes fra skipet selv

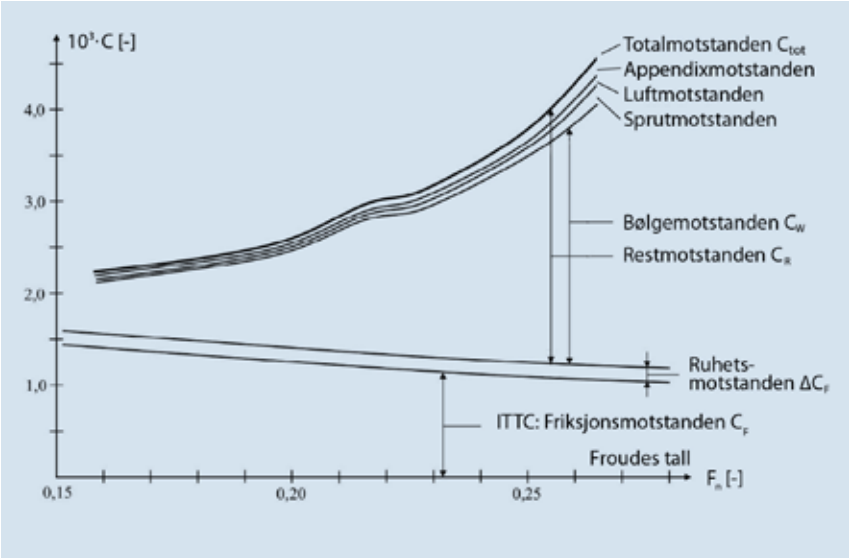


Oppdeling av et skips totalmot-stand i komponenter

Som vi ser av figur på neste side, bidrar de nevnte tilleggene ikke noe vesentlig til totalmotstanden. Vi kan ikke gå for mye i detalj i denne boka og samler alle motstandene som er avhengige av Froudes tall. Siden det er et skips bølgedannelse som er det klart største bidraget til disse "Froude-avhengige" komponentene, vil vi av pedagogiske grunner heretter kalle restmotstanden for bølgemotstand.

Motstandstall som funksjon av hastighet

Alle motstandstallene er framstilt grafisk i figur nedenfor. Her er Froudes tall brukt som fri variabel. Som vi nå vet, er imidlertid dette tallet proporsjonalt med hastigheten, og for et gitt skip kan derfor figuren suppleres med en egen akse med hastigheten som fri variabel.



Typiske motstandstall for totalmotstand og de enkelte motstandskomponenter for deplasementsskip (middelverdi av flere skip)

Overslagsberegning av et skips totale motstand

Slike overslagsberegninger kan enkelt gjøres ved å sette inn verdier for totalmotstandstallet (C_{tot}) fra grafen ovenfor i ligningen

$$R_{tot} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \quad C_{tot} \ (N)$$

Eksempel 3.2. Bruk grafen for totalmotstandstallet i figuren ovenfor til å gjøre en "grov" overslagsberegning av totalmotstanden i saltvann ved 15 og 18 knop for et skip med volumdeplasement $\nabla = 100000\ m^3$ og en lengde $L_{VL} = 240$ m. Våt overflate er beregnet til cirka $S = 14 \cdot 10^3\ m^2$

$$\text{Hastighet : } v = 15 \text{ knop} = 15 \frac{\text{n.mil}}{\text{h}} \cdot 1852 \frac{\text{m}}{\text{n.mil}} \Big/ 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} = 7{,}72 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Hastighet i m/s ved 18 knop $v = 7.72$ m/s $\cdot\ 18/15 = 9{,}26$ m/s

Froudes tall, 15 knop: $F_n = \dfrac{7{,}72 \text{ m/s}}{\sqrt{9{,}8 \text{ m/s}^3 \ \ 240 \text{ m}}} = 0{,}159$

Froudes tall,18 knop: $F_n = 0{,}159 \cdot 18/15 = 0{,}191$

Totalmotstandstall ved 15 knop, fra graf: $C_{tot} = 2{,}25 \cdot 10^{-3}$
Totalmotstandstall ved 18 knop, fra graf: $C_{tot} = 2{,}47 \cdot 10^{-3}$

Totalmotstand ved 15 knop:

$$R_{tot} = \frac{1}{2} \cdot 1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (7{,}72 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \cdot 14 \cdot 10^3\ \text{m}^2 \cdot 2{,}25 \cdot 10^{-3} = \textit{962 kN}$$

Totalmotstand ved 18 knop:

$$R_{tot} = \frac{1}{2} \cdot 1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (9{,}26 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \cdot 14 \cdot 10^3\ \text{m}^2 \cdot 2{,}47 \cdot 10^{-3} = \textit{1520 kN}$$

Undringsoppgave:

Grafene på figuren ovenfor gjelder for deplasementsskip. Hvilken virkning tror du overgang til planende båt vil ha på grafene for friksjonsmotstanden og bølgemotstanden?

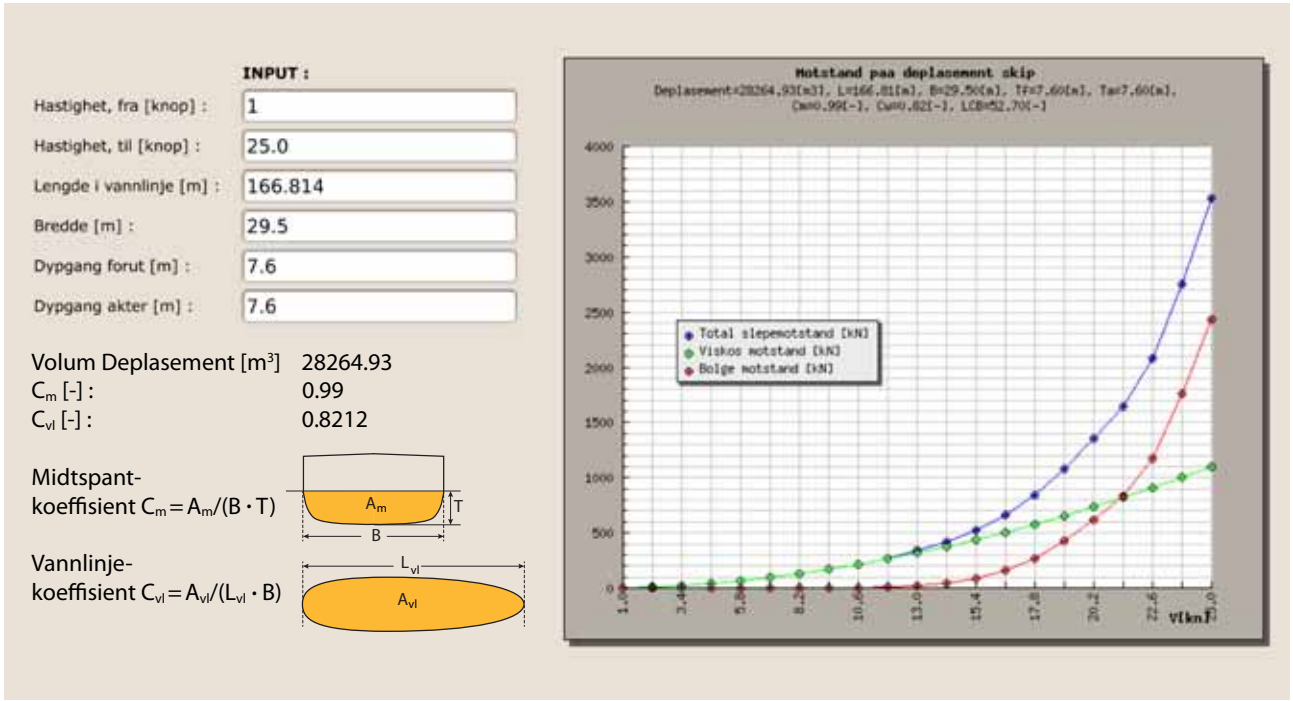
Deplasementsskip

Bruk av dataprogram for beregning av motstand og effektbehov

Det finnes tilgjengelige dataprogrammer som gjør det mulig å gjøre nøyaktigere beregninger av motstanden for et nytt skip enn de overslagsberegninger som er vist foran. Slike dataprogrammer tar hensyn til detaljer i skrogformen i større grad enn det er gjort i figuren på forrige side, hvor grafen for totalmotstandstallet bare er å betrakte som et gjennomsnitt for typiske deplasementsskip. Slike dataprogrammer beregner dessuten skipets våte overflate vesentlig nøyaktigere enn den metode som lå til grunn i eksemplet foran.

Beregning av motstand ved hjelp av dataprogram

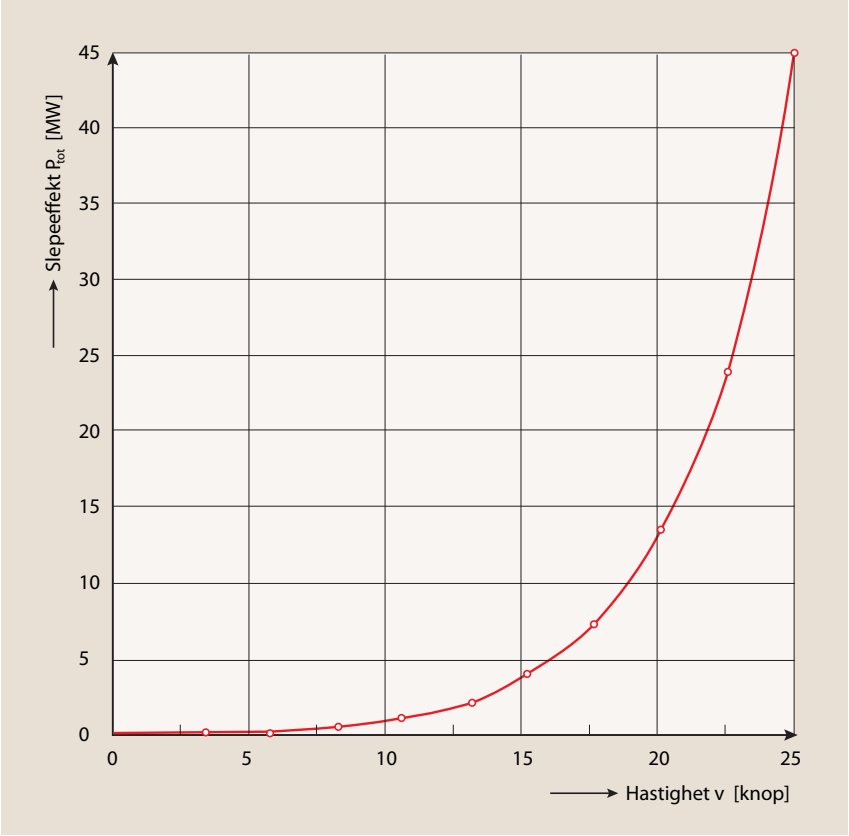
Figuren nedenfor viser resultater fra motstandsberegninger av et deplasementsskip basert på et dataprogram som arbeider etter såkalt Holtrops metode. Dette er basert på en stor samling av empiriske data for en rekke eksisterende skip. Holtrops metode gjør det mulig å få fram et godt estimat av et *konvensjonelt* skips motstand uten å gjøre modellforsøk. Men det forutsettes at forprosjekteringen har kommet så langt at det foreligger linjetegninger av skipet. Dermed kan inputdata legges inn for de størrelser som framgår av de hvite feltene i figuren nedenfor. Disse dataene definerer både skrogets størrelse (lengde i vannlinje, bredde, dypgang og volumdeplasement) og skrogets form (midtspantkoeffisient og vannlinjekoeffisient).



Eksempel på utskrift fra dataprogram for beregning av motstand for et skip etter Holtrops metode. *Dataprogrammet er lagt ut på bokens hjemmeside www.marin.ntnu/havromsteknologi*

Vi ser av figuren at også denne metoden deler opp totalmotstanden i en friksjonsmotstand og en restmotstand. Som nevnt foran, består restmotstanden i det alt vesentlige av bølgemotstand. For øvrig har grafene de samme to karakteristiske trekk som ble påpekt tidligere i forbindelse med grafene for motstandstallene som funksjon av Froudes tall:

- Grafen for restmotstanden (bølgemotstanden) har en svak "hump" ved ca. 20 knop, og denne resulterer selvsagt i et tilsvarende forløp i grafen for totalmotstanden. Årsaken til dette fenomenet er interferens, se side 3-11.
- Ved store hastigheter er det restmotstanden (bølgemotstanden) som dominerer. Ved små hastigheter er det imidlertid friksjonsmotstanden som er størst.



Beregning av effektbehov for det samme skipet som omtalt tidligere.

Beregning av slepeeffekt

Figuren ovenfor viser slepeeffekten for skipet fra forrige side. Effekten beregnes ved hjelp av den grunnleggende sammenheng mellom arbeid og effekt som vi kjenner fra fysikken. Er totalmotstanden R_{tot} (kN) ved en hastighet v (m/s), vil det effektbehovet som svarer til totalmotstanden bli

$$P_{tot} = R_{tot} \cdot v$$

Dette effektbehovet kan vi kalle slepeeffekten. Dette er den nettoeffekten som skal til for å slepe skipet (uten propell) ved hastigheten v. Den må ikke forveksles med den effekt som motoren må yte når skipet går med egen maskin. Propellen har nemlig en virkningsgrad (η_p), som resulterer i et vesentlig større effektbehov på motoren (P_{tot}/η_p). Dette kommer vi tilbake til senere. Se side 7-19.

Undringsoppgave:

Det vises til grafen for effekt foran. Omtrent hvor stor er den midlere eksponenten for en slik effektgraf mellom hastighetene 12 og 20 knop? Hvordan kan vi da skrive effektbehovet som funksjon av hastigheten, slik at vi enkelt kan gjøre overslagsberegninger av effektbehovet for et gitt skip ved ulike hastigheter uten å bruke dataprogrammet ?

Deplasementsskip

Modellforsøk med beregning av total-motstand

Vi har flere ganger tidligere påpekt at det er modellforsøk som gir de nøyaktigste bestemmelsene av totalmotstanden for et planlagt skip. Vi skal her gi en oversikt over hvordan man da går fram.

Modellforsøk i slepetanker

Kommersielle modellforsøk utføres i såkalte slepetanker, som normalt er 200-300 m lange og 10-12 m brede. Modellens skrog må selvsagt lages som en nøyaktig kopi av det planlagte skipet og ha riktig dyp-gang. Modellen festes til en slepevogn som drar den med seg med en konstant hastighet samtidig som slepekraften måles. Hastigheten er normalt 1-8 m/s. Det er viktig at modellen ikke blir for liten. Typiske lengder er 2-8 m, og vanlige skalaer som brukes er 1:100, 1:50 eller 1:25. Dette skriver vi gjerne slik: $\lambda = 100, 50$ eller 25.

Som nevnt foran, er friksjonsmotstanden avhengig av Reynolds tall, mens bølgemotstanden er avhengig av Froudes tall. Det er ikke mulig å gjøre forsøk hvor både Reynolds tall og Froudes tall er riktige sam-tidig. Siden det dessuten er slik at den tidligere omtalte erfarings-formelen for friksjonsmotstandstall anses som pålitelig, *beregnes* dette i stedet for å bli fastlagt eksperimentelt. Bølgemotstandstallet er mye vanskeligere å beregne, og det er bestemmelse av dette tallet som er den primære hensikt med å gjennomføre modellforsøk.

Dermed blir det en sentral betingelse at modellforsøkene må utføres med samme *Froudes tall* som det virkelige skipet vil ha under drift. Basert på definisjonen av Froudes tall, modellens målestokk λ og innføring av indekser "m" for modellen og "s" for fullskalaskipet, kan vi sette opp følgende krav til sammenhør-ende hastigheter :

Froudes tall for modell = Froudes tall for fullskalaskip

$$\frac{v_m}{\sqrt{g \cdot L_{vl,m}}} = \frac{v_s}{\sqrt{g \cdot L_{vl,s}}}$$

$$v_m = \frac{v_s}{\sqrt{\lambda}}$$

Dersom en modell i skala 1:100 slepes med en hastighet for eksempel lik 2 knop (ca. 1 m/s), vil dette svare til en hastighet lik 20 knop på det virkelige skipet.

Overføring av måleresultater fra modell til fullskala

Som eksempel 3.3 skal vi nedenfor gå gjennom prosedyre og resultater for et modellforsøk i skala 1:50 for et deplasementsskip som er designet med følgende data:

Volumdeplasement : $\nabla = 100000\ m^3$
Våt overflate: $S_S = 13 \cdot 10^3\ m^2$

Lengde i vannlinje: $L_{vl,S} = 240\ m$
Normal hastighet: $v_S = 18\ knop = 9{,}26\ m/s$

Undringsoppgave:

Hvorfor er det så viktig at en modell av et skip ikke er for liten hvis den skal brukes til å bestemme totalmotstanden for fullskalaskipet? Finnes det noen naturlig grense for hvor liten modellen kan være? Hint: Studer grafene på side 3-10.

	Prosedyre	Talleksempel
Modell	**1 Målt hastighet:** v_m (m/s)	$v_m = 1{,}31\ m/s$
	2 Målt totalmotstand $R_{tot,m}$ (N)	$R_{tot,m} = 19{,}1\ N$
	3 Lengde i vannlinje $L_{vl,m} = \frac{L_{vl,s}}{\lambda}$	$L_{vl,m} = \frac{240\ m}{50} = 4{,}8\ m$
	4 Våt overflate $S_m = \frac{S_s}{\lambda^2}$	$S_m = \frac{13 \cdot 10^3\ m^2}{50^2} = 5{,}2\ m^2$
	5 Totalmotstandstall $C_{tot,m} = \frac{R_{tot,m}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2 \cdot S_m}$	$C_{tot,m} = \frac{19{,}1\ N}{\frac{1}{2} \cdot (999\ kg/m^3) \cdot (1{,}31\ m/s)^2 \cdot 5{,}2\ m^2} = 4{,}29 \cdot 10^{-3}$
	6 Reynolds tall $Rn_m = \frac{\rho \cdot v_m \cdot L_{vl,m}}{\mu}$	$Rn_m = \frac{(999\ kg/m^3) \cdot (1{,}31\ m/s) \cdot 4{,}8\ m}{1{,}135 \cdot 10^{-3}\ kg/(ms)} = 5{,}535 \cdot 10^6$
	7 Friksjonsmotstandstall $C_{f,m} = \frac{0{,}075}{(\log R_n - 2)^2}$	$C_{f,m} = \frac{0{,}075}{(\log(5{,}535 \cdot 10^6) - 2)^2} = 3{,}33 \cdot 10^{-3}$
	8 Bølgemotstandstall $C_{w,m} = C_{tot,m} - C_{f,m}$	$C_{w,m} = 4{,}29 \cdot 10^{-3} - 3{,}33 \cdot 10^{-3} = 0{,}96 \cdot 10^{-3}$
Fullskala skip	**9 Hastighet** $v_s = v_m \cdot \sqrt{\lambda}$	$v_s = 1{,}31\ \frac{m}{s} \cdot \sqrt{50} = 9{,}26\ \frac{m}{s}$
	10 Bølgemotstandstall $C_{w,s} = C_{w,m}$	$C_{w,s} = 0{,}96 \cdot 10^{-3}$
	11 Reynolds tall $Rn_s = \frac{\rho \cdot v_s \cdot L_{vl,s}}{\mu}$	$Rn_s = \frac{(1{,}025 \cdot 10^3\ kg/m^3) \cdot (9{,}26\ m/s) \cdot 240\ m}{1{,}218 \cdot 10^{-3}\ kg/(m \cdot s)} = 1{,}87 \cdot 10^9$
	12 Friksjonsmotstandstall $C_{f,s} = \frac{0{,}075}{(\log R_{n,s} - 2)^2}$	$C_{f,s} = \frac{0{,}075}{(\log(1{,}87 \cdot 10^9) - 2)^2} = 1{,}42 \cdot 10^{-3}$
	13 Totalmotstandstall $C_{tot,s} = C_{f,s} + C_{w,s}$	$C_{tot,s} = 1{,}42 \cdot 10^{-3} + 0{,}96 \cdot 10^{-3} = 2{,}38 \cdot 10^{-3}$
	14 Totalmotstand $R_{tot,s} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_s^2 \cdot S_s C_{tot,s}$	$R_{tot,s} = \frac{1}{2} \cdot (1{,}025\ \ 10^3\ kg/m^3) \cdot (9{,}26\ m/s)^2\ \ 13 \cdot 10^3\ m^2 \cdot 2{,}38 \cdot 10^{-3} = 1360\ kN$

Hurtiggående fartøyer

Definisjoner og oversikter

Hva menes med hurtiggående fartøyer, og hva karakteriserer disse?

Hittil har vi sett på fartøyer hvor løftekraften skriver seg fra oppdriften, det vil si fra et hydrostatisk trykk. For *hurtiggående* fartøyer er det viktig at framdriftsmotstanden reduseres. Dette kan oppnås ved at oppdriften i *betydelig grad* erstattes av løftekrefter som genereres av et hydrodynamisk trykk, altså trykk som oppstår på grunn av hastigheten til strømningen. Dette trykket kan som kjent beregnes av uttrykket $\frac{1}{2}\,\rho \cdot v^2$, se omtalen av Bernoullis ligning på side 3-6. For å utnytte dette dynamiske trykket til å skape *løftekrefter,* bruker man enten spesielle skrogformer/trim eller man utstyrer skroget med hydrofoiler (bæreplan). En tredje mulighet til å løfte opp et fartøy i vannet uten å bruke oppdrift, er å utforme det med luftputer som settes under overtrykk. Disse metodene er utdypet i tabellen nedenfor.

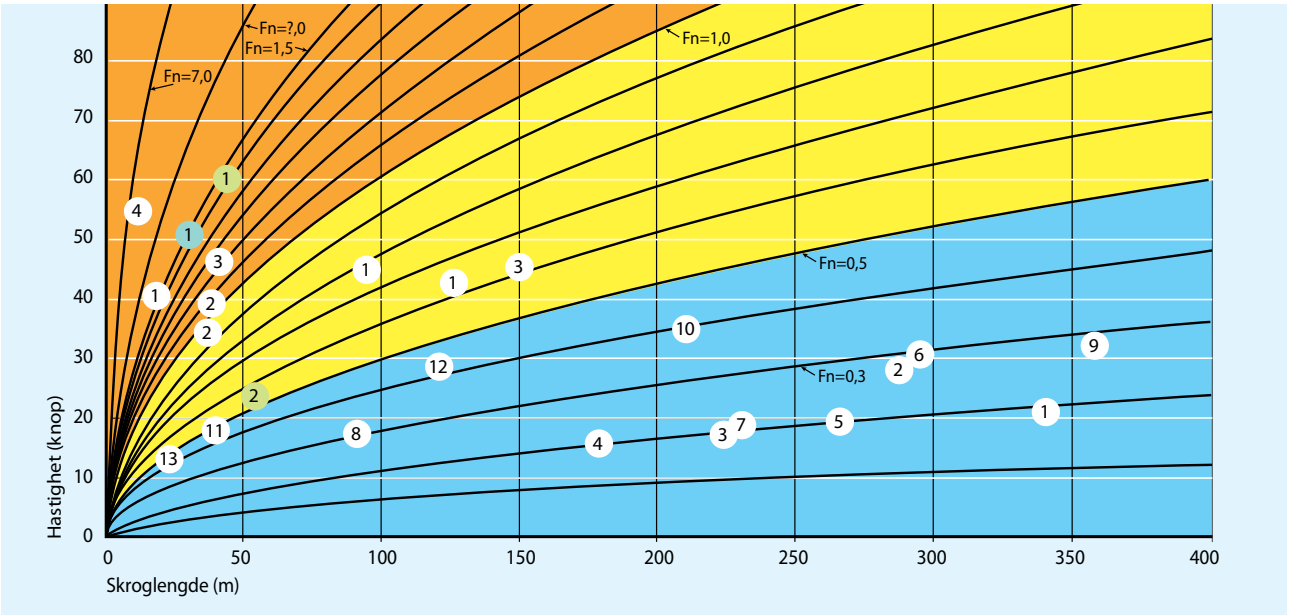
Det er enklere å utnytte de nevnte virkemidler slik at det "monner" i små, og dermed lette fartøyer, enn i store. Derfor vil nødvendig hastighet for at et fartøy skal kunne betegnes som hurtiggående, være avhengig av fartøystørrelsen. For fartøyer hvor vanntrykk genererer løftekrefter direkte på skrogene, vil i så fall Froudes tall kunne benyttes som mål for hvor hurtiggående de egentlig er. Froudes tall kombinerer nemlig hastighet og fartøystørrelse på en egnet måte for slike vurderinger. For hydrofoil- og luftputefartøyer er tilsvarende bruk av Froudes tall mindre relevant, men det er ingen tvil om at disse avanserte fartøykonstruksjonene i alle fall er beregnet på å gi hurtiggående fartøyer.

Som nevnt ovenfor, er det viktig å gjøre hurtiggående fartøyer så lette som mulig. Normalt bygges de derfor i lettmetall i stedet for stål.

Oversikt over hurtiggående fartøyer

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2"></th><th>Konvensjonelle fartøyer</th><th colspan="2">Hurtiggående fartøyer</th></tr>
<tr><th>Fn < 0,4 - 0,5*)</th><th>0,4 - 0,5 < Fn < 1,0 - 1,2*)</th><th>Fn > 1,0 - 1,2*)</th></tr>
<tr><td rowspan="3">Inndeling etter prinsipper for hvordan fartøyene framskaffer nødvendig løftekraft i vannet</td><td>Vanntrykk på skrog (ett eller flere)</td><td>A Deplasementfartøyer
• Hydrostatiak trykk alene gir v.hj.a. det fortrengte vannvolumet en oppdrift som er nødvendig for å utbalansere fartøyets tyngde.</td><td>B Semideplasementsfartøyer
• Spesiell skrogform og trim gjør at hydrodynamisk trykk løfter opp fartøyet i betydelig grad.
• Hydrostatisk trykk (oppdrift) sørger for resten av løftekraften.</td><td>C Planende fartøyer
• Spesiell skrogform/trim gjør at hydrodynamisk trykk alene løfter fartøyet praktisk talt helt opp av vannet (altså nesten uten hjelp av oppdrift).</td></tr>
<tr><td>Vanntrykk på foiler</td><td colspan="3">D Hydrofoilfartøyer. Fartøyenes skrog (ettskrogs eller katamaranskrog) utstyres med foiler (bæreplan). Disse påvirkes av hydrodynamisk trykk, som praktisk talt alene gir tilstrekkelig kraft til å løfte hovedskrogene fullstendig opp av vannet.</td></tr>
<tr><td>Lufttrykk i "pute" under fartøyet</td><td colspan="3">E Luftputefartøyer. Vifter tilfører luft til avgrensede rom på fartøyenes undersider. Viktigste type er luftputekatamaraner som kalles SES, se figur a) neste side. Ca 80 % av løftekraften kommer fra trykket i luftputa. Det finnes også konstruksjoner som baseres på 100 % lufttrykk (ACV, figur b). En annen type er WIG (som forutsettes å fly meget nær overflaten, figur c). Flere slike er bygget i Russland.</td></tr>
</table>

*) Basert på Odd Faltinsen: *Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles*



Froudes tall og hastighet som funksjon av skroglengde for forskjellige hovedtyper fartøy, jevnfør figur på forrige side. De fleste av fartøyene som er omtalt i boka, er plottet inn som eksempler.

A ***Deplasementsfartøyer*** *(konvensjonelle fartøyer):*

1. *Råoljetankskip*
2. *LNG-skip*
3. *LPG-skip*
4. *Produkttankskip*
5. *Bulkskip*
6. *Containerskip*
7. *Ro-Ro-skip*
8. *Forsyningsskip*
9. *Cruiseskip*
10. *Cruiseferge*
11. *Hurtigrute*
12. *Fregatt*
13. *Osebergskipet*

B ***Semideplasements-fartøyer:***

1. *Hurtig ettskrogsfartøy*
2. *Katamaran (Flying Cat)*
3. *Ettskrogsfartøy med to utliggerskrog*

C ***Planende fartøyer:***

1. *Sjøforsvarets stridsbåt*
2. *Katamaran*
3. *En av verdens hurtigste seilbåter*
4. *Typisk båt for offshore-race*

D ***Hydrofoilfartøyer*** 1 *Foil Cat*

E ***Luftputefartøy*** 1 *Kystkorvett (SES)* 2 *Minefartøy (SES)*

Luftputefartøyer

a *SES-type (Surface Effect Ship). Luftputen begrenses av katamaranens to skrog og fleksible "skjørt" foran og bak. Luftputen gir bærekraft lik 80 % av tyngden. SES har mindre motstand enn andre katamaraner. Fartøyet drives med vannjet. Kan f.eks. ha en lengde på 40 m og en servicehastighet lik 50 knop. Den største ulempen med prinsippet er slitasje av skjørtene, særlig det fremste. Sjøforsvarets minesveipere og kystkorvetter er av SES-type.*

b *ACV-type (Air Cushion Vehicle). Trafikkerte tidligere Den engelske kanal, hastighet 90 knop. Framdrift skjer ved hjelp av luftpropeller. Fartøyet kan lande og ta av inne på stranden.*

c *WIG-type (wing-in-ground). Konstruksjonen får ekstra løft ved å fly meget nær overflaten og kan egentlig ikke kalles båt.*

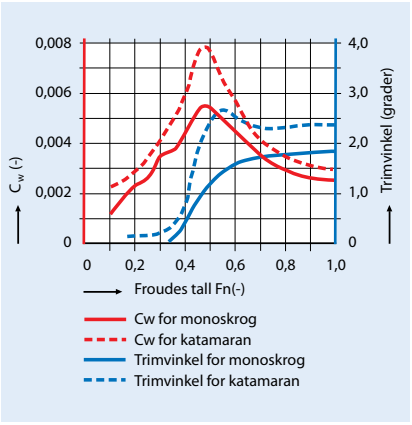
Alle illustrasjoner er hentet fra boka "Hydrodynamics of High Speed Marine Vehicles" av professor Odd Faltinsen, NTNU.

Undringsoppgave:

Hva menes med et amfibisk fartøy? Er noen av fartøyene vist ovenfor amfibiske?

Hurtiggående fartøyer

Semideplasementsfartøyer og planende fartøyer



Bølgemotstandstall (C_w) og trimvinkel som funksjon av Froudes tall for ettskrogsfartøy og katamaran.
Verdiene baseres på modellforsøk utført av Molland o.a. Katamaranmodellens to skrog er framstilt ved deling av monoskroget på langs. Begge modeller prøves dermed under så like forhold som mulig. Årsaken til at C_w er større for katamaranskrogene enn for monoskroget på tross av samme deplasement, er interaksjon mellom bølgene fra de to skrogene.

Begge illustrasjoner er hentet fra boka Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles av prof. Odd Faltinsen, NTNU

Semideplasementsfartøyer (halvplanende)

Som påpekt i tabellen på side 3-18, har slike fartøyer en hastighet og en skrogform/trim som gjør at oppdriften (hydrostatisk trykk) i betydelig grad erstattes av løftekrefter fra hydrodynamisk trykk. Det skilles gjerne mellom følgende tre hovedtyper:

Hurtige enskrogsfartøyer. Disse er som oftest ferger for passasjerer med biler og kan ha hastigheter på opptil 40 knop og skroglengder på over 120 m. De bygges normalt i aluminium og designes med stor bredde og liten dypgang. Av hensyn til passasjerenes komfort lages de vanligvis med systemer for kontroll av bevegelsene i sjøen. Slike systemer er for eksempel både aktive og passive finner og foiler.

Katamaraner. Dette er den vanligste typen av hurtiggående fartøyer, se figurer side 2-13 og nede til venstre på denne siden. De to skrogene er relativt slanke. Typiske skroglengder er 35—40 m. Maskinerieffekten er stor nok til å gi hastigheter på ca. 40 knop, noe som svarer til Froude-tall lik ca. 1,0. Mange tror at "populariteten" til katamaraner skyldes at de har mindre motstand enn for eksempel et tilsvarende ettskrogsfartøy. Det er ikke tilfelle, se sammenligningen mellom bølgemotstandene i figur til venstre. Her ser vi at to skrog (altså katamaran) gir større bølgemotstandstall enn ett skrog med sammen volumdeplasement. Dessuten vil en for-deling av et gitt deplasement på to skrog gi større våt overflate enn ett skrog.

Figuren viser også et annet, meget interessant fenomen. Vi ser at bølgemotstandstallene for både ettskrogs- og katamaranmodellen har et maksimum ved et Froude-tall omtrent lik 0,5. Også grafene for modellenes trimvinkler viser interessante forløp. Trimmen vil "av seg selv" begynne å øke omtrent ved Fn = 0,3 og øke kraftig fram mot Fn = 0,5—0,6. Dette skyldes virkninger fra det hydrodynamiske trykket.

Hovedårsaken til katamaranenes suksess som hurtiggående fartøy er først og fremst at de har meget god stabilitet selv ved de høye hastigheter som karakteriserer disse fartøyene. For ytterligere å bedre komforten for passasjerer om bord utstyres fartøyene dessuten med automatiske reguleringssystemer for reduksjon av bevegelsene i sjøen. Særlig gjelder dette vertikale akselerasjoner, som lett kan forårsake sjøsyke. Det vises for øvrig til side 8-17.

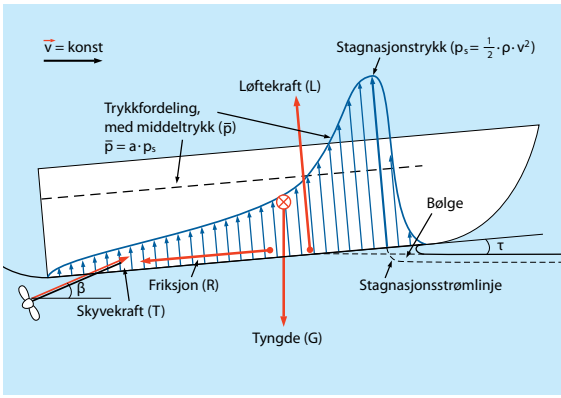
Ettskrogsfartøyer med to eller fire utliggerskrog. Slike konsepter er spesielt aktuelle for transport av gods som skal fort fram. Dette forutsetter hurtige skip (30—40-knop) med lengder 150—250 m, Det baseres da på meget slanke hovedskrog, som av hensyn til stabiliteten må suppleres med utliggerskrog (outriggers), se figur.

Planende fartøyer

Slike fartøyer brukes til patruljering, ambulanseformål, fritidsaktiviteter, offshoreracing osv. Dette er fartøyer som normalt har skrog med lengder mindre enn ca. 30 m og hastigheter som gir Froudes tall større enn ca. 1,0. Da vil løftekraften i vesentlig grad skrive seg fra hydrodynamisk trykk og bare i svært liten grad fra hydrostatisk trykk (oppdrift).

Virkemåten for et planende fartøy kan skjematisk illustreres som vist i figur. Vi tenker oss en flatbunnet konstruksjon som beveger seg med konstant hastighet (v) og med en trimvinkel (τ). Vannet vil da "hope seg opp" under fremste del av båten slik som vist i figuren. Dette resulterer i et stagnasjonstrykk ($\frac{1}{2}\rho v^2$) og en trykkfordeling under fartøyet som illustrert. Løftekraften (L) kan bestemmes når bunnarealet (S) og midlere verdi av trykkfordelingen er kjent v.hj.a. faktoren a. Øvrige krefter som virker på fartøyet, framgår av figuren.

For å forklare prinsippet har vi ovenfor tatt utgangspunkt i et fartøy med flat bunn. Planende fartøyer har i virkeligheten en V-lignende bunn. Forholdene er da mer kompliserte. Det finnes imidlertid dataprogrammer for beregninger av slike planende båter, se nedenfor.

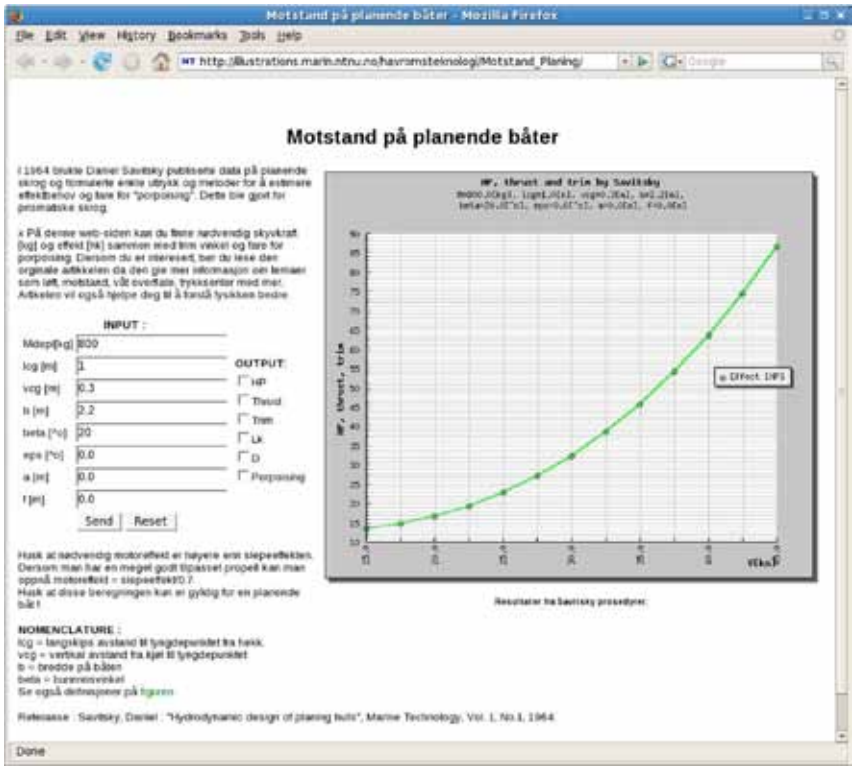


Ytre krefter på planende fartøy

$L = \bar{p}\cdot S = a\cdot p_s\cdot S = a\cdot\frac{1}{2}\cdot\rho\cdot v^2\cdot S$
$R = \frac{1}{2}\cdot\rho\cdot v^2\cdot S\cdot c_f$ *(se s. 3-10 og 3-11)*

Når tyngden (G) er gitt, kan nødvendig skyvekraft (T) deretter beregnes av Newtons 1. lov på vektorform:

$$\vec{L} + \vec{T} + \vec{R} + \vec{G} = 0$$



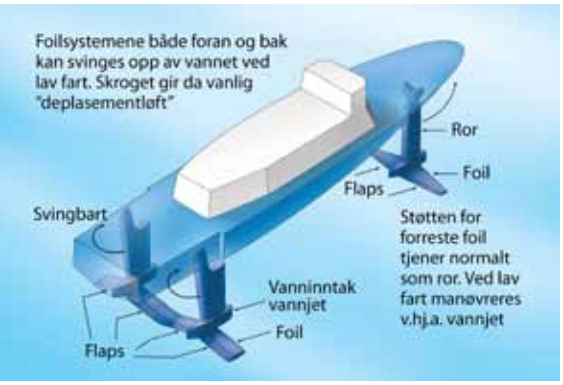
Undringsoppgave:

Bestemmelse av skyvekrafteffekt

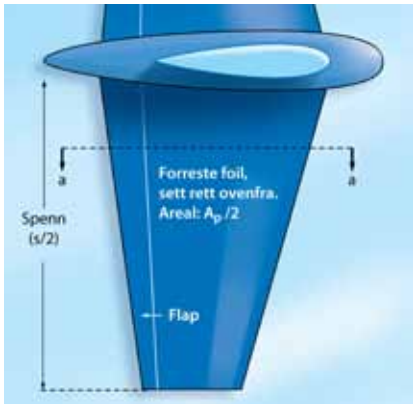
Vi forutsetter at den planende båten øverst i margen har en masse lik 800 kg og at kreftene som virker på båten er tegnet opp i samme skala. Hvordan kan vi da overslagsmessig bestemme behovet for skyvekrafteffekt ved en hastighet på 30 knop? Propellakselens vinkel med horisontalplanet er 20 grader.

Hurtiggående fartøyer

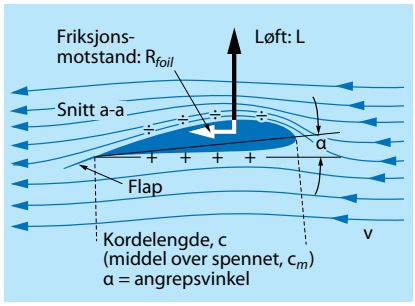
Hydrofoilfartøyer



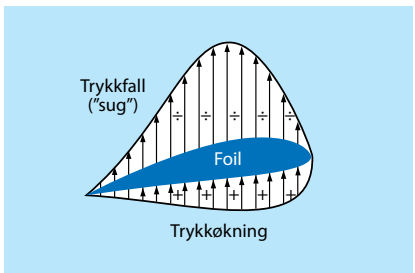
Ettskrogs hydrofoilfartøy drevet med vannjet



Detalj av hydrofoil



Strømningsforhold ved hydrofoil



Løftekraft på foilen genereres både av over- og undertrykk

Foilteori

En hydrofoil er en vinge som virker i vann på samme måte som en flyvinge genererer løftekraft i luft. Vi kan også kalle den et bæreplan. Både enskrogsfartøyer (se figur) og katamaraner kan utstyres med slike foiler. Fordi også propeller og ror for konvensjonelle fartøyer er formet som hydrofoiler og prinsipielt virker på samme måte, er foilteorier en viktig del av hydrodynamikken. Derfor skal vi nedenfor se litt nærmere på virkemåten, som egentlig også gjelder for flyvinger. Foiler brukes også ofte for å dempe uønskede bevegelser i sjøen, for eksempel rullebevegelser. Se også side 8-17.

Hvordan oppstår løftekrefter på en hydrofoil? En hydrofoil har en form som vist i figurene og er orientert med en viss vinkel i forhold til strømningen. Vi ser at en vannpartikkel som følger en strømlinje på oversiden av foilen, må bevege seg en lengre strekning enn en vannpartikkel som følger en strømlinje på undersiden. Strømningshastigheten er altså større, og strømlinjene ligger tettere på oversiden enn på undersiden. Av Bernoullis ligning på side 3-6 skjønner vi da at den økte hastigheten medfører en øking i leddet $\frac{1}{2}\cdot\rho\cdot v^2$ og dermed en tilsvarende reduksjon av trykket p. Langs strømlinjen på undersiden skjer det motsatte. Hastigheten reduseres, og trykket øker i forhold til det midlere trykket. Trykkdifferensen mellom over- og underside resulterer dermed i en vertikalt rettet løftekraft.

Det er to grunner til at vannets hastighet på foilens overside er større enn på undersiden:

- Foilen er utført med en spesiell form (krumning og tykkelse)
- Den er orientert med en viss angrepsvinkel i forhold til strømningsretningen.

Den resulterende løftekraft presenteres gjerne som et dimensjonsløst tall, løfttallet C_L, på lignende måte som vist på side 3-13 for den totale framdriftmotstanden for et deplasementsskrog. Vi henfører imidlertid ikke løftet L til den våte overflaten S, men til foilens projiserte areal i vertikalretningen (A_p). Dermed kan vi altså definere løfttallet slik:

$$C_L = L / (\frac{1}{2}\cdot\rho\cdot v^2\cdot A_p)$$

Kjennes løfttallet C_L, kan løftet L beregnes av denne ligningen. Det vil føre altfor langt å gå nærmere inn på utledning av hva som bestemmer løfttallet, men denne fører fram til følgende, forbausende enkle uttrykk, som funksjon av angrepsvinkelen α (målt i radianer):

$$C_L = (0{,}3 + 2\cdot\pi\cdot\alpha)K_{korr}$$

Det ukorrigerte løfttallet som funksjon av angrepsvinkelen α er vist grafisk på figur. Leddet 0,3 skyldes profilkrumningens bidrag til det totale løftet og kan variere litt. Korreksjonsfaktoren K_{korr} tar hensyn til at full trykkdifferens mellom foilens over- og underside ikke kan opprettholdes ved foilspennets ytterpunkter. Ved typiske trykkfordelinger langs spennet kan faktoren beregnes som beskrevet i figurteksten. Vi skjønner at den nærmer seg 1,0 for smale foiler med stor spennvidde.

Motstand på hydrofoiler. Denne vil i hovedsak bestå av friksjonsmotstand på grunn av vannets viskositet, som omtalt på side 3-10. For beregning av friksjonsmotstandstall kan vi derfor legge til grunn den samme formelen som ble oppgitt der. Når vi skal bestemme Reynolds tall for en foil, må vi imidlertid bruke kordlengden (c) som karakteristisk lengde. I beregning av friksjonsmotstandstallet må vi også ta hensyn til foilens tykkelse (t_{max}). Dette gjøres som vist i ligningen nedenfor ved hjelp av faktoren $2 \cdot t_{max}/c$ (kan utledes teoretisk og bekreftes eksperimentelt). Vi skal videre være oppmerksomme på at det i foilteorien har blitt vanlig å *henføre både løfttallet og friksjonsmotstandstallet til det projiserte foilarealet Ap som forklart foran*. Tilnærmet vil $S = 2 \cdot Ap$ (fordi våt overflate er omtrent dobbelt så stor som den projiserte flaten). For å få fram den virkelige friksjonsmotstand uttrykt som kraft, må vi derfor innføre faktoren 2 i formelen for motstandstallet nedenfor. Etter dette kan det dimensjonsløse friksjonsmotstandstallet og friksjonsmotstanden for foiler skrives slik:

$$C_{f,foil} = 2 \cdot (1 + \frac{2 \cdot t_{max}}{c}) \cdot \frac{0{,}075}{(\log R_n - 2)^2}$$

$$R_{f,foil} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_p \cdot C_{f,foil}$$

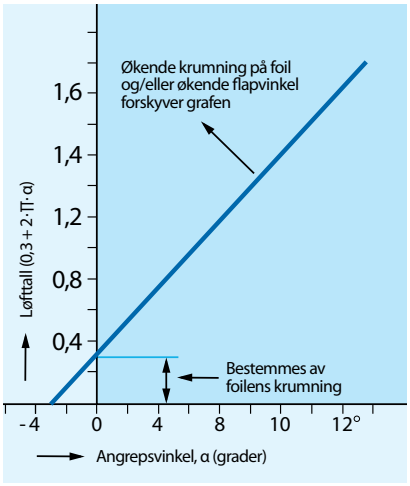
Hermed har vi vist hvordan både løft og motstand prinsipielt kan estimeres for en hydrofoil. De samme resonnementer kan også brukes på en flyvinge.

Vurdering av hydrofoilfartøyer.

Som vi skjønner, er slike fartøyer teknologisk sett meget avanserte. Hovedfordelen er at de egner seg svært godt til høye hastigheter og dermed til passasjertransport. Det velges ofte vannjet som framdriftssystem. Konsekvensene av de avanserte utformingene er imidlertid både høye produksjons- og vedlikeholds-kostnader. Fartøyene er også mer kompliserte i drift, blant annet fordi bevegelse av hydrofoiler og flaps krever aktive, avanserte reguleringssystemer.

Undringsoppgave:

Klipp ut en ca. 5 x 20 cm rektangel av papir. Hold det inntil underleppa og blås på oversiden av papiret. Hvorfor løfter den frie enden seg opp ?

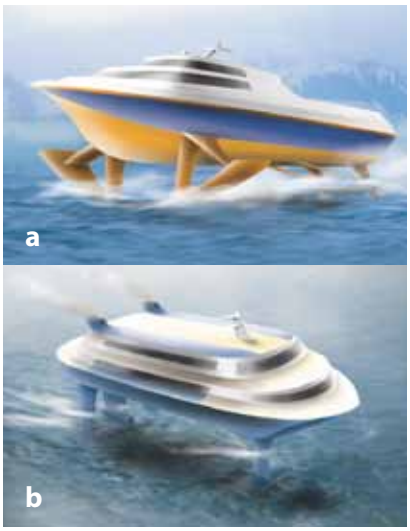


Løfttall som funksjon av angrepsvinkel for foil med meget stort spenn—korde-forhold og uten flaps

Fordi trykkfordelingen langs en foil ikke holder seg konstant, må løfttallet fra grafen korrigeres ved hjelp av

$K_{korr} = s/(s+2 \cdot c_m)$

hvor s er foilens totale spenn og c_m dens midlere kordelengde. Foilteorien viser at grafen begynner å flate ut ved ca. 12 graders vinkel. Deretter vil den avta og resultere i såkalt steiling (stalling). Årsaken til dette er separasjon.

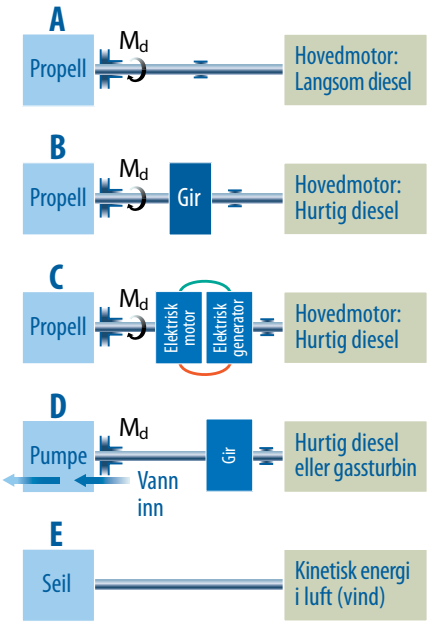


To hovedtyper hydrofoilsystemer:
a Overflateskjærende system
b Fullt neddykket system

Illustrasjonene er hentet fra boka Hydrodynamics of High-Speed Marine vehicles av prof. Odd Faltinsen, NTNU

Framdriftssystemer

Systemoversikt. Propellens virkemåte



Dagens mest aktuelle framdriftssystemer til sjøs

A Langsomtgående dieselmotor (gir er da unødvendig)
B Hurtiggående dieselmotor (med gir)
C Dieselelektrisk system
D Vannjetsystem med hurtiggående dieselmot eller gassturbin som hovedmotor
E Seil

Framdriftssystemer

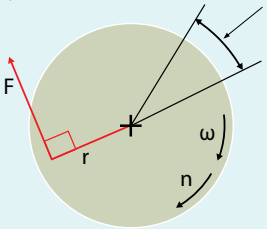
Prinsipper for generering av skyvekraft. Oppgaven for et fartøys framdriftssystem er å generere en skyveeffekt som kan balansere med den effekt som svarer til fartøyets motstandskrefter, altså slepeeffekten, se side 3-15. En oversikt over de fem mest aktuelle framdriftssystemer er vist i figur til venstre. Det framgår at den nødvendige skyvekraft i prinsippet genereres på tre ulike måter: *Propell, vannjet og seil.* Vi skal se litt nærmere på disse og starter med propellen, som klart er den mest brukte av de nevnte. Nærmere omtale av de øvrige enheter som inngår i systemene (hovedmotor og gir), vil bli gitt i kapittel 7.

En propell får alltid tilført energi i form av et dreiemoment på en roterende aksel. *Oppgaven til propellen er dermed å omforme dette dreiemomentet til en skyvekraft som virker i fartøyets bevegelsesretning.* Før vi begynner å forklare hvordan propellen løser denne oppgaven, er det imidlertid hensiktsmessig å "friske" opp en del fundamentalt stoff fra den delen av fysikken som vi kaller mekanikk. Særlig viktig er da begrepene energi, arbeid og effekt, som er behandlet i forbindelse med *rettlinjet bevegelse* både i Ergo 1 og Rom, stoff og tid 1. Disse begrepene må imidlertid utvides til også å omfatte *roterende bevegelse*, noe som kortfattet er gjort nedenfor.

Grunnleggende dynamikk for roterende bevegelse

Dynamikk er betegnelsen på den del av fysikken hvor vi først og fremst lærer om sammenhengen mellom kraft og bevegelse. Bevegelser kan skje på mange forskjellige måter, men de to hovedtypene som er mest relevante for det foreliggende kapitlet, er rettlinjet *forflytning* av et legeme og *rotasjon* av et legeme rundt en aksel. I tabellen nedenfor er sammenstilte ligninger som gir sammenhengene mellom de viktigste størrelsene som vi har med å gjøre både i dette og flere etterfølgende kapitler. Alle ligningene er godt kjente fra faget fysikk når det gjelder rettlinjet forflytning. Utvidelsen til et ligningssett også for roterende bevegelse blir nærmest selvforklarende, særlig hvis vi merker oss følgende:

Dreiemoment: $M_d = F \cdot r$ [Nm]
Dreining: α [rad=ubenevnt]



To måter for måling av dreiehastighet:
ω [rad/s=s^{-1}]
n [omdr/s]
$\omega = \frac{\alpha}{t} = 2 \cdot \pi \cdot n[s^{-1}]$

Viktige størrelser i roterende bevegelse

Når det gjelder den rettlinjede bevegelsen, vil det være **kraft F (målt i N)**, strekning s (m) og hastighet v (m/s) som spiller hovedrollene i bestemmelse av for eksempel arbeid og effekt. I rotasjonens "verden" vil imidlertid disse rollene overtas av henholdsvis **dreiemoment M_d (målt i N·m)**, rotasjonsvinkel α (målt i den ubenevnte enheten radianer) og vinkelhastighet ω (rad/s = s^{-1}).

Fysiske størrelser	**Rettlinjet bevegelse**	**Roterende bevegelse**
Forflytning/Dreining	Strekning s (m)	Rotasjonsvinkel α (rad = -)
Hastighet/Dreiehast.	$v = s / t$ (m/s)	$\omega = \alpha/t = 2 \cdot \pi \cdot n$ (s^{-1})
Kraft/Dreiemoment	F (N)	$M_d = F \cdot arm$ (N · m) (se figur)
Arbeid	$W = F \cdot s = F \cdot v \cdot t$ (J, kJ)	$W = M_d \cdot \alpha = M_d \cdot \omega \cdot t = M_d \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \cdot t$
Effekt	$P = W/t = F \cdot v$ (W, kW)	$P = W/t = M_d \cdot \omega = M_d \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$

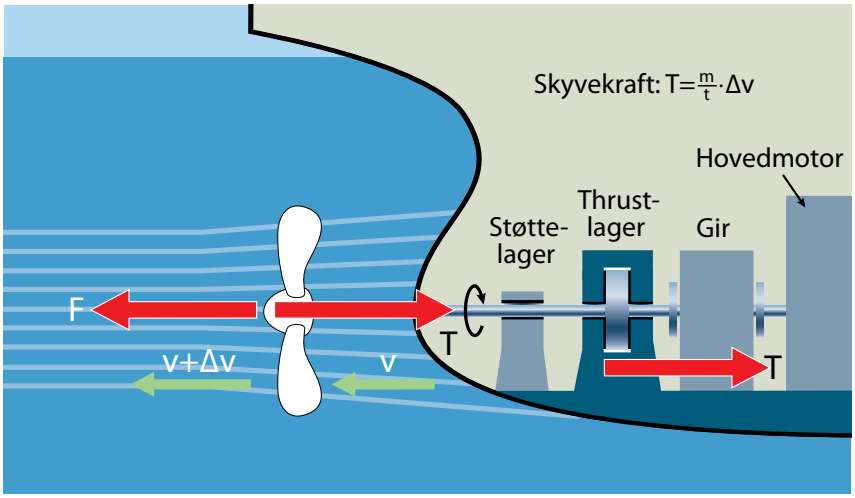
Propellens virkemåte

Propellteoriene er kompliserte og ligger utenfor rammen av denne boka. Propeller er imidlertid så sentrale innen skipsteknologien at vi likevel ikke kan overse temaet helt.

Forenklet forklaring på hvordan en propell virker. En propell består som kjent av flere propellblader som er skråstilt på et boss (nav). Vi ser først på propellen som en skive med et stort antall slike blad, se figur nedenfor. Når skiven roterer, gir den vannet en viss tilleggshastighet (Δv) i aksiell retning. Vi ser bort fra tangentielle tilleggshastigheter. En vannmasse m må ha blitt påvirket av kraften:

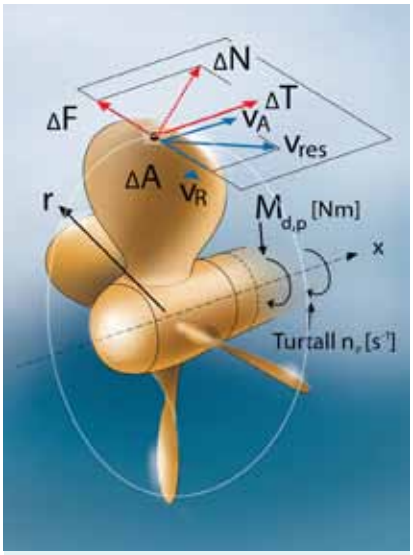
$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{\Delta v}{t} = \frac{m}{t} \cdot \Delta v$$

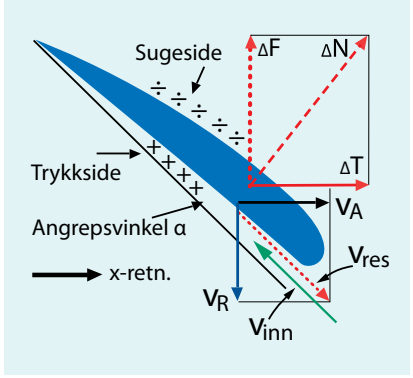
Denne formen på Newtons 2. lov utdypes i fysikk i forbindelse med impulsloven. Kraften som virker på vannet, er betegnet med F. Ifølge Newtons 3. lov gir dette en like stor motkraft (skyvekraft, T), som virker på propellen og som overføres til fartøyet gjennom et thrustlager.



Forklaring av virkemåte basert på impulsloven. *Skyvekraft : $T = \frac{m}{t} \cdot \Delta v$ hvor m/t = massestrøm (kg/s) og Δv = hastighetsøkning på vann*

Forklaring basert på propellen som foil.
Vi har foran nevnt at en propell genererer krefter på samme måte som en foil. Propellbladene er derfor utformet med typisk foilprofil, se figur til høyre. Når propellen roterer, strømmer vannet på begge sider av propellbladene og frambringer en trykkside og en sugeside. Bladene er orientert slik at strømlinjene på trykksiden kommer inn med en viss angrepsvinkel. Figuren viser hvordan bladets resulterende hastighetsvektor v_{res} settes sammen av framgangshastighet v_A og rotasjonshastighet v_R, slik at den motsatt rettede innstrømningshastigheten v_{inn} blir som vist med grønn vektor. Denne gir angrepsvinkelen α og skaper en trykkdifferens på begge sider av arealet ΔA. På samme måte som for hydrofoilen genereres dermed en normalkraft (ΔN). Denne dekomponeres i en skyvekraft (ΔT) og en komponent (ΔF) som gir et dreiemoment $\Delta M_d' = \Delta F \cdot r$. Hvis vi samler sammen kreftene fra alle propellbladenes totale overflater, vil tilhørende dreiemoment balansere med dreiemomentet som tilføres propellen fra motoren. Newtons 1. lov gjelder nemlig ikke bare for krefter, men også for dreiemomenter (forutsatt konstant hastighet). Tilsvarende gir en samling av skyvekreftene en resulterende skyvekraft T i framdriftsretningen.





Snitt langs en sirkelbue med radius r, sett ovenfra

Propellens virkemåte som foil

Hastigheter:

v_A = framgang for areal ΔA i forhold til vannstrømmen

v_R = tangentiell bevegelse fra rotasjonen: $v_R = 2 \cdot \pi \cdot n_D \cdot r$

v_{res} = resulterende bevegelse av arealet ΔA

v_{inn} = resulterende strøm-vektor inn på propellbladet

Krefter:

ΔN = kraft generert fra trykkdifferens Δp på begge sider av arealet ΔA : $\Delta N = \Delta p \cdot \Delta A$

ΔT = komponent som gir bidrag til skyvekraft (thrust) i x-retn., (skipets framdriftsretning)

ΔF = komponent som gir "motdreiemoment" ($\Delta M_d' = \Delta F \cdot r$) til dreiemom. som leveres propell fra hovedmotoren

Resulterende, samlede krefter N, T og F finnes ved å integrere bidragene ovenfor over alle propellbladenes totale overflater.

Framdriftssystemer

Oversikt over virkningsgrader. Propulsjonsvirkningsgrad

Effektposter og virkningssgrader for framdriftssystem med propell

Effektposter:

$\dot{E}_{tilf}$ = *Energistrøm (brensel)*

ΔP_{hm} = *Tap pga. termisk energi i avgass og motorkjølevann*

P_e = *Akseleffekt fra hovedmotor*

ΔP_{ko} = *Tap pga. friksjon i eventuelt gir, thrustlager, andre lagere*

P_p = *Levert til propell.*

ΔP_p = *Tap i prop. som funnet i fritt vann-test, samt litt tilleggstap pga. vanskeligere arbeidsforhold bak et skip.*

P_T = *Skyvekrafteffekt, (thrusteffekt)* $P_T = T \cdot v_A$

ΔP_s = *Virkning fra skrog*

P_E = *Slepeeffekt,* $P_E = R \cdot v_S$

Virkningsgrader (-):

Effektiv, termisk v.grad for hovedmotor:

$$\eta_e = \frac{P_e}{\dot{E}_{tilf.}}$$

Overføringsvirkningsgrad:

$$\eta_{ko} = \frac{P_p}{P_e}$$

Propellvirkningsgrad:

$$\eta_p = \frac{P_T}{P_p} = \frac{T \cdot v_A}{P_p}$$

Skrogvirkningsgrad (~1,0)

$$\eta_s = \frac{P_E}{P_T} = \frac{R \cdot v_s}{P_T}$$

Totalvirkningsgrad:

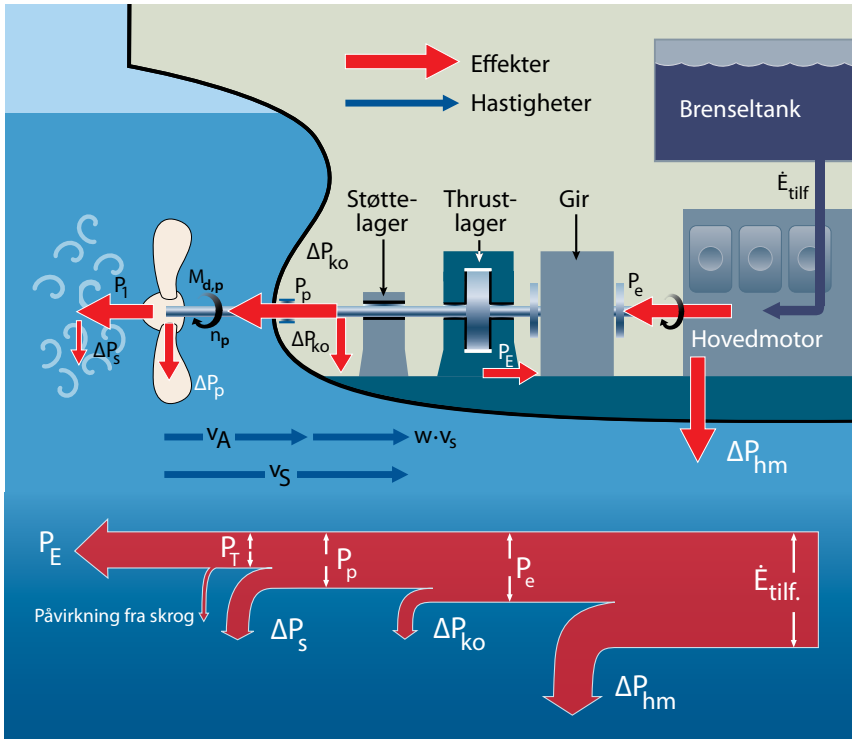
$\eta_{tot} = \eta_e \cdot \eta_{ko} \cdot \eta_p \cdot \eta_s$

Hastigheter (m/s):

v_S = *skipets framgangshastighet gjennom vannet*

$w \cdot v_S$ = *medstrøm. Skroget vil dra med seg vann i et sjikt som øker i tykkelse akterover og som ved propellen kan beskrives med hastigheten* $w \cdot v_S$. *Typisk verdi på medstrømsfaktoren:* $w = 0{,}2$.

v_A = *propellens framgangshastighet gjennom vannet* $v_A = v_S - w \cdot v_S = v_S\,(1\text{-}w)$



Teknologiske prosesser og systemer går alltid med et visst tap av energi. Tapets omfang uttrykkes ved hjelp av systemets virkningsgrad, som kan defineres på energibasis eller effektbasis. Generelt gjelder:

$$\text{Virkningsgrad, } \eta = \frac{\text{nyttig energi}}{\text{tilført energi}} = \frac{\text{nyttig effekt}}{\text{tilført effekt}} = \frac{\text{tilført - tapt}}{\text{tilført}}$$

Vi skjønner at virkningsgraden virker inn på et systems energiforbruk, og analyser av hva som bestemmer virkningsgraden er derfor meget viktig. Aktuelle virkningsgrader i et komplett framdriftssystem er illustrert ovenfor. Vi skal her ta for oss propulsjonsvirkningsgraden, men kommer tilbake til virkningsgrader for hovedmotor og kraftoverføring i et senere kapittel.

Propulsjonsvirkningsgrad

Det skilles gjerne mellom propellvirkningsgrad og propulsjonsvirkningsgrad avhengig av om propellen arbeider under ideelle forhold (i fri vannstrøm) eller under de virkelige forhold, som for eksempel bak et skipsskrog.

Propellvirkningsgrad η_p. Denne bestemmes ved at en modell av propellen festes under en vogn i en slepetank og dras med forskjellige hastigheter gjennom vannet. Samtidig drives propellen av en elektrisk motor. Tilført turtall og dreiemoment måles, sammen med den skyvekraft som propellen genererer. Dette gjør det mulig å bestemme propellvirkningsgraden, altså forholdet "Thrusteffekt T · v/effekt tilført propellen". Verdien konverteres til fullskalaskipet., slik at skyvekraften på dette blir kjent for ideelle forhold. Det er også mulig å justere denne "fritt—vann-virkningsgraden" slik at den ivaretar propellens ytelser under virkelige forhold, altså når den er plassert som forutsatt bak skipet.

Slik eksperimentell bestemmelse av propellvirkningsgraden er tungvint, og det finnes dataprogrammer som gjør det mulig å beregne både virkningsgrad, skyvekraft og andre størrelser for en propell.

Når det er mange variable størrelser som inngår i et problem, har vi tidligere påpekt at det er hensiktsmessig å presentere måleresultater ved å samle disse i dimensjonsløse størrelser. I tillegg til de fire ovennevnte størrelsene (v_A, n_p, T og $M_{d,p}$), er det klart at propelldiameteren (D) og vannets tetthet (ρ) må være av betydning i problemstillingen. Dette gir totalt seks variable størrelser, og vi kan nå danne tre dimensjonsløse grupper av disse:

Skyvekrafttall for propellen:

$$K_t = \frac{T}{\rho \cdot n_p^2 \cdot D^4}$$

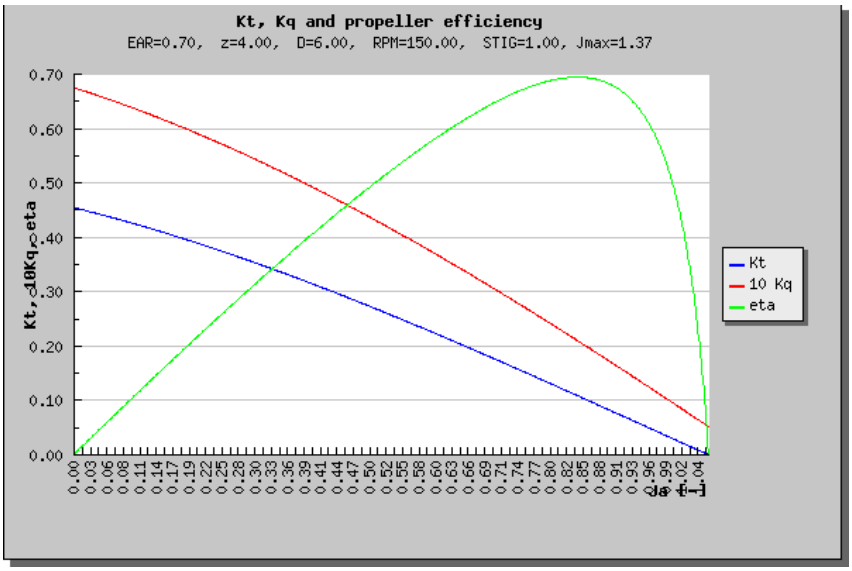
Dreiemomenttall for propellen:

$$K_M = \frac{M_{d,p}}{\rho \cdot n_p^2 \cdot D^5}$$

Framgangstall for propellen:

$$J_a = \frac{v_A}{n_p \cdot D}$$

Det vises til oppgave 3.8, hvor det skal påvises at disse gruppene virkelig er dimensjonsløse og dermed kan uttrykkes som rene tall, gjeldende for den undersøkte propellen.



Dataprogram for beregning av viktige propellstørrelser

Etter dette kan nå alle de viktigste dataene for den aktuelle propellutformingen med ulike diametere presenteres ved hjelp av ett eneste diagram, se figur. Her er propellvirkningsgraden, skyvekrafttallet og momenttallet framstilt som funksjon av propellens framgangstall. Det er selvsagt at man bør tilstrebe at virkningsgraden blir så høy som mulig ved skipets normale belastning. Hvordan vi for øvrig kan bruke diagrammet til å dimensjonere propellen med en diameter som gir den nødvendige skyvekrafteffekt, er omtalt senere.

Propulsjonsvirkningsgrad, $\eta_p \cdot \eta_s$. Når propellen arbeider bak et skrog, møter den andre strømningsforhold enn under en friprøve. For det første vil skrogets motstand øke noe i forhold til den motstand som ble funnet under slepeprøver. Årsaken til dette er at vannstrøm forbi skrog og ror øker på grunn av propellens sug, noe som gir økt motstand i forhold til målingene fra slepeprøven. For det andre vil skroget dra med seg noe vann framover (medstrøm). Dermed vil propellens framgangshastighet i forhold til vannet (v_A) være mindre enn skipets hastighet (v_S). Dette er grunnen til at v_A er brukt i propellens friprøver, som påpekt ovenfor.

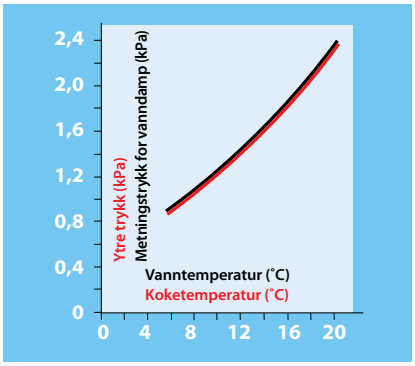
Det vil føre for langt å gå nærmere inn på de relativt små forskjellene mellom propellvirkningsgrad og propulsjonsvirkningsgrad og vi bruker den sistnevnte i eksempler og oppgave lenger bak. Typiske verdier for propulsjonsvirkningsgraden er 0,65—0,75 for tank- og lasteskip. Generelt synker virkningsgraden når propellens belastning (turtall) øker.

Undringsoppgave:

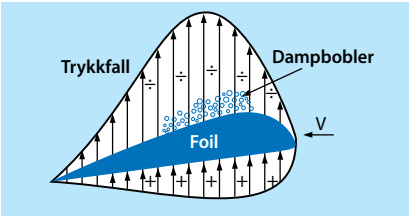
Hvor stor prosentandel av energien i brenslet utnyttes til nyttig arbeid i framdriftssystemet for et skip hvor typiske virkningsgrader er 0,45 for hovedmotoren, 0,95 for gir og lagre i kraftoverføringen og 0,70 for propulsjonssystemet ?

Framdriftssystemer

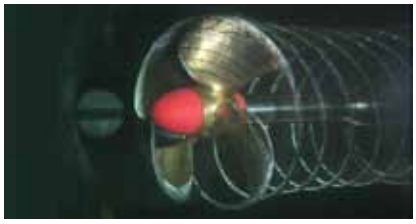
Kavitasjon. Beregning av propell ved hjelp av dataprogram



Sammenheng mellom koke-temperatur og ytre trykk. *Over en vannflate vil det alltid være vann-molekyler i dampfase. Disse resul-terer i et visst damptrykk, men det er en grense for hvor stort dette damptrykket kan bli. Denne grensen, som kalles metningstrykket, øker med vannets temperatur. Koking vil si fordamping også fra det indre av væsken. Dette skjer når det ytre trykket er lik eller mindre enn metningstrykket. En graf som viser metningstrykk som funksjon av væsketemperatur, vil samtidig gi sammenhengen mellom ytre trykk og koketemperatur.*



Dannelse av dampbobler på en foil. *Dampboblene dannes på de delene av foilens overflate hvor trykkfallet er så stort på grunn av strømningshastigheten at det statiske trykket i vannet faller under metningstrykket ved vannets temperatur.*



Kavitasjonstest av propellmodell

Kavitasjon

Både propeller og hydrofoiler kan utsettes for kavitasjon. Dette vil si at det danner seg små dampbobler på sugesiden av foilformede legemer.

Kavitasjon er en hovedårsak til at vi sjelden hører om hastig-heter over 50 knop til sjøs. Fenomenet kan også forårsake store problemer ved lavere hastigheter.

Hvorfor kan kavitasjon oppstå? Dersom du koker vann ved hav-overflaten, vil vannet koke ved 100 °C dersom lufttrykket er 1013 mbar ($1{,}013 \cdot 10^5$ Pa) denne dagen. Dersom du er oppe på en fjelltopp, koker vannet ved en noe lavere temperatur, avhengig av hvor stort lufttrykket er på fjelltoppen. Koketemperaturen bestemmes altså av det ytre trykket. For eksempel vil vann med en temperatur på 15 °C kunne koke hvis det ytre trykket ble så lavt som 17 mbar (1700 Pa), se graf til venstre. Så lave trykk kan det bli nede i vann som strømmer forbi et propellblad eller en hydrofoil hvis strømningshastigheten er stor nok. På sugesiden av et propellblad kan altså trykket bli så lavt at vannet som strømmer forbi kan begynne å koke. Dermed dannes det små bobler med damp. Disse boblene transporteres videre langs propellbladet og vil raskt komme til områder med lavere strømnings-hastighet, altså høyere trykk. Da vil boblene implodere (det motsatte av eksplodere), eller vi kan si kollapse. Dersom denne implosjonen skjer nær propellen, vil det føre til støy og vibrasjoner. Omfattende kavitasjon kan endog føre til erosjon (nedbryting) av materialet og ødeleggelse av hele virkemåten til propellen (eventuelt hydrofoilen).

Etter denne forklaringen av fenomenet skjønner vi at kavitasjon har lettest for å oppstå ved høye propellturtall og ved bruk av stor stigning på propellbladene. Vi skjønner også at faren for kavitasjon er størst når propellbladet er i posisjon nærmest vannoverflaten.

Hvorfor bør kavitasjon unngås? Vi har ovenfor nevnt at både kraft-genereringen og bladmaterialet kan ødelegges hvis en propell utsettes for utstrakt kavitasjon. Selv i beskjeden grad er kavitasjon sterkt uønsket. Sammenbruddene av dampboblene gir støy og kan også medføre uheldige vibrasjoner, noe som er spesielt viktig å unngå for eksempel for cruiseskip og marinefartøy.

Dimensjonering av konvensjonell propell

Det vises til dataprogrammet "Friprøve" på side 3-27. Før vi gir en kort brukerveiledning av dette, skal vi kommentere de parametrene som skal gis som input til programmet.

Propelldiameter (D) og turtall (RPM). Som det framgår av betegnelsen RPM, oppgis propellturtallet i o/min. Det viser seg at det er mer effektivt å gi store vannmasser en liten fartsøking enn å gi små vannmasser en stor fartsøking. Best virkningsgrad har derfor propeller med lavt turtall og stor diameter. Slike propeller finner vi for eksempel på store tankskip.

EAR og antall propellblad (z). EAR står for "Expanded Blade Area Ratio" og defineres som forholdet mellom utfoldet totalt bladareal og arealet $\pi \cdot D^2/4$. Et lite bladareal er ønskelig med tanke på virkningsgrad fordi det vil medføre små tap på grunn av friksjon. På den annen side kreves et visst bladareal. I det viste programmet kan EAR varieres mellom 0,30 og 1,05. Antall blad (z) kan i programmet variere mellom to og syv. Det er flere forhold som avgjør antall propellblad. Et av dem er at et stort bladareal tilsier mange propellblad. Økes EAR, vil både propellens kraftgenererende flate og friksjonsmotstand øke.

Stigningsforholdet P/D. Med en propells stigning (P) menes den aksielle strekningen som en propell tilbakelegger under en omdreining når vi tenker oss at den beveger seg som en *skrue* som roterer i et fast gjengeparti. Stigningen måles ved 70 % av propellradien. I programmet oppgis stigningen i forhold til propelldiameteren (P/D) og kan variere mellom 0,8 og 1,2. Stort stigningsforhold øker angrepsvinkelen for strømningen inn på bladene og dermed kraftgenereringen på bladene. Samtidig øker imidlertid faren for kavitasjon.

En skipspropell kan ha store dimensjoner *(bilde: Rolls- Royce)*

Eksempel 3.4. Propelldimensjonering. På side 3-14 ble det beregnet motstand og effektbehov for et skip v.hj.a. et dataprogram som arbeider etter Holtrops metode". Vi skal nå v.hj.a. programmet "Friprøve" bestemme diameter og virkningsgrad for en propell som kan gi skipet 20 knop.

Gitt: Skip med volumdeplasement 28264 m^3 og hastighet v_S = 20 knop (10,3 m/s). Fra Freeship-programmet avleses: Motstand R_{tot} = 1312 kN og slepeeffektbehov P_E = 13500 kW. Antatt medstrømsfaktor w = 0,2 gir for propellen v_A = 8,24 m/s. Det kan ses bort fra annen interaksjon mellom propell og skrog. Dermed kan vi altså sette $P_T = P_E$, som gir: $T \cdot v_A = R_{tot} \cdot v_S$. Dette vil si at propellen må gi en skyvekraft T = 1312 kN · 10,3/8,24 = 1640 kN. Programmet skal i starten baseres på følgende parametere: **RPM = 150 omdr/min** (2,5 omdr/s), D=5,5 m, EAR = 0,70, z = 4 og STIG = 1,0

↓

Starter "Friprøve"-programmet ved å gi de nevnte verdier for EAR, z og STIG som input. Vi beregner framgangstallet, $J_a = 8{,}24/(2{,}5 \cdot 5{,}0) = 0{,}66$ (-) og kan da avlese $K_t = 0{,}20$. Dette gir en skyvekraft $T = 0{,}20 \cdot (1025)\ \frac{kg}{m^3}\ (2{,}5\ s^{-1})^2 \cdot (5{,}5\ m)^4 = 1170$ kN. Virkningsgraden avleses på tilhørende graf til $\eta = 0{,}62$. Denne propellen gir for liten skyvekraft.

↑ ***Hvis*** T ≠ 1640 kN, prøv med ny D, eventuelt ny RPM

← ***Gjentar*** prosedyren inntil vi finner en diameter som gir den nødvendige skyvekraften T = 1640 kN. Dette oppnås ved en diameter **D = 6,0 m**. Vi avleser da en virkningsgrad **η = 0,62**

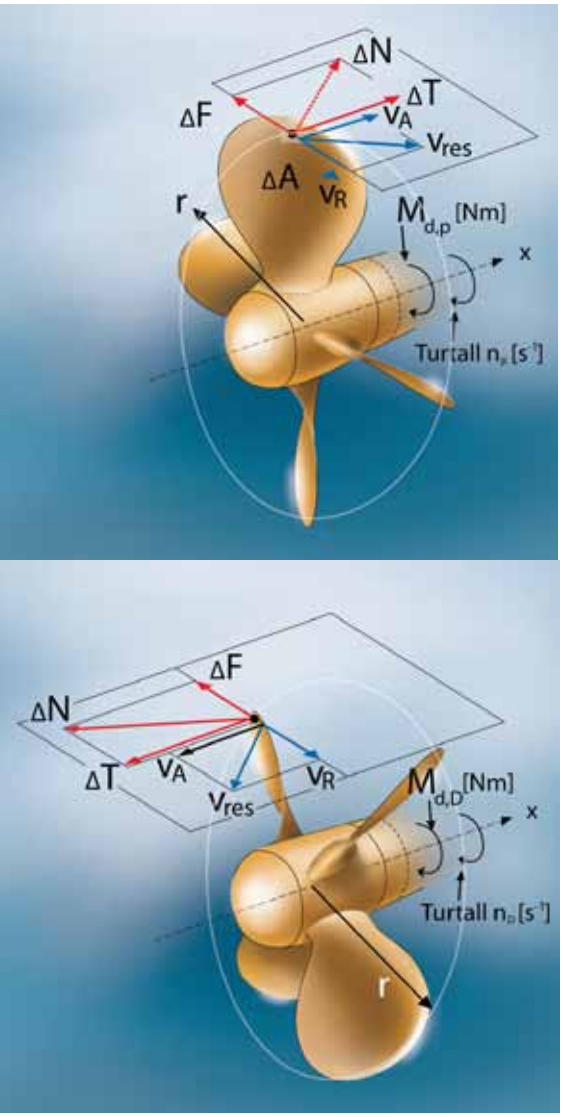
→ ***Hvis*** T = 1275 kN

↓

Avslutter prosedyren ved å forbedre virkningsgraden ved å lete etter andre kombinasjoner av RPM, EAR, z og/eller STIG, men vi er da inne på detaljer som passer bedre for andre studier enn i vgs.

Framdriftssystemer

Ukonvensjonelle propellsystemer



Vridbare propellblad gjør det enkelt å gi full skyvekraft akterover

Krefter og propellhastigheter ved:

a) Fart framover

b) Fart akterover

Dysepropell

a) Rolls Rouce fabrikat

b) Krefter som påvirker dysen. Radielle komponenter av "løftet" opphever hverandre. Aksielle komponenter summeres

Vi skal avslutte behandlingen av framdriftssystemer med å beskrive noen systemer som har det til felles at propellvirkningsgraden forbedres.

Vridbar propell

I et slikt anlegg kan propellbladene vris under drift slik at bladenes stigning blir optimal ved forskjellige hastigheter. Dermed vil grafen for propellvirkningsgraden få et flatere forløp enn det som er vist på skjermbildet på side 3-27. Selv ved meget små hastigheter vil både virkningsgrad og propellens skyvekraft være tilfredsstillende. Dette er av spesiell betydning for fartøyer som arbeider under varierende forhold, for eksempel fiskebåter, forsyningsskip, taubåter osv. I tillegg til vesentlig forbedring av manøvreringsegenskapene vil de gode virkningsgradene selvsagt medføre at fartøyets brenselforbruk reduseres.

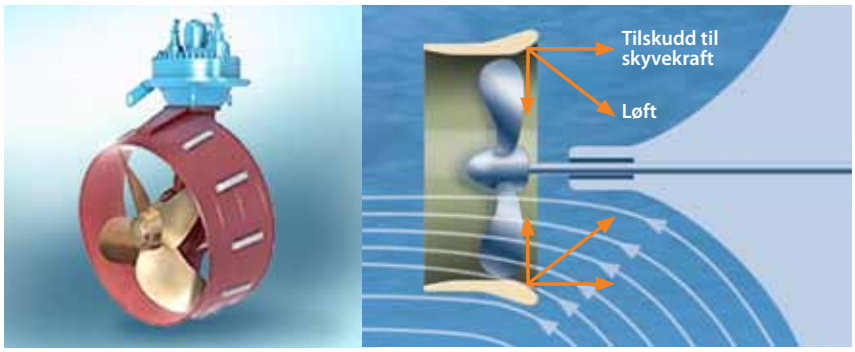
Enda en fordel med vridbare propellblad er at disse på en enkel måte også kan utnyttes til å gi fart akterover, se figur til venstre. Selve vridningen skjer ved at et hydraulisk trykk gir bevegelse av en trekkstang som ligger i en utboring i propellakselen.

Dysepropell

Propellen er omsluttet av en dyse som har et lengdesnitt formet som en foil, se figur. Når vann suges gjennom dysen, gir denne et "løft" som det framgår av figuren nederst. Løftet gir en nettokraft i samme retning som propellen skyver, og effektiviteten til propellsystemet økes. På denne måten kan virkningsgraden forbedres med opptil 10 %. Dysepropellen fungerer best for skip med liten hastighet. Ved store hastigheter vil friksjonsmotstanden på selve dysen overstige den ekstra skyvekraften som oppnås.

Dysen har også den fordel at den bidrar til å hindre at fremmedlegemer kommer inn i propellen. Dette er særlig interessant for en del fiskebåter.

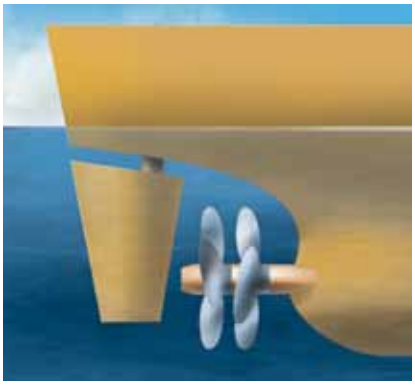
En propell bør generelt ikke stå for nær skroget. Dersom den gjør det, kan trykkimpulser overføres til skroget og forårsake støy og vibrasjoner. En dyse rundt propellen vil være med på å dempe slike trykkimpulser.



Kontraroterende propeller

I strømmen fra en propell vil noe energi eksistere som roterende bevegelsesenergi i virvler. Denne energien går normalt tapt, men utnyttes hvis systemet er utført med kontraroterende propeller. Disse roterer altså hver sin vei, og rotasjonsenergien ut fra den første propellen blir utnyttet av den bakerste til å øke sin skyvekraft. Dette kan gi en bedring av virkningsgraden på 10—15 %, samtidig som propellene kan lages med mindre diameter. Demping av trykkimpulser, og dermed forbedring av støynivå, er en annen fordel med kontraroterende propeller.

Slike systemer har imidlertid også ulemper. Det kreves komplekse mekaniske løsninger for å legge den ene propellakselen inne i den andre samtidig som disse skal rotere hver sin vei. Konstruksjonen blir derfor mer kostbar enn konvensjonelle løsninger både når det gjelder investering og vedlikehold. De brukes derfor først og fremst på skip hvor det stilles spesielle krav til god virkningsgrad eller kompakte konstruksjoner.



Kontraroterende propeller

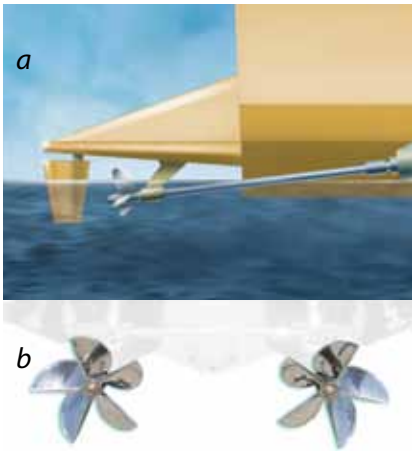
Propellsystemer for store hastigheter

I hurtiggående fartøyer er det særlig to forhold som gir spesielle utfordringer for propulsjonssystemet. For det første må det tas hensyn til at kavitasjon i større eller mindre grad ikke er til å unngå. For det andre må systemet utformes slik at akseloverføringen fram til propellen (inklusiv støttebraketter og lignende) ikke gir for stor tilleggsmotstand ved de høye hastigheter som er aktuelle. Innenfor rammen av denne boka er det bare plass til å nevne kortfattete eksempler på konstruktive løsninger som tar hensyn til disse utfordringene.

Superkaviterende propeller. Som oftest er altså delvis kavitasjon ikke til å unngå, og det kan da være hensiktsmessig å basere seg på såkalte superkaviterende propell. Med dette menes en propell hvor hele sugesiden kaviterer og altså utsettes for vanndampens metningstrykk. Dette er oppnådd ved å benytte et relativt stort stigningsforhold. Faktisk kan slike fullt kaviterende flater unngå de skadevirkninger som delvis kavitasjon kan medføre. Slike superkaviterende propeller brukes som oftest ved fartøyhastigheter på 40 knop eller mer.
Et eksempel på tilhørende arrangement av kraftoverføring er vist på figur til høyre.

Kraftoverføring til propell i hurtiggående fartøy
Arrangementet gir dragende propell (Ulstein)

Overflateskjærende propeller. For å redusere motstanden av propellaksel og støttebraketter mest mulig utføres kraftoveringssystemet ofte slik at propellene bare delvis blir neddykket, se figur til høyre. Slike propeller kalles da overflateskjærende (free surface-piercing). De vil nødvendigvis dra med seg noe luft, og ved de høyeste turtallene/hastighetene vil sugesiden på propellene være helt tørre. Dermed unngås vanlig kavitasjon. De er imidlertid designet for denne tilstanden og kan oppnå tilfredsstillende propellvirkningsgrader ved de høye hastighetene som brukes. Disse er ofte mer enn 50 knop.



Overflateskjærende propeller for planende fartøy.
a) Kraftoverføring med skråstilt propellaksel (gir glattest mulig skrog)
b) Propellene arrangeres parvis for å gi best mulig fordeling av skyvekreftene
(Progress Ingeniørfirma AS)

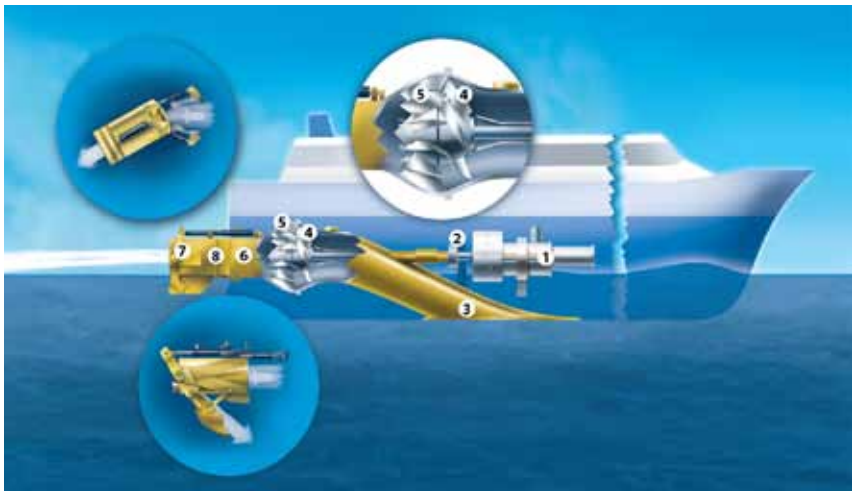
En ulempe med disse propellene er at det kan oppstå store vibrasjonskreften når bladene går over fra vann til luft. Relativt mange propellblad vil kunne redusere vibrasjonskreftene. En annen ulempe er at det oppstår krefter sideveis fra slike propeller. Derfor arrangeres de oftest i par, se nederste figur.

Framdriftssystemer

Vannjet

Dette er i dag det vanligste framdriftssystem for hurtiggående fartøy. Er disse utformet som katamaraner, brukes oftest to separate anlegg. Det er to hovedårsaker til at vannjet velges framfor propelldrift. For det første er et vannjetsystem ikke så følsomt for kavitasjonsproblemer som en propell ved høye hastigheter. For det andre er virkningsgraden bedre ved slike hastigheter.

Framdriftssystem med vannjet og gassturbin (Rolls-Royce)
Vann suges inn fra undersiden av fartøyet, gis en akselerasjon i pumpesystemet (4, 5 og 6) og kastes ut i en stråle bakover. Motkraften til akselerasjonskraften påvirker impelleren og fartøyets thrustlager (2), hvor det oppstår en skyvekraft som virker framover



Virkemåte

Anvendelse av Newtons lover. Det vises til figur til venstre og til den forenklede forklaring på en propells virkemåte som ble gitt på side 3-25. Den samme forklaringen kan også brukes på en vannjet. Forskjellen er bare at i et vannjetsystem foregår akselerasjonen av vannet i et pumpeanlegg inne i fartøyet, mens den i et propelldrevet anlegg foregår utenfor skroget. I begge tilfelle er det Newtons 2. lov som ideelt sett kan legges til grunn for beregning av skyvekraften som genereres. For et kontinuerlig arbeidende system er det greiest å gi denne loven en ny skrivemåte, som også ble vist på side 3-25:

$$F = \frac{m}{t} \cdot \Delta v = \dot{m} \cdot (v_{ut} - v_{inn}) \quad (N)$$

Her er:

$\dot{m}$ = vannstrøm (kg /s)
Δv = vannstrømmens hastighetsøking gjennom pumpeenheten (m/s)
F = kontinuerlig kraft på vannet, gir like stor, men motsatt rettet skyvekraft T på thrustlager

Muskeldrevet pulsvannjet
Geir har tidligere vist interesse for å bruke flåten sin til hydrostatiske eksperimenter (se oppg. 2-17, 18 og 19). Siden har han fulgt opp med hydrodynamiske forsøk med "utvikling" av et nytt framdriftssystem. Han bruker ei bøtte til å kaste vann bakover. Når bøtta akselererer (1—2), utsettes vannet for en midlere kraft F=m · a. Geir må da samtidig sparke fra med en midlere kraft T mot "thrust-lageret". Denne kraften virker som en skyvekraft på flåten. Prosessen gjentas så hyppig han klarer. Skyvekraften T kommer altså i pulser, men vil holde flåten i bevegelse mot høyre. Det vises til oppg. 3.9. Farten blir imidlertid svært liten og Geir bør nok heller padle.

Oppbygging av et vannjetsystem. Som det framgår av figuren på forrige side, omfatter et vannjetsystem følgende hoveddeler:

1. Gassturbin for drift av pumpe, inkl. gir. Alternativt kan hurtiggående dieselmotor brukes. For anlegg mindre enn ca1000 kW kan det brukes dieselmotor med direkte drift.
2. Thrustlager
3. Innløpskanal for vann, tas inn fra skrogets underside
4. Pumpas skovlsystem (impeller), som akselererer vannet
5. Stator med skovlsystem, for å gi vannstrømmen en aksiell retning
6. Dyse, hvor vannhastigheten øker samtidig som trykket synker
7. Utløpsstråle, like over eller like under vannflaten
8. Manøvreringsenhet, for bøyning av utløpsstrålen sideveis eller for full reversering

Fordeler med framdriftssystem basert på vannjet

De viktigste fordelene med et vannjetsystem kan listes opp slik:

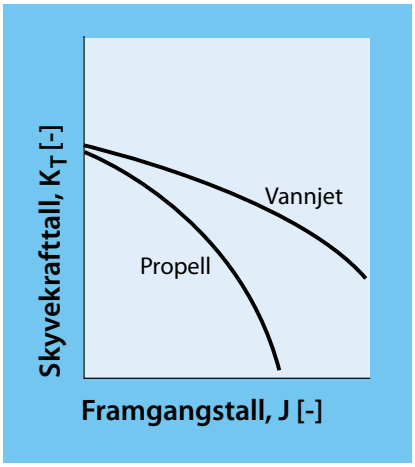
- Ikke så utsatt for kavitasjonsproblemer som et propellsystem
- Flatere graf for skyvekraft som funksjon av fartøyhastighet enn for en propell, se figur øverst til høyre. Også for et vannjetsystem kan vi definere dimensjonsløse størrelser på lignende måte som for en propell (impelleren kan på en måte sammenlignes med en propell): Framgangstall $J = v_S/(n \cdot D)$ og skyvekrafttall $K_T = T/(\rho \cdot n^2 \cdot D^4)$. Her er n og D henholdsvis turtall og diameter for pumpeenhetens impeller og v_S fartøyets hastighet. Figuren øverst viser tydelig hvor mye mer effektivt en vannjet er når det gjelder å generere skyvekrefter ved høye hastigheter.
- Den samme tendensen gjenspeiles i virkningsgraden, som kan bli meget tilfredsstillende ved høye hastigheter (0,7—0,75).
- Ikke noen appendikser (braketter, ror, propellaksel osv.) på skroget, altså redusert appendiksmotstand (jf. side 3-12), særlig ved høye hastigheter.
- Mindre totalvekt enn for et komplett framdriftssystem med propell

Operative karakteristikker

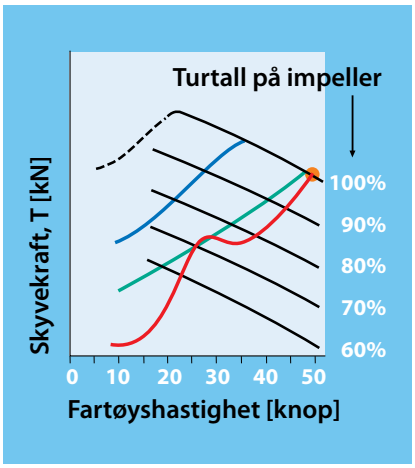
I nederste figur til høyre er vist hvordan effektiv skyvekraft varierer med økende hastighet på fartøyet. Slike diagrammer leveres av vannjetsystemets fabrikant. Vi ser at den skyvekraft som vannjetsystemet genererer ved et gitt, konstant turtall på impelleren, synker med fartøyhastigheten, altså den sammen tendensen som den dimensjonsløse framstillingen ovenfor viser. I figuren er det lagt inn grafer for forskjellige impellerturtall.

I figuren er det videre lagt inn grafer som definerer begrensninger av skyvekraften. Øverste, stiplete graf forteller når det oppstår fullstendig sammenbrudd av skyvekraften, mens og blå graf viser når kavitasjonsproblemene blir for store. Fabrikanten legger også alltid inn en øvre grense for hvor stor skyvekraft som tåles ved kontinuerlig drift (grønn graf).

Legger man inn en graf for fartøyets totale motstand i samme diagram, kan det kontrolleres at fartøyet oppnår den forutsatte hastighet ved fullt turtall (100 %) på det valgte vannjetsystemet.



Skjematisk, dimensjonsløs sammenligning av vannjet og konvensjonell propell mht. generering av skyvekraft ved store hastigheter. *Fra [7.6]*

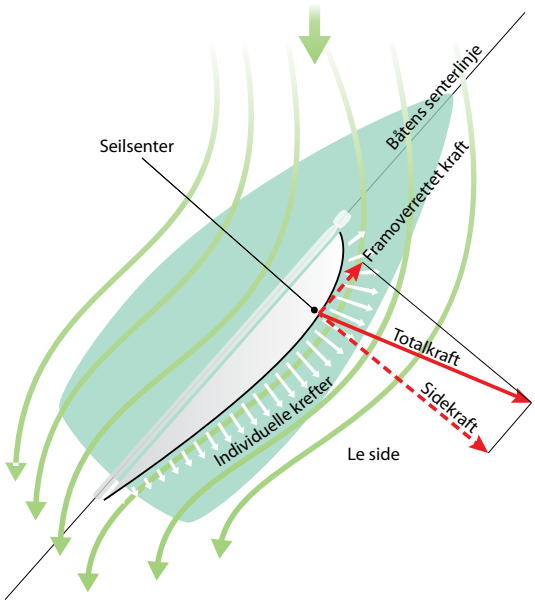


Operative karakteristikker for skyvekraften fra en vannjet, med innlagt graf for totalmotstand for en katamaran. *Fra [7.6]*
Sorte grafer: *Generert skyvekraft ved ulike turtall på impeller*
Blå graf: *Over denne grensen opptrer alvorlig kavitasjon. (kan bare unntaksvis overskrides)*
Grønn graf: *Grense for kontinuerlig drift (kan overskrides i 10 % av driftstiden)*
Rød graf: *Totalmotstand for en katamaran med servicehastighet 50 knop*
Stiplet graf: *Sammenbrudd i generering av skyvekraft*

Framdriftssystemer

Seil, seilbåter og vikingskip

GAIA, kopi av Gokstadskipet
Loa = 23,4 m. Bygget i Bjørkedalen 1989 for Ragnar Thorset Adventure



Prinsipiell virkemåte for hvordan et seil genererer en framoverrettet kraft. *Seilet virker som en aerodynamisk foil, jf. forklaring på side 3-22 for en hydrodynamisk foil*

Historie

Vikingskipet ga et enormt teknologisprang i utviklingen av seilskip. Historisk er seilfartøy de tidligste sjøgående fartøy som utnytter naturens rene energi for kontrollert framdrift. De tidligste seil vises på egyptiske elvebåter fra omkring 3000 år før vår tidsregning. Både fønikere og romere bygde solide sjøgående seilfartøy for handel og krigføring i Middelhavet, men utviklingen av vikingskip representerte et teknologisprang mot lette, hurtige og havgående seilskip. Skandinaviske vikingskip dominerte store hav- og kystområder fra 800-tallet og fram til 1100-tallet e.Kr. Skipene ble utviklet fra slanke klinkbygde robåter som ble utviklet i tiden 350—700 e.Kr. Osebergskipet, bygget ca. år 820, er det eldste vikingskip med seil som er funnet. Gokstadskipet, bygget 80 år senere, er videreutviket styrkemessig og er et fantastisk havgående fartøy med en fleksibel og lett skrogkonstruksjon, med effektiv og sikker rigg og seil, og med krefter fra riggen fordelt ut i skroget gjennom et overraskende avansert mastefot- og mastestøttesystem.

Generelt om seilbåten som farkost

Kort om virkemåte. Seilbåten består av fire hoveddeler: skrog, seil, kjøl og ror. Hovedprinsippet er at krefter genereres som for foilsystemer. Virkemåten for foiler er forklart på side 3-22. Seilet som drivkraft utnytter energi fra vind mens skroget med kjøl gir laterale krefter (sidekrefter) som balanserer seilenes laterale kraftkomponenter. I denne sammenhengen er roret en finne som kan finjustere og kontrollere balansen mellom aerodynamiske og hydrodynamiske krefter.

Samspillet mellom genererte krefter og mannskapets aksjoner er avgjørende. Det som er spesielt og spennende for seilbåten er det helt avgjørende og følsomme samspillet mellom aerodynamiske og hydrodynamiske krefter som må balanseres av mannskapets aksjoner. Seilbåtteorier og vitenskapelig dokumentasjon har hittil stort sett vært basert på forhold i stille vann og med jevn vind. Videre forsking og utvikling må også rette seg mot seiling som et dynamisk fenomen, med seiling i sjøgang og et komplekst samspill mellom bevegelse i bølger. Krefter mot skrog, kjøl, ror, rigg, seil og sist, men ikke minst mannskapets utnyttelse av krefter i seilet i balanse med krefter generert av skroget.

Hvilke krefter virker på en seilbåt? På disse fire sidene skal vi lære mer om de aerodynamiske og hydrodynamiske krefter og samspillet mellom disse, noe som er bestemmende for seilbåtens egenskaper. Kraftbalansen bestemmes først og fremst av:

- Fartøyets motstand ved økende hastighet
- Undervannsskrogets evne til å generere sidekraft
- Seilets evne til å generere kraft i ønsket retning i forhold til vindretning
- Mulighetene til å kontrollere kraftbalansen mellom skrog og seil ved hjelp av ror og trimming av båt og seil

Et seil virker som en foil. Før vi ser nærmere på de krefter som virker på en seilbåt, bør vi kjenne prinsippet for et seils virkemåte.

Prinsippet er det samme som ble beskrevet på side 3-22 for en hydrodynamisk foil. Vinden blåser hurtigere forbi yttersiden av seilet på le side, og det oppstår en resulterende, aerodynamisk kraft som vist (FA_{TOT}). Denne virker i seilkraftsenteret (CE) og kan dekomponeres i en sideveis kraft og en framoverrettet kraft.

Krefter og geometri ved seiling opp mot vinden (kryss)

Seiling med effektiv kryssing opp mot vinden er generelt den mest kompliserte del av en seilas. Seiling med kryss utfordrer balansen mellom riggens aerodynamiske effektivitet og skrogets hydrodynamiske effektivitet, sammen med skrogets motstand og båtens statiske og dynamiske stabilitet mot krenging.

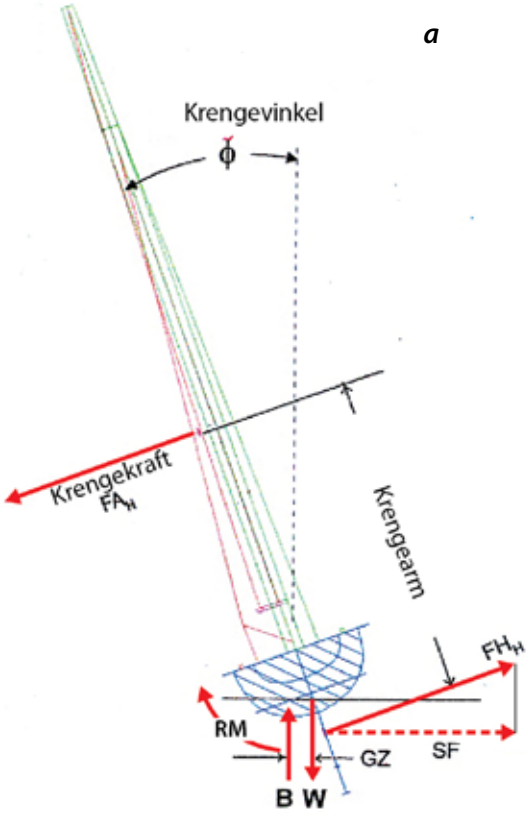
Figurene på denne siden er omfattende, men de viser "bare" de forskjellige aerodynamiske og hydrodynamiske krefter, deres relative posisjoner og tilhørende momenter.

Figur a viser en seilbåt sett fra akter. Den aerodynamiske krengekraftkomponent (FA_H) er like stor, men har motsatt retning av den hydrodynamiske kraftretning (FH_H). Momentet fra disse ($FA_H \cdot a$) gjør at båten legger seg over med en krengevinkel. Krengevinkel holdes under kontroll av de rettende hydrostatiske og hydrodynamiske momenter.

Figur b viser båt og seil sett ovenfra, med retning av horisontal komponent av den totale hydrodynamiske kraft på båt (FH_{TOT}). Dette er en vektorsum av sidekraft og motstand. For at likevekt skal opprettholdes, må den totale aerodynamiske kraft (FA_{TOT}) være i størrelsesorden lik, og ha motsatt retning av, FH_{TOT}.

Figur c viser seilbåten sett fra siden. Angrepspunkt for den totale hydrodynamiske sidekraft (CLR), funnet for eksempel ved modellforsøk, og beregnet angrepspunkt for seilplanets aerodynamiske sidekraft(CE), vises i denne figuren. CE ligger klart foran CLR, men figurene a og b viser seilbåten med kraftlikevekt. Dette vi si at resultatmomentet av kreftene i CE og CLR er kompensert med moment fra rorkraft.

a

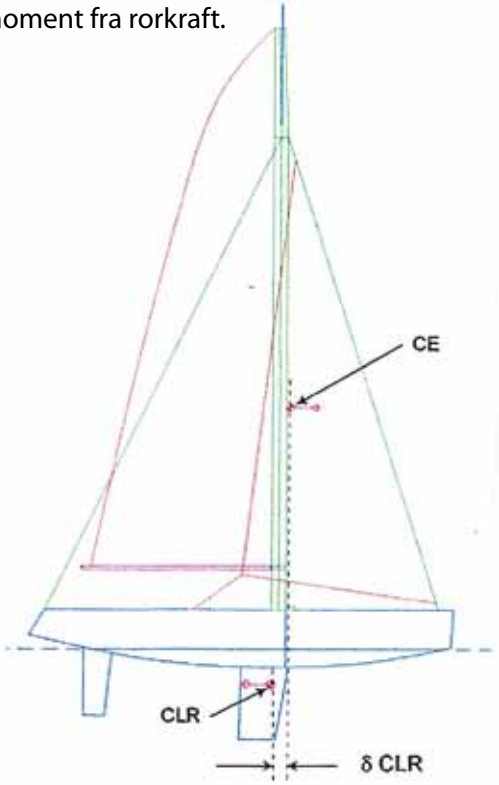


Krefter, angrepspunkter og momenter som virker på en seilbåt.

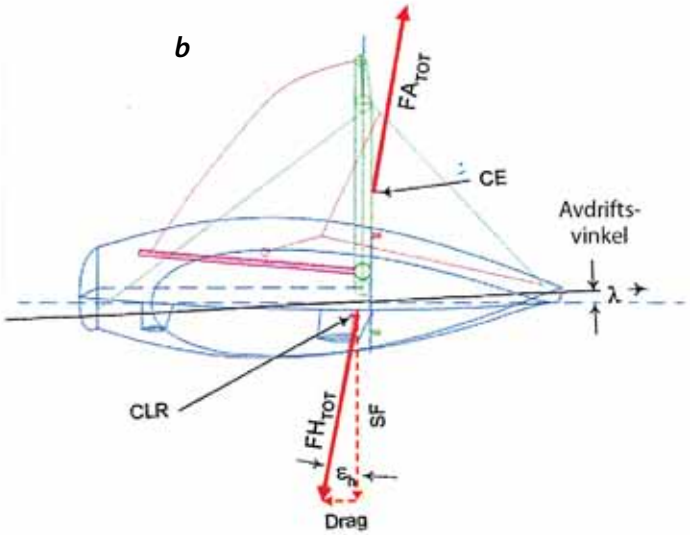
a. Seilbåten sett fra akter
b. Sett ovenfra
c. Sett fra siden

FA_{TOT} = total aerodynamisk kraft
FA_H = hydrodynamisk krengekraft
FH_{TOT} = total hydrodynamisk kraft
FH_H = hydrodynamisk krengekraft
SF = sidekraft
CLR = senter for sideveis motstand på skrog
W = båtens tyngde
B = oppdriftskraft
RM = rettende moment
CE = senter for seilkraft

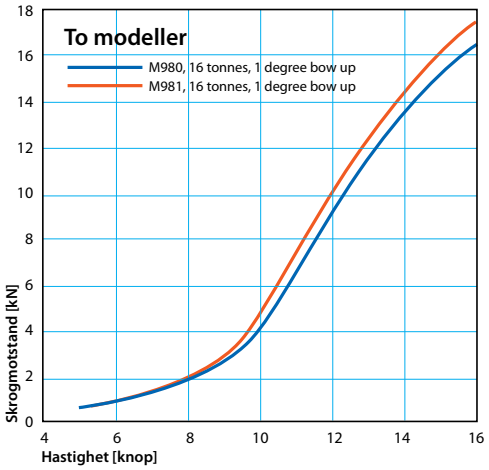
C



b



b



Modellprøving av Osebergskipet i skala 1:10, utført av MARINTEK i skipsmodelltank ved Marinteknisk Senter i 2009.

a. Forsøksoppstilling med modellen festet til slepevogn. Bildet ble tatt under 20 knops fart i stille vann og uten krenging og avdrift.

b. Resultater fra prøvene. Grafene viser skrogmotstand som funksjon av hastighet. Skroget er utstyrt med kjøl og ror. Verdiene gjelder for seiling uten krenging og avdrift. Forsøkene med hastighet opptil 12 knop og krengevinkel opptil 15 grader viser at styrebalanse er perfekt og opprettholdes ved å bruke roret bare 1,7°!

c. Motstandsprøve med Osebergskipet i 12 knops fart og med realistisk avdriftsvinkel og krenging.

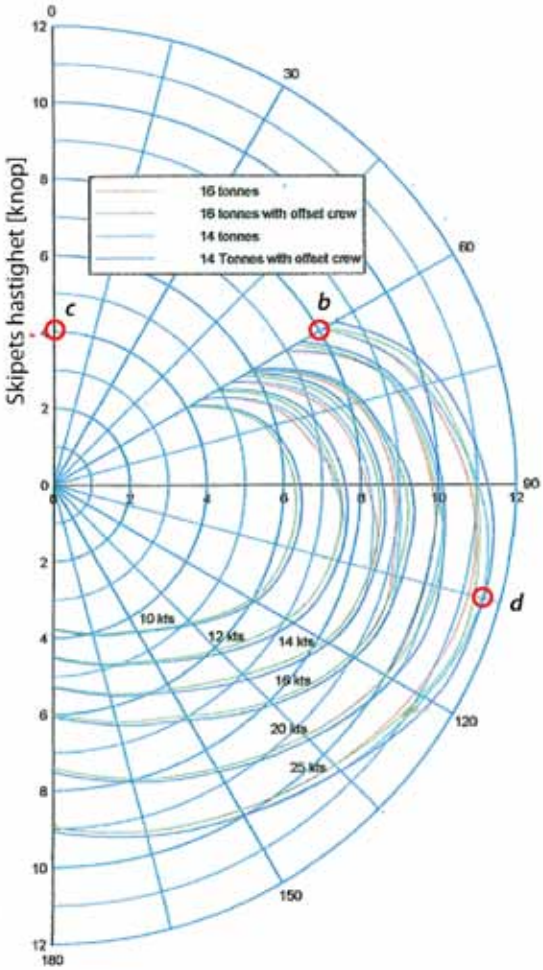
Modellprøving av Osebergskipet

Prøving uten krenging og avdrift. Osebergskipets seilegenskaper i stille vann med hastigheter opptil 20 knop ble testet ved MARINTEK og NTNU i 2009 ved bruk av nyeste type avansert seilbåtdynamometer. Forsøksoppstilling og resultater er vist i figurer til venstre.

Skrogmotstanden ble også målt når modellen var montert med forskjellige krengevinkler og avdriftsvinkler, se figur c. Det vil føre for langt å komme nærmere inn på disse resultatene, men det kan nevnes at laterale momenter ved opptil 10 knops fart balanserte perfekt med minimal bruk av ror (± 1,5°).

Beregninger av skipets hastigheter under seil ved ulike vindhastigheter og realistiske krenge- og avdriftsvinkler. Det finnes dataprogrammer som kombinerer de hydrodynamiske egenskapene som er kartlagt gjennom de nevnte prøvene og aerodynamiske egenskaper for riggen. De nødvendige aerodynamiske data for Osebergriggen ble bestemt ut fra en rekke eksperimentelle data fra utenlandske vindtunnel tester. Resultatene av beregningene er vist i polarplottet nedenfor. I beregningene ble det korrigert for vindmotstand for både båt og rigg.

Polarplottet viser skipets hastighetskurver ved forskjellige vindhastigheter og med mannskapet som flyttbar ballast. Med mannskapet plassert i lo (mot vinden) øker fartøyets stabilitet og dermed hastighet. Bruk av polarplottet framgår av eksempler på neste side.



Seilingshastigheter for Osebergskipet vist som polarplott.
Skipets hastighet er vist ved forskjellige vindhastigheter og vindretninger.
Deplasementer: 14 og 16 tonn, og mannskap som flyttbar ballast.

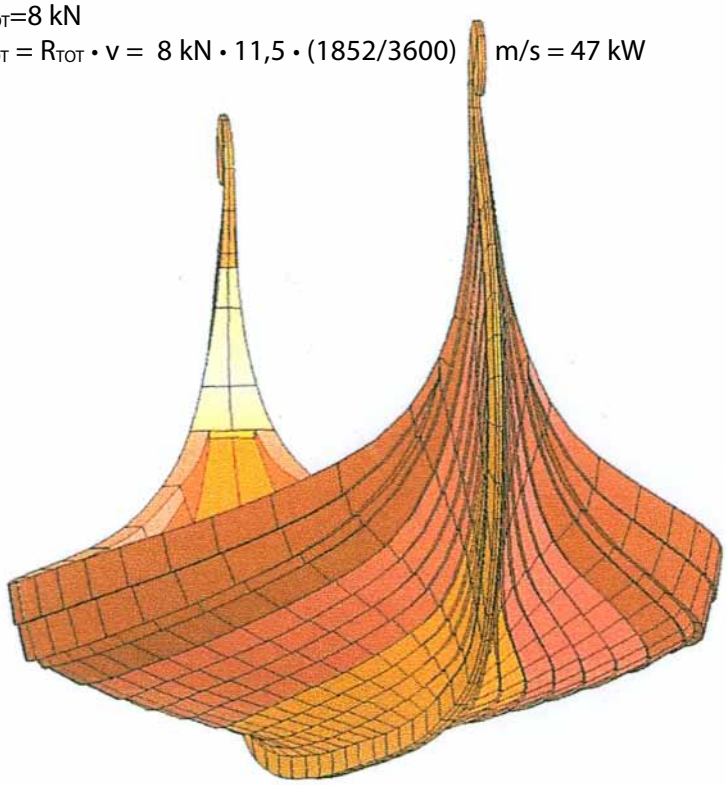
Skipets hastighet ved ulike vindhastigheter og vindretninger avleses på de radielle aksene. Vindretning defineres som 0° ved motvind og 180° ved vind rett aktenfra.

Eksempel 3.5. Basert på resultatene fra hastighetsprøvene for Osebergskipet skal følgende størrelser bestemmes ved seiling i 25 knops vind, med deplasement 16 tonn og mannskapet ikke plassert mot lo:

a) Skipets hastighet ved full medvind
b Skipets hastighet ved vind 60° imot.
c) Skipets effektive hastighet mot vinden ved vind 60° imot
d) Maksimal hastighet som skipet kan oppnå, og den vindretning som da gjelder.
e) Froudes tall ved maksimal hastighet. Marker denne tilstanden i diagrammet på side 3-19, og kommenter beliggenheten. Hvordan defineres hurtiggående fartøy ifølge figuren nederst på side 3-18?
f) Den motstand i kN som skipet har ved maksimal hastighet og den tilhørende motstandseffekt

Løsninger finnes ved avlesninger i aktuelle punkter (ca-verdier):

a) 9 knop,
b) 8 knop,
c) 4 knop,
d) 11,5 knop, 15° aktenfor tvers
e) $F_n = v/\sqrt{g \cdot L} = 11,5 \cdot (1852/3600) / \sqrt{9,8 \cdot 21,5} = 0,41$
Ved markering av denne tilstanden i figur side 3-18 ser vi at Osebergskipet ved maksimal hastighet ligger på grensen til området for hurtiggående skip. Ifølge definisjon i tabellen på side 3-18 settes grensen ved Fn=0,4-0,5. *Vi kan derfor si at vikingene bygde fantastiske hurtiggående båter allerede for 1200 år siden.*
f) R_{TOT}=8 kN
$P_{TOT} = R_{TOT} \cdot v = 8 \text{ kN} \cdot 11,5 \cdot (1852/3600)$ m/s = 47 kW



Osebergskipet, med sine utrolig flotte linjer og former, ble bygget i tiden 800-850

Vikingskipene representerte en unik teknologisk utvikling innen datidens skipsbygging. Både design, linjer, former og tekniske detaljer tydet på teknologisk overlegenhet i forhold til annen skipsbygging i verden på den tiden, og beviste store kunnskaper om hydrodynamikk og styrkemessige forhold. Samtidig hadde skipet fått en forbausende fin kunstnerisk utsmykning.

Tekniske data:

Lengde: 21,5 m, total bredde: 5,1 m
Deplasement: 16 tonn
Skipet kunne både ros (med 15 par årer (30 roere) og seiles (med opptil 11,5 knops fart, se eksempel på forrige side). Les mer om vikingtiden på side 9-5.

Undringsoppgave:

Hvor stor fartsgevinst ville Osebergskipet oppnådd hvis mannskapet flyttet seg fra le opp mot lo under seiling med samme vind og 14 tonn deplasement? Hvorfor oppnås det en fartsgevinst i det hele tatt?

Oppgaver

Oppgave 3.1
Les på nytt side 3-3. Lag en figur med båten som slepes og slepebåten. Den sistnevnte båten drives med utenbordsmotor, og slepet forutsettes å skje med konstant hastighet. Oppgaven går ut på å tegne inn de ytre krefter som virker på båtene. Betrakt hver av båtene som egne enheter som inkluderer personene om bord. Kreftene er enten vertikale eller horisontale. Bruk de vanlige regler for hvordan krefter skal symboliseres når det gjelder retning, angrepspunkt og størrelse. Bruk videre en skala for horisontale krefter og en annen skala for de vertikale kreftene.

a) Tegn inn alle ytre krefter som virker på den båten som slepes.
b) Tegn inn alle ytre krefter som virker på slepebåten
c) Etabler flest mulig ligninger mellom kreftene

Oppgave 3.2
Vi har ei kule med diameter 1,0 m som dras med en hastighet lik 1,0 m/s i ferskvann. Kula beveger seg så langt nede i vannet at det ikke danner seg bølger på overflaten.
a) Hvor stort er Rn.
b) Fra graf øverst på side 3-9 antas et motstandstall lik 0,13. Beregn motstanden.

Oppgave 3.3
For å avklare svært sprikende gjetninger fra to skoleelever skal vi foreta en tilnærmet beregning av effektbehovet for en norsk undervannsbåt (Ula-klassen) i full fart i neddykket tilstand. Farten er da 23 knop. En slik U-båt har et volumdeplasement på 1140 m3, en lengde på 59 m og et sylindrisk "trykkskrog" med diameter 5,4 m. Den selvsagt avrundet forut og og smalner litt akterover. Både volum- og arealmessig oppveies dette av tårnet, som vi ikke tar i betraktning i denne oppgaven. Det vises for øvrig til figur side 9-35. Det skal nå gjøres følgende overslagsberegninger, basert på en sylinder med diameter 5,4 m og lengde 59 m:

a) Utled først at forholdet mellom en sylinders volum og sylinderflatens areal kan skrives slik:
V / A = 4 / D
b) Bruk dette forholdet til en tilnærmet bestemmelse av U-båtens våte overflate som vi heretter kaller S
c) Bestem Reynolds tall og Froudes tall
d) Bestem totalmotstanden ved å bruke et totalmotstandstall på 0,002, typisk for U-båter. For slike båter i neddykket består totalmotstanden hovedsakelig av friksjonsmotstand mens trykkmotstanden betyr lite.
e) Bestem effektbehov på fremdriftsmotoren (elektromotoren) når virkningsgrader settes lik 0.96 for kraftoverføringen og 0,72 for propulsjonssystemet.

Oppgave 3.4
En modell av et 167 m langt kjemisk tankskip er utført i skala 1: 25. Den testes i en slepetank med en hastighet 2,06 m/s og slepekraften måles til 110 N. Modellen har en våt overflate på 9,5 m^2. Beregn for modellen:
a) Lengde i vannlinje og totalmotstandstall
b) Reynolds tall, friksjonsmotstandstall og bølgemotstandstall
Beregn for fullskalaskipet:
c) Reynolds tall, friksjonsmotstandstall og totalmotstandstall. Hvorfor kan bølgemotstandsrallet settes lik det for modellen?
d) Totalmotstand og slepeeffekt ved 20 knop

Oppgave 3.5
For en katamaran gjelder følgende spesifikasjoner:

- Lengde: 40 m
- Total bredde: 10,1 m
- Dypgående: 1,46 m
- Bredde på hvert delskrog: 2,7 m.
- Fart 36 knop
- To hovedmotorer

For fartøyet skal totalmotstand og nødvendig levert effekt fra hovedmotorene ved full fart (36 knop) beregnes. Dette gjøres ved å følge prosedyren nedenfor:

a) Beregn Reynolds tall og Froudes tall

b) Beregn friksjonsmotstandstallet etter ITTC formel
c) Bestem bølgemotstandstallet fra graf for katamaraner på side 3-20
d) Beregn våt overflate (ta ikke hensyn til "spissing" på skrogene)
e) Beregn totalmotstanden
f) Bestem nødvendig motoreffekt for begge motorene samlet. Bruk 0,7 og 0,95 som virkningsgrader for propellen og kraftoverføringen.

Oppgave 3.6

Geir står på vannski som er 1,2 m lange og 0,2 m brede og har en masse på 10 kg til sammen. Geir selv har en masse på 53 kg. Det vises til figur av planende fartøy på side 3-21. Også for Geir vil det bygge seg opp trykk under vannskiene med en trykkfordeling omtrent som vist. Hastigheten er konstant 14 knop. Skiene danner en vinkel på 6 gr. med horisontalen.

a) Lag en figur som viser alle ytre krefter som virker på en av vannskiene
b) Beregn vått areal når det antas at 75 % av skilengden er effektiv under fart (inklusiv bølgedannelsen, se figuren)
c) Beregn alle ytre krefter. Bruk ITTC-formel for beregning av friksjonskraften. Innflytelsen av trimvinkelen på friksjonskraften og trykkraften er så liten at vi kan anta at de virker horisontalt og vertikalt.
d) Beregn midlere trykk under skiene og hvor stor andel i prosent dette utgjør av stagnasjonstrykket. Denne andelen må være mindre enn ca. 50 % av stagnasjonstrykket for at det skal være mulig å bevege seg på denne måten

Oppgave 3.7

a) I oppgave 3.3 er blitt bestemt nødvendig effekt på elektromotoren som skal drive undervannsbåten. Beregn hvor stort dreiemoment motoren må gi hvis turtallet er 1800 o/min. Turtallet på propellene antas å være 300 o/min.
b) Hvor stor blir utvekslingen på giret mellom elektromotor og propell?

Oppgave 3.8

På side 3-27 er det vist til et dataprogram som kan brukes til dimensjonering av propeller. Programmet baseres på tre dimensjonsløse grupper av størrelser. Vis at disse er dimensjonsløse:

a) skyvekrafttallet
b) dreimomenttallet
c) framgangstallet

Oppgave 3.9

Det vises til figur av av Geirs pulsvannjetsystem vist på side 3-32. Dette er tatt med bare av pedagogiske grunner. Geir skjønte nok allerede på forhånd at ideen i praksis var "dødfødt", men gjennomførte forsøket for å få en bekreftelse på at bevegelsesligningene og Newtons 2. lov i fysikken var gyldige. Hen jobbet som beskrevet nedenfor og gjorde grove overslagsberegninger som forlangt i punktene a) - e)

Arbeidsprosess:

- Bøtta fylles med 6 kg vann hver gang og blir akselerert over en strekning på 1 m
- Utført arbeid på vannet i akselerasjonsperioden er 300 J
- Arbeidsprosessen gjentas 20 ganger per min.

Beregninger (som bør kunne gjøres i hodet):

a) Vannets midlere fart når det forlater bøtta
b) Midlere kraft som Geir bruker på vannet
c) Midlere skyvekraft som Geir sparker fra med på flåten under arbeidsprosessen
d) Akselerasjonsperiodens varighet
e) Muskeleffekten som Geir yter i snitt under en kort tur med flåten. Vi ser bort fra det arbeidet Geir gjør med å fylle bøtta

Referanser

3-1 Odd Faltinsen: Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles. Cambridge University Press. Cambridge 2005

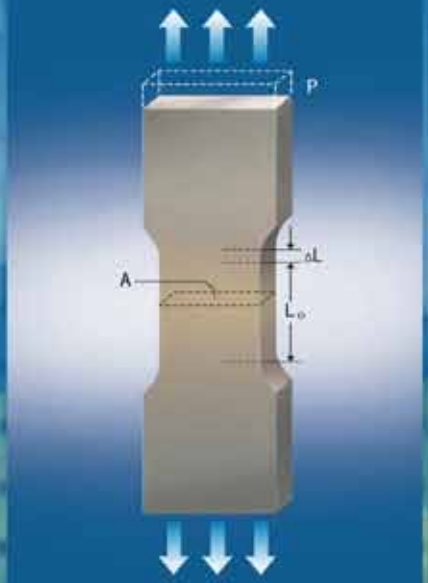
3-2 Sverre Sten, Knut Minsaas: Ship resistance. Kompendium i fag TMR4220 ved Institutt for marin teknikk, NTNU. Trondheim, 2012.

3-3 Sverre Sten: Experimental Methods in Marine Hydrodynamics. Kompendium i fag TMR7 ved Institutt for marin teknikk, NTNU. Trondheim 2012

3.4 Sverre Sten: Unconventional Propulsion. Kompendium i fag 4MR 4220 ved Institutt for marin teknikk, NTNU. Trondheim. 2013

3.5 K. J. Rawson, E. C. Tupper: Basic Ship Theory. Butterworth-Heinemann. Oxford. Fifth edition. 1994

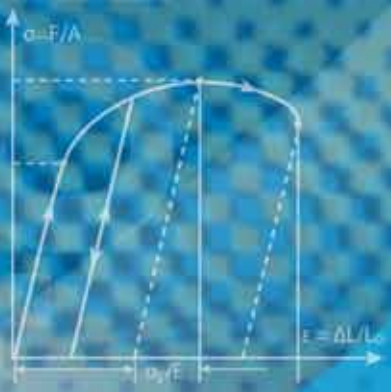
3.6 Frank M. White: Fluid Mechanics. Third Edition. McGraw-Hill, Inc. 1994



Forfatter: Stig Berge

Materialteknologi

Havromsteknologi



Innhold

Innledning....2
Typer av konstruksjonsmaterialer....4
Metaller....4
Keramer....7
Polymerer....8
Kompositter....9
Metaller....10
Styrkeegenskaper....10
Trykk- og strekkbelastning....13
Formbarhet....13
Nedbrytingsmekanismer....14
Utmatting....14
Korrosjon....16
Galvanisk korrosjon — katodisk vern....17
Korrosjonsbestandige materialer....17
Forming av materialer....18
Metallutvinning....18
Støping....19
Smiing....20
Ekstrusjon....21
Sammenføyninger....21
Dimensjonering....22
Havari....22
Sammendrag....23
Oppgaver....24
Referanser....26

NTNU
Institutt for marin teknikk

4

Dette kapitlet handler om materialer, og hvordan vi omgjør materialer til nyttige produkter. For at et produkt skal få de egenskapene som er nødvendige, som styrke, form og holdbarhet, må materialene ha tilstrekkelig gode egenskaper. Her skal vi lære om disse egenskapene og om hvordan vi sikrer oss at materialene er gode nok.

Skal vi lage et produkt, enten det er en fuglekasse eller et skip, må vi ha materialer. Gjennom historien har materialer vært så viktige for menneskene at vi har gitt tidsepokene navn etter de materialene som var tilgjengelige, vi snakker om steinalder, bronsealder og jernalder.

For å bygge et skip eller en plattform trenger vi en lang rekke materialer med svært forskjellige egenskaper. Her skal vi lære om de forskjellige typer av materialer, hvilke egenskaper de har og hvordan vi måler disse egenskapene. Skal materialene bli til noe nyttig, må de også formes, og de må sammenføyes til konstruksjoner. Videre må vi være i stand til å beregne hva materialene skal tåle, slik at konstruksjonen ikke tar skade. Det gjelder ikke bare belastninger, men også miljøet, som kan gi skade gjennom korrosjon.

Hva er et materiale?

Noen spørsmål er så enkle at de blir vanskelige av den grunn. Dette kan være et slikt spørsmål.

For inuitter som lever på tradisjonelt vis, vil snø være et materiale fordi det brukes til å lage iglo. I håndarbeid på skolen er tre et materiale, da det brukes til å lage spekefjøler og fuglekasser. Det samme med ull, som blir til garn som igjen kan bli til et skjerf. En bil lages av en lang rekke materialer. Karosseriet og det meste av motordelene lages av forskjellige typer stål, hjulfelgene av stål eller aluminium, dekkene av gummi med innlegg av fibermaterialer og stål, interiøret av forskjellige typer tekstil, plast og så videre.

Et enkelt svar på spørsmålet er at *materialer brukes for å lage et produkt*. Men produkter kan være så mangt, og vi skiller mellom *funksjonelle materialer* og *konstruksjonsmaterialer*. Transistorer, som er viktige deler av elektronikk og datautstyr, er laget av halvledere. Her utnyttes de elektroniske egenskapene, altså *funksjonen* til materialet.

Materialteknologi

I en sykkel utnytter vi *styrken* og *formen* til materialene i en *konstruksjon*. Ofte brukes materialer i begge betydningene. I en kobberkjel utnytter vi materialets konstruksjonsegenskaper (styrke og form). Men vi bruker også kobberets gode varmeledningsevne, som er en funksjonell egenskap.

Gjennom historien har utviklingen av materialene preget vår sivilisasjon så sterkt at det har gitt navn til de forskjellige epokene[1)]: steinalderen (til 1800), kobberalderen[2)] (3500—1700), bronsealderen (1800—700) og jernalderen (800—1050 e.Kr.). Som vi skal se senere, betegner dette en uvikling mot stadig sterkere materialer, med flere bruksområder. *Material-teknologi*[3)] har altså satt et sterkt preg på utviklingen av vår sivilisasjon.

I dette kapitlet skal vi beskrive *konstruksjonsmaterialer,* med noen eksempler på materialer for marine konstruksjoner. Men først tar vi en mer generell innledning om materialer.

MÅL

Her skal vi lære om følgende:

- Hva er et materiale, hvilke egenskaper er viktige for forskjellige anvendelser?
- Hvilke hovedtyper av materialer har vi, og hvilke egenskaper har de forskjellige typene?
- Hvordan måler vi styrken av et materiale?
- Hvordan måler vi holdbarheten av et materiale, og hvordan sikrer vi oss mot materialfeil i konstruksjoner som skal brukes kanskje i mange ti-år?
- Hvordan former vi materialer, og hvordan setter vi sammen forskjellige deler til en hel konstruksjon?

[1)] Tidsangivelser er f.Kr. og omtrentlige og gjelder Europa. Før sjøfarten ble utviklet til et verdensomspennende transportsystem var bruken av materialer avhengig av hva som kunne utvinnes i de enkelte regionene. På f. eks. New Zealand varte steinalderen helt til 1700-tallet. Da først kom europeiske sjøfarere og startet handel med maoriene.

[2)] Kobberalderen gjelder Middelhavslandene. Ismannen Ötzi ble funnet i 1991 i en isbre i Nord-Italia. Ötzi viste seg å ha omkommet for 5300 år siden, men kroppen var blitt frosset ned og bevart i isen. Han var utstyrt for jakt eller muligens strid, og bar med seg en øks av 99,7% rent kobber.

[3)] Teknologilæren og kunnskapen om de metoder og hjelpemidler som brukes for å omdanne råstoffer til ferdige produkter.

Undringsoppgave:
Hvilke egenskaper er viktigst for konstruksjonsmaterialene i produkteksemplene nedenfor? Nevn to eksempler på funksjonelle materialer.

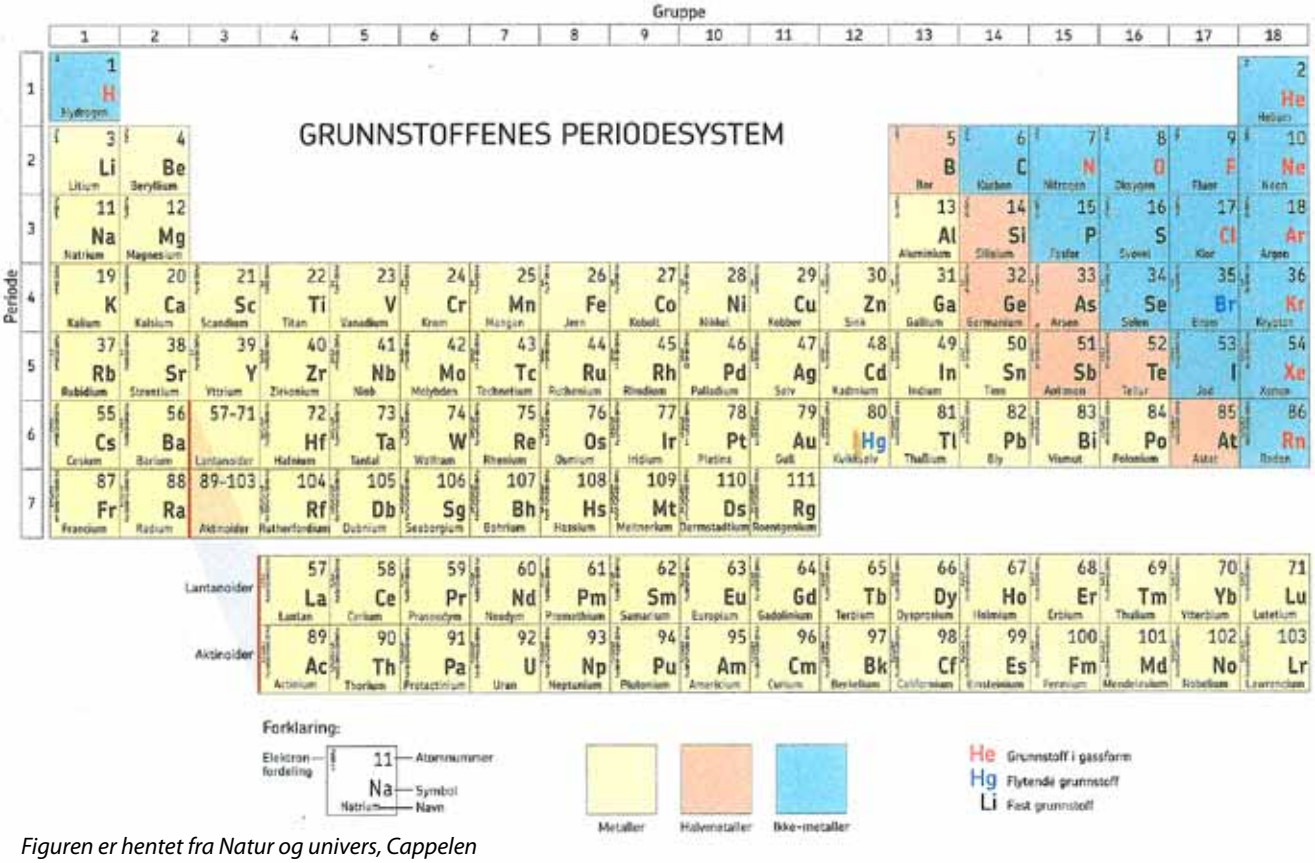
Typer av konstruksjonsmaterialer

Vi skiller mellom fire typer konstruksjonsmaterialer: *metaller, keramer, polymerer og kompositter*.

Metaller

De aller fleste grunnstoffene er metaller. [1] Et metall er elektrisk ledende, og vi kan sende strøm gjennom det. Denne egenskapen benytter vi til å lage elektriske ledninger av kobber eller aluminium. Mange metaller er gode varmeledere. Derfor lager vi kjeler og panner av kobber, aluminium eller stål. De fleste metaller er tunge (stor densitet, tetthet, massetetthet). Jern, for eksempel, har densitet 7,8 ganger større enn vann. En ren metalloverflate reflekterer lys og har derfor en karakteristisk metallglans. Det utnytter vi til å lage speil, ved å legge et tynt metallag på baksiden av en glassplate. De aller fleste metaller er i fast form ved romtemperatur. Kvikksølv er et unntak, med smeltepunkt – 39 °C.

De viktigste egenskapene for metaller som konstruksjonsmaterialer er god styrke og formbarhet. Spesielt formbarhet er en viktig egenskap når vi skal lage et produkt. Se for eksempel på en cola-boks av aluminium. Boksen er laget av én enkelt bolt av materialet der metallet er strukket til svært liten tykkelse, uten sprekker. Lokket falses på etter at boksen er fylt. Det ligger mye vitenskap bak prosessen som skaper slike bokser.



Figuren er hentet fra Natur og univers, Cappelen

[1] Det fullstendige periodiske systemet har 118 grunnstoffer (det inkluderer de kunstige grunnstoffene som lages ved kjernereaksjoner og som er ustabile). Av disse regnes 94 å være metaller, 7 er halvmetaller og 17 er ikke-metaller.

De mest brukte konstruksjonsmetallene er jern (stål) og aluminium. Men vi har mange produkter der det kan inngå metaller som kobolt, kobber, bly, titan, sink, tinn osv.

Legeringer
Rene metaller er myke og har liten styrke. Rent gull (99,999% rent) er så mykt at vi kan sette fingeravtrykk i overflaten, og er ubrukelig, selv til smykker. Konstruksjonsmaterialer som jern og aluminium i ren form er også svært myke og lite egnet som konstruksjonsmaterialer.

Hvis vi smelter et metall og blander inn et annet grunnstoff får vi en legering. En legering er også et metall. Det viser seg at med selv små mengder av innblandet materiale, kan en legering ha mye bedre styrke enn det rene metallet. Praktisk talt alle metallene vi bruker, er legeringer som er laget for at materialet skal ha best mulige egenskaper, i første rekke styrke og formbarhet. Det vi kaller "rent" gull i en gullring består av rundt 75 % gull og resten legeringsmaterialer som sølv eller kobber. Dermed får gullet den nødvendige styrken uten å miste sine gode egenskaper som glans, farge og korrosjonsbestandighet.

Stål er i en særklasse blant legeringene som det overlegent mest brukte metallet til konstruksjoner som biler, skyskrapere, hengebruer, skip, oljeplattformer og en stor mengde annet. Det aller meste av redskaper som vi bruker i dagliglivet (kniv, saks, kjøkkenbestikk, skrujern, spade, stiftemaskin osv.), er av stål.

Vi finner ikke stål i den periodiske tabellen over grunnstoffer. Hva er stål? Som nevnt ovenfor er rent jern et mykt materiale og lite egnet til å lage produkter av. Men blandet med bare små mengder (0,1 - 1,0 %) karbon (som er et ikke-metall) blir jernet mye sterkere. Dette kaller vi karbonstål.

Stål er altså en legering som hovedsakelig består av jern. Ved siden av karbon brukes et stort antall andre grunnstoffer til å lage legeringer med spesielle egenskaper og til spesielle formål. Stål har den egenskapen at gjennom varmebehandling og hurtig avkjøling blir stålet herdet, det får økt styrke og hardhet. Eggen på en god kniv må herdes for å bli hard og kvass. Det samme med fjærstål, som brukes i spiralfjærer og bilfjærer.

Jern har stor affinitet[1)] til oksygen og danner et oksid—rust. Reaksjonen går raskere når det er vann eller fukt til stede, og aller raskest når vannet inneholder ioner og leder strøm, som sjøvann. Rustent jern er lite pent, og over lang tid (mange tiår) i fuktig klima eller i sjøvann vil ubeskyttet karbonstål gradvis bli spist opp. Men med en tilsetting av minst 11 % krom (et metall) blir stålet rustfritt og bestandig mot fukt og sjøvann. Problemet er at krom er for dyrt til at vi kan bruke rustfritt stål i store konstruksjoner som skip og plattformer. Slike konstruksjoner bygges derfor av karbonstål og må beskyttes med maling eller på andre måter. Det kommer vi tilbake til i avsnittet om korrosjon.

[1)] Affinitet = reagerer lett kjemisk.

Eiffeltårnet stod ferdig i 1889 og består av 18.038 deler av smijern som er klinket sammen

Undringsoppgave:

Hvilke kjennetegn har metaller i forhold til ikke-metaller? Hva er forskjellen på jern og stål?

Aluminium er et lettmetall med bare en tredjedel av tettheten til stål. Aluminium må også legeres og i mange tilfeller varmebehandles (herdes) for å få nok styrke til å kunne brukes i konstruksjoner. Det er utviklet en lang rekke legeringer, vanlige legeringselementer er silisium, magnesium, mangan og kobber.

Aluminiumslegeringer har generelt lavere styrke enn stål. Men forholdet styrke/vekt er likevel bedre enn for stål, og aluminium er derfor et foretrukket materiale for konstruksjoner som må være lette og samtidig sterke. Fly og hurtiggående båter er i regelen laget av aluminium.

Aluminium reagerer også med oksygen til et oksid, Al_2O_3. Men i motsetning til rust, som er porøst og slipper vann og oksygen til, danner aluminiumoksid et tett overflatelag som beskytter metallet mot videre korrosjon. Derfor holder aluminium seg blankt og fint, selv i sjøvann.

Katamaraner er båter med to skrog. En katamaran går hurtigere enn en ett-skrogs båt med samme størrelse og motorkraft. Katamaraner må være lette, ellers stikker de for dypt i vannet og går saktere. Derfor bygges katamaraner av aluminiumslegeringer.

Keramer

Keramer er en gruppe materialer som er elektrisk isolerende, harde og sprø. Vi kjenner dem fra dagliglivet som glass, porselen, stentøy, murstein og sement. De fleste keramer består av to eller flere grunnstoffer som er kjemisk bundet. Et viktig unntak er diamant, som er et keram som består bare av grunnstoffet karbon (C). Mange keramer finnes naturlig, som stein (mange forskjellige mineraler), marmor ($CaCO_3$), sandstein (SiO_2) og is (H_2O).

Mange keramer kan lages av billige råstoffer. Murstein, stentøy, porselen og fliser lages av våt leire som lett kan formes, og som brennes i en prosess som ikke har forandret seg mye på 2000 år. Kvartssand som smeltes ved høy temperatur, blir til glass. Ingrediensene i sement er også lett tilgjengelige fra naturen. Fordi keramer er billige, sterke og holdbare, er de mye brukt til bygninger og andre produkter som krever store mengder materialer. Romerske bygninger av naturlig stein eller murstein har stått i 2000 år og kan fortsatt være i god stand.

Ikke alle keramer er billige. Diamant blir dannet når rent karbon utsettes for svært store trykk og høye temperaturer. Slike forhold kan vi finne på dyp 150 km eller mer under jordoverflaten. Ved bevegelser i jordskorpa over millioner av år kan lagene som inneholder diamanter bli brakt til overflaten. Diamant er det hardeste materialet vi finner i naturen og har mange industrielle anvendelser ved siden av å være ettertraktet til smykker.

Siden 1960-årene har det vokst fram en stor industri som lager avanserte keramer basert på oksider av aluminium, magnesium, zirkonium og yttrium. Disse materialene har høy styrke og hardhet og tåler høye temperaturer. De har mange anvendelser i avanserte produkter som brenselceller, membraner og lignende. Fly- og romfartsindustrien har vært ledende i å utvikle avanserte keramer til spesielle formål.

Mange av de første plattformene i Nordsjøen ble utført i betong. Blant de største og mest kjente finner vi de faste plattformene Statfjord og Troll, se side 10.13, og den flytende betongkjempen Heidrun, som vi ser her. Heidrun er en strekkstagplattform, som du kan lese mer om på side 10-14.

Undringsoppgave:

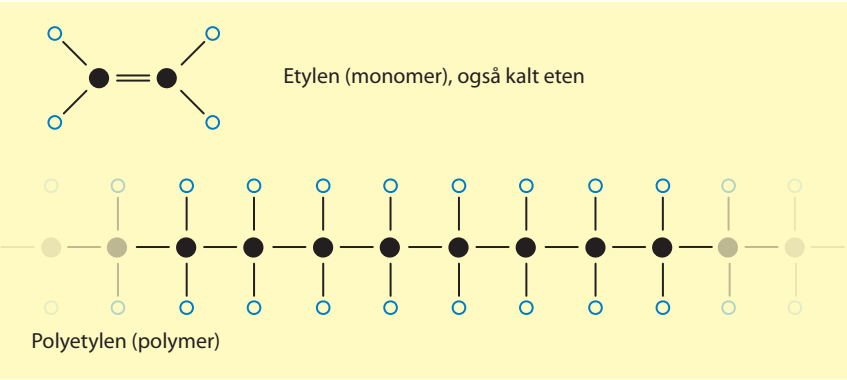
Hva er et keram?
Hva består betong av?

Polymerer

Nesten alle biologiske systemer er bygd opp av polymerer, både som konstruksjonsmaterialer (trær, bein, brusk, lær) og funksjonelle materialer som omslutter og regulerer biokjemiske reaksjoner (bladverk, blodårer, celler).

I produktsammenheng bruker vi syntetiske polymerer, i dagliglivet kalt plast. Navnet kommer av måten polymerer lages på, ved at det dannes lange kjeder av identiske molekyler. Etylen ved vanlig trykk og temperatur er en gass med molekylstruktur C_2H_4. Dette molekylet er en byggesten—en monomer - for polymerisering. I figuren er karbonatomer vist med svart sirkel, hydrogenatomer som blå sirkler. Mellom karbonatomene er det en dobbel binding. Ved en kjemisk prosess som kalles polymerisering, løses den ene bindingen, og vi får en aktivert monomer som kan danne lange kjeder, med fra noen hundre til flere millioner monomerer. I dette tilfellet får vi polyetylen, et av de vanligste plastmaterialene. Egenskapene bestemmes i stor grad av lengden på polymerkjeden på den måten at en lengre kjede gir sterkere materiale. Polyetylen kan lages med egenskaper egnet for produkter som varierer fra vanlige plastposer til skuddsikre vester.

Det finnes en lang rekke monomerer som kan polymeriseres til materialer med stort spenn av egenskaper. Vi kjenner disse som nylon, teflon, silikon, araldittt osv. Termoplaster er en viktig gruppe av polymerer som kan smeltes og støpes i former til f. eks. legobrikker og annet plastleketøy, hagemøbler, robåter osv. Karosseriet til den elektrisk drevne Think-bilen er støpt av termoplast, det samme er Pioner-jolla.



Etylen (C_2H_4) er et molekyl (monomer) som ved kjemisk reaksjon (polymerisering) kan bindes sammen til lange kjeder og blir til polyetylen, som er et plastmateriale.

Jolle av støpt plast (termoplast).

Kompositter

En kompositt er sammensatt av to eller flere typer materialer med forskjellige egenskaper. Eksempler fra dagliglivet er glassfiberarmert plast som brukes i fritidsbåter, fiskestenger, tennis-racketer, ski, dusj-kabinetter, seilfly og mye annet. Fiberarmert plast består som navnet sier, av fibre med stor stivhet og styrke (glass, karbon, aramid) og som er støpt inne i et plastmateriale som er mykt og har lav styrke. Plasten har som funksjon å holde fibrene på plass slik at stivheten og styrken blir utnyttet best mulig. Egenskapene for kompositt-materialet blir mye bedre enn egenskapene for de to materialene hver for seg.

Glassfiberarmert plast lages ved at vevde matter av glass-fiber (et stivt og sterkt materiale som tåler stor strekkbelastning) støpes inn i plast.

Betong (et keram) er sterk når den belastes i trykk. Men i strekk vil betongen sprekke opp ved små belastninger, noe som er typisk for keramer. Derfor armeres betongen med stålstenger som tar strekk-belastningen. Armert betong er en fiberkompositt som brukes i stor skala i bruer, bygninger, demninger, oljeplattformer o.l.

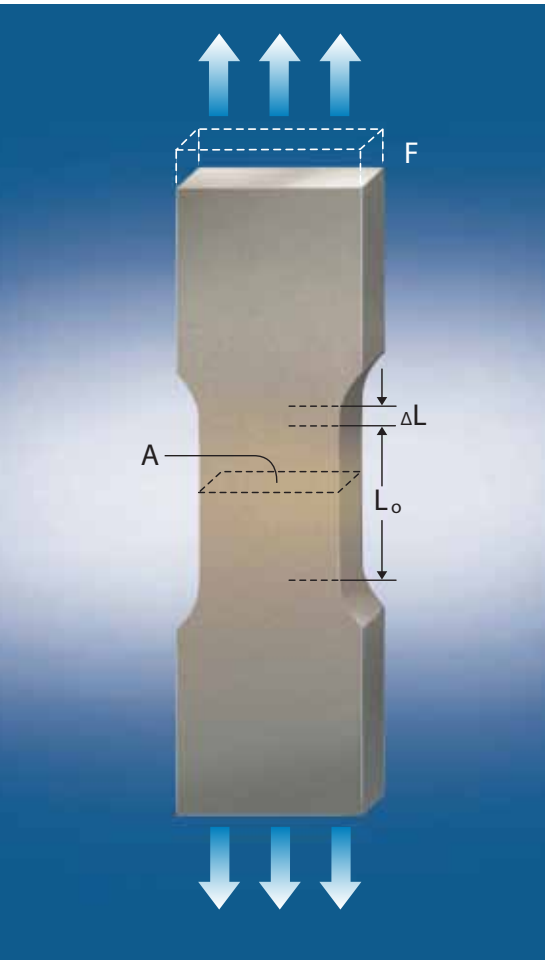
Tre er også en fiberkompositt. Det gir god styrke i fiberretningen, men tilsvarende dårlig styrke i tverretning. Det kan du prøve ut selv med en firkant som er saget ut fra en tynn fjøl. Hvis du bøyer i lengderetningen vil du føle en mye større styrke enn om du bøyer i tverretningen. Ved å lime sammen tynne flak av tre med motsatt fiberretning får vi kryss-finer, som har samme styrke i begge retningene. Her lager vi faktisk en kompositt av et fibermateriale.

America´s Cup-seilasen foregår med båter som er laget av avanserte plastkompositter.

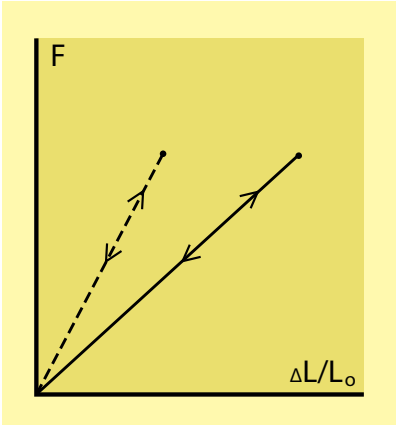
Undringsoppgave:

Hva er en fiberkompositt?
Nevn tre typer fiberkompositter.

Metaller



Strekkprøving av et metall.



Grafisk framstilling av Hookes lov for to staver med forskjellig dimensjon (A). *Det er proporsjonalitet mellom forlengelse og belastning av prøvestaven. Da er materialet elastisk.*

Vi skal nå se litt nærmere på metaller og de egenskaper som er viktige for et konstruksjonsmateriale. Naturlig nok vil vi fokusere på stål, men aluminium er også et viktig materiale for den marine industrien.

Styrkeegenskaper

En konstruksjon må tåle belastninger uten å svikte. En sykkel må kunne tåle tyngden av syklisten pluss de ekstra belastningene som kommer på grunn av ujevnheter i veien og lignende. Vi ønsker å sikre oss mot at sykkelramma eller et hjul bryter sammen i en hump.

På tilsvarende måte må et skip eller en plattform tåle de belastningene vi forventer vil komme gjennom bruken. I første rekke er det egentyngden og tyngden av last. Videre vil det være kraner og annet bevegelig som belaster fundamentene på dekket. Men den største belastningen kommer fra bølgene, som i Nordsjøen kan bli nærmere 30 meter høye (tilsvarende et tietasjes hus!). En flytende oljeplattform må tåle de samme belastningene og i tillegg kreftene fra havstrømmer, som virker spesielt på ankersystemet. Plattformer som står fast på havbunnen, må dimensjoneres slik at de kan stå imot jordskjelv, også på norsk sokkel. Til slutt har vi ulykkeslaster som kan skyldes grunnstøting, kollisjon, eksplosjon og brann, og som det også må dimensjoneres mot.

I kapitlet om konstruksjoners styrke lærer du om hvordan en kan beregne krefter og spenninger i en konstruksjon som blir utsatt for ytre belastning. Hovedkravet er at materialet i konstruksjonen skal tåle disse belastningene, uten å bli deformert eller skadet på annen måte.

For å måle styrken av et materiale utfører vi strekkprøving. Vi lager en prøvestav av materialet og belaster staven i en strekkmaskin. Vi måler kraften F og forlengelsen ΔL. Da ser vi at i den første delen av forløpet er kurven lineær, det vil si at forlengelsen er proporsjonal med kraften. Det kaller vi Hookes lov[1]. I dette området er materialet elastisk. Hvis vi reduserer belastningen til null igjen, vil prøvestaven gå tilbake til sin opprinnelige lengde. Det er en viktig egenskap: Belastninger i det elastiske området fører altså ikke til skade, verken på materialet eller konstruksjonen.

Hvis vi utfører det samme eksperimentet med samme materiale, men med en strekkstav som er dobbelt så tykk, vil vi få en kurve (stiplet) som er brattere. Det vi måler er følgelig ikke en materialegenskap, men noe som også avhenger av prøvestavens dimensjoner.

[1] Robert Hooke, engelsk vitenskapsmann (1635-1703).

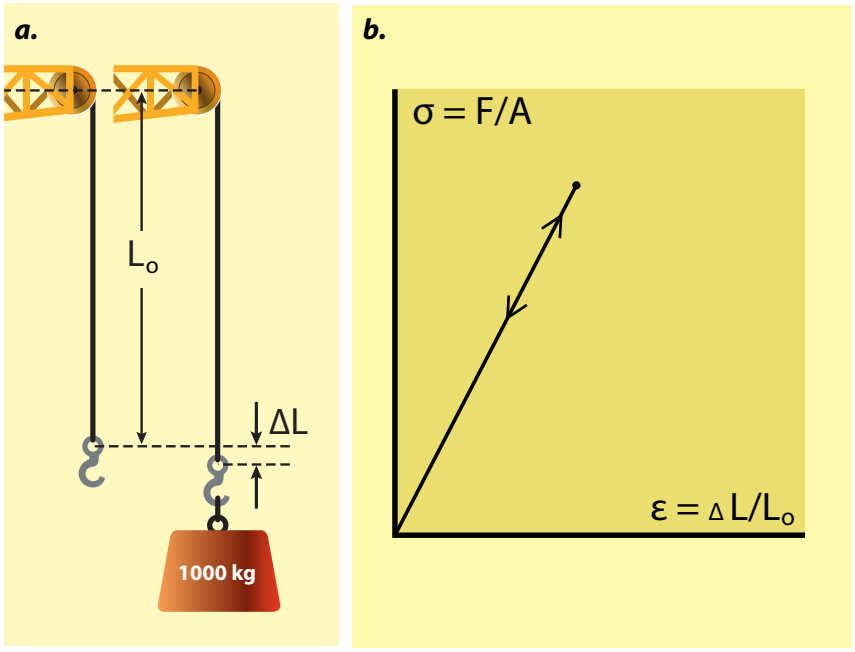
Hvis vi regner om måleresultatene i spenning og tøying, får vi et annet diagram. Spenningen i materialet er kraft/tverrsnittsareal:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Tøyingen i materialet (den relative forlengelsen) er:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o}$$

I et spennings-tøyingsdiagram får vi følgende kurve:



a. = Belastning gir forlengelse
b.= Spennings-tøyingsdiagram i elastisk område

For et gitt materiale vil dette diagrammet være det samme uansett tverrsnittet på prøvestaven. Men to forskjellige materialer (f. eks. stål og aluminium) vil gi to forskjellige kurver. Det vi måler, er materialegenskaper som vil være de samme uansett hvilken konstruksjon vi bygger. Sammenhengen mellom spenning og tøying kan uttrykkes som:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

der E er elastisitetsmodulen (E-modulen eller Youngs[1] modul).

Denne ligningen (Hookes lov) danner grunnlaget for elastisitetsteorien som beskriver materialoppførsel under elastiske forhold og som igjen er grunnlaget for svært mye av konstruksjonslæren, altså hvordan konstruksjoner oppfører seg når de blir utsatt for belastning.

Kraft måles i Newton[2] (N), forlengelse i meter (m). Av dette ser vi at spenning måles i N/m^2 = Pascal[3] (Pa). Tøying ser vi er ubenevnt, altså blir benevningen på E-modulen den samme som for spenning (Pa). E-modulen varierer svært mye fra materiale til materiale. Noen verdier er vist i tabellen på neste side.

[1] Thomas Young, britisk vitenskapsmann (1773-1829)
[2] Isaac Newton, britisk vitenskapsmann, grunnlegger av mekanikken (1643-1727)
[3] Blaise Pascal, fransk vitenskapsmann (1623-1662)

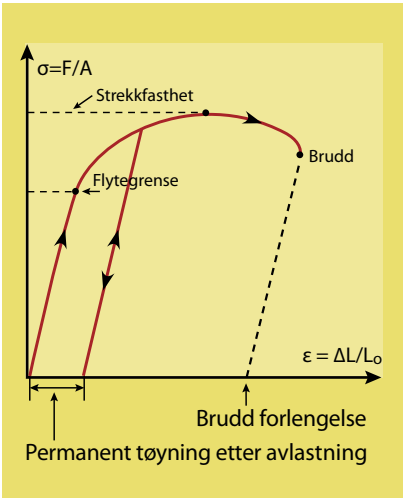
Undringsoppgave:

Ei kran på et offshore konstruksjonsfartøy skal løfte en gjenstand som har en masse på 1000 kg i en stålkabel som har et tverrsnitt på 300 mm^2. Stålkabelen er 20 m lang fra krana til dekket. Hvor mye vil kabelen forlenges når lasten kommer på? E-modulen for kabelen er 200 GPa.

Tabell 1. Materialegenskaper for noen materialer

Materiale	Densitet (Mg/m^3)	E-modul (GPa)[1]	Flytegrense (MPa)[1]	Strekkfasthet (MPa)[1]	Bruddtøyning
Diamant	3.15 - 3.53	1000	50 000	-	0
Jern	7.9	196	50	200	0.3
Karbonstål	7.8 - 7.85	196 - 207	260 - 1300	500 - 1880	0.2 - 0.3
Legerte stål	7.8 - 7.85	196 - 207	500 - 1980	680 - 2400	0.02 - 0.3
Aluminium	2.7	69	40	200	0.5
Aluminiumlegeringer	2.6 - 2.9	69 - 79	100 - 627	300 - 700	0.05 - 0.3
Titanlegeringer	4.3 - 5.1	80 - 130	180 - 1320	300 - 1400	0.06 - 0.3
Betong	2.4 - 2.5	30 - 50	20 - 30[2]	-	0
Betong, stålarmert	2.7 - 2.8	30 - 50	-	410	0.02
Nylon	1.1 - 1.2	2 - 4	49 - 87	100	-
Polyetylen, høy tetthet	0.94 - 0.97	0.7	20 - 30	37	-
Gummi	0.83 - 0.91	0.01 - 0.1	-	30	0.5

[1] Pascal er en svært liten enhet for å måle mekanisk spenning og E-modul. Vi bruker derfor enhetene MPa (MegaPascal = 1 000 000 Pa) for spenning og GPa (GigaPascal = 1 000 000 000 Pa) for E-modul.
[2] Målt i trykk. Betong uten stålarmering har svært liten styrke i strekk.



Spennings-tøyningsdiagram inntil brudd.
To viktige begreper: Flytegrense og strekkfasthet

Hvis vi belaster videre, vil prøvestaven fra et punkt forlenge seg ulineært, det vil si at kurven flater ut og det ikke lenger er proporsjonalitet mellom belastning og tøying. Hvis vi da avlaster igjen, ser vi at staven har fått en permanent forlengelse, den er deformert. Hvis denne staven hadde vært en del av en konstruksjon, ville vi ha sagt at konstruksjonen har fått en skade (tenk på en sykkelramme der en del av ramma er blitt bøyd på grunn av overbelastning). Når et materiale strekkes slik at det blir permanent forlenget, sier vi at materialet *flyter*, og punktet på kurven der det skjer, *er flytegrensen* for materialet. Flytegrensen er en viktig størrelse, for hvis vi sikrer oss at spenningene i en konstruksjon alltid er under den, vil konstruksjonen tåle belastningene uten å få skade. Flytegrense for noen materialer er vist i tabellen.

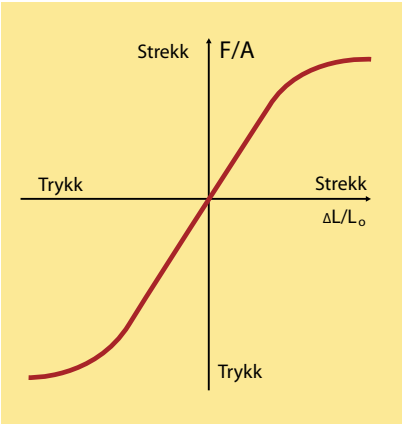
Fortsetter vi å belaste videre fra flytegrensen, ser vi at materialet faktisk blir sterkere, altså at det tåler stadig større spenninger. Det skyldes fastning av materialet. Men samtidig blir deformasjonen (skaden) større og større. Fastning er en viktig egenskap. Hvis vi skulle få en overbelastning som konstruksjonen ikke er beregnet for, sørger fastningen for at skaden ikke blir katastrofal (forutsatt at overbelastningen ikke er altfor stor). Vi vil heller ha en konstruksjon med begrenset skade framfor en konstruksjon som bryter helt sammen.

På et punkt begynner lasten å gå ned igjen, med økende forlengelse. Det betegner *strekkfastheten* for materialet. Får vi spenninger utover den, vil vi få brudd i materialet og kanskje en meget alvorlig skade, for eksempel at et skip brekker i to, eller at en plattform bryter sammen.

Trykk- og strekkbelastning

Hittil har vi sett på materialer med strekkbelastning. Men i en konstruksjon vil materialet også bli belastet i trykk. Se for eksempel på en bjelke som bøyes eller et skip i hogging eller sagging (se side 6.14). Metalliske materialer har (stort sett) de samme egenskapene i trykk som i strekk. Spennings- /tøyingskurven for et metall er derfor symmetrisk omkring origo med de samme verdiene for flytegrense og strekk- (trykk-) fasthet.

Keramer og kompositter har i regelen svært forskjellige egenskaper på trykk- og strekksiden. Keramer er sprø materialer og vil lett sprekke når de belastes i strekk. I en gammeldags steinbru blir alle kreftene fra brudekket tatt opp som trykkspenninger i fundamentet. I en gotisk kirke som Nidarosdomen vil du se at tyngden av taket er fordelt gjennom elegante buekonstruksjoner til bærende søyler, gjennom trykkspenninger. I betongbygg med strekkbelastninger må en benytte innstøpt armering av stålstenger som tar strekket.



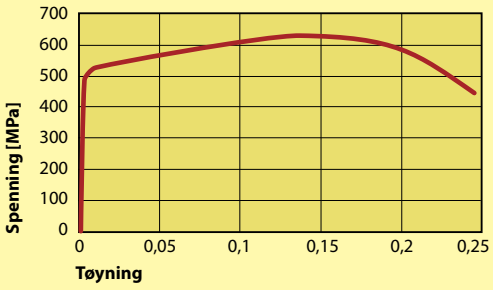
Spennings-/tøyningsdiagram for strekk og trykk i et metall

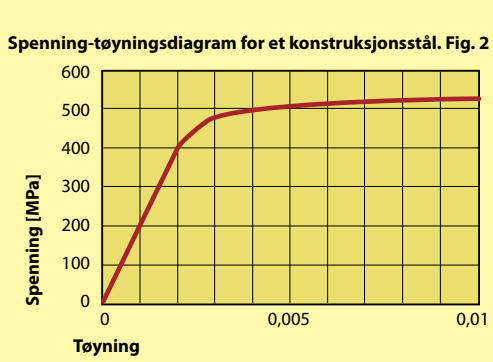
Formbarhet

En konstruksjon handler ikke bare om styrke, men også om form—vi må kunne forme materialene. Det skjer på svært mange forskjellige måter. Konstruksjonsmaterialer som stål og aluminium blir støpt ut i store blokker som så valses ut til plater, stenger og profiler. Det betyr at materialene må kunne bearbeides og formes uten at materialet sprekker eller at styrken blir forringet. Denne egenskapen ved materialer kaller vi formbarhet eller duktilitet.

Et enkelt eksempel på duktilitet kan du studere ved å bøye en ståltråd. Hvis det er godt utglødd materiale, vil du kunne bøye tråden til omtrent den formen du ønsker – du kan nærmest slå knute på tråden. Forsøker du det samme med tråd av fjærstål, vil du se at tråden lett brekker. Duktilitet er ikke en materialegenskap som kan måles med ett enkelt tall. Vi må måle duktiliteten opp mot den formingsprosessen som vi ønsker å bruke, enten det er valsing, trekking, bøying eller annet.

Som et enkelt og standardisert mål bruker vi gjerne forlengelsen av en strekkstav ved brudd (bruddforlengelse), se diagrammet på forrige side. I tabell 1 er det vist noen tall. Hvis du ser nærmere på duktiliteten for stål- og aluminiumslegeringer, vil du finne en klar tendens til at mer høyfaste materialer vil ha lavere duktilitet. Det forklarer hvorfor det er vanskeligere å forme en tråd av fjærstål enn en utglødd ståltråd. Forming skjer som regel ved høye temperaturer, for da er metallene myke og har mindre styrke (lavere flytegrense) og er lettere formbare.





Figurer til undringsoppgave

Undringsoppgave:

I figuren øverst ser du spennings-/tøyningskurven for et konstruksjonsstål, etter en strekkprøve. I den nederste figuren ser du første delen av forløpet med forstørret x-akse. Finn følgende: E-modulen, flytegrensen, strekkfastheten og bruddtøyingen.

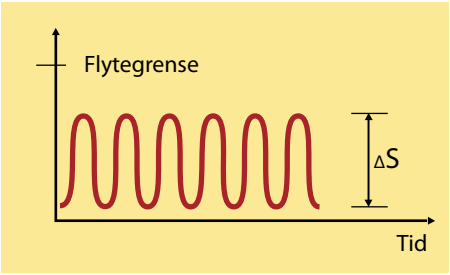
Nedbrytingsmekanismer

Hittil har vi bare sett på styrkeegenskaper i forhold til én enkelt belastning, for eksempel en stor bølge mot et skip. Men det finnes mekanismer som svekker materialer over tid, og som også må vurderes når vi dimensjonerer.

Utmatting

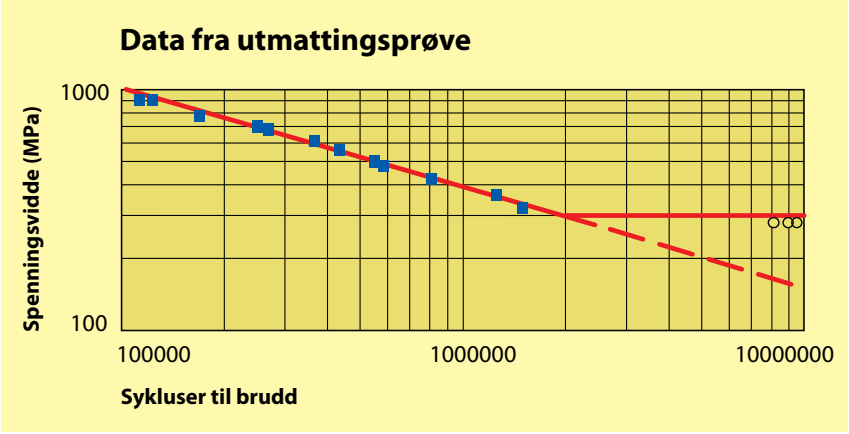
Hittil har vi antatt at belastninger som gir spenninger under flytegrensen, ikke fører til skade på en konstruksjon. Det er ikke helt riktig. Mange konstruksjoner blir belastet dynamisk, det vil si gjentatte belastninger. Et skip eller en plattform vil i løpet av en funksjonstid på 20 - 50 år bli belastet med rundt 100 millioner bølger. Hver bølge vil gi en spenningssyklus i materialet. Selv om spenningen hele tiden er under flytegrensen vil det skje mikroskopiske endringer i materialet som over tid kan utvikle seg til sprekker. Det kaller vi utmatting, og det er en av hovedårsakene til at konstruksjoner som blir belastet dynamisk, har begrenset levetid. Flyskrog, spesielt vingene, blir på samme måte belastet dynamisk når de tar av og lander, og når de utsettes for turbulens i lufta. Roterende maskineri (hjul, akslinger, turbinblad osv.) får også dynamisk belastning fra vibrasjoner.

Hvis vi tar en prøvestav og utsetter den for dynamisk belastning, vil vi kunne se at det dannes mikroskopiske sprekker som etter hvert vokser gjennom tverrsnittet og fører til brudd.



Dynamisk belastning, f.eks. fra bølger.

Prøver vi flere staver med forskjellig spenningsvidde (ΔS) og plotter antall sykluser til brudd (N) mot spenningsvidden, får vi et diagram som vist under.



Data fra utmattingsforsøk. De åpne punktene viser prøvestaver som ikke gikk til brudd.

Her er spennet i levetid så stort at det er praktisk å plotte på logaritmisk skala. Stor spenningsvidde fører til kort levetid, mens liten spenningsvidde fører til lang levetid[1)]. Som vi ser faller datapunktene langs en rett linje. Formelen for denne linjen er

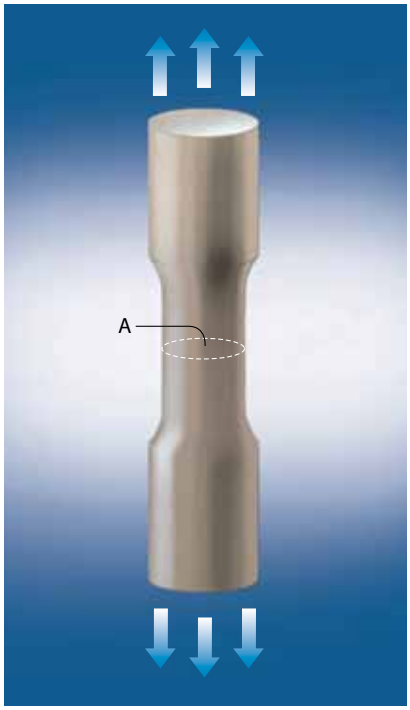
$$N(\Delta S)^m = C$$

der m og C er konstanter. *ΔS framgår av figur på forrige side*

For belastninger under en viss spenningsvidde ser vi at datapunktene ikke lenger faller langs den rette linjen, vi får ikke lenger brudd i prøvestavene, selv om vi lar prøvene gå svært lenge. Denne spenningsvidden kaller vi utmattingsgrensen (ΔS_l), og i diagrammet markeres denne med en horisontal strek. Hvis alle spenningssyklusene er under utmattingsgrensen vil vi ha "uendelig" levetid for vår konstruksjon. For stål gjelder det bare hvis konstruksjonen er i et ikke-korrosivt miljø. Det vil si tørr luft. For marine konstruksjoner i sjøvann kan vi derfor ikke stole på utmattingsgrensen, men må bruke en ekstrapolert kurve som vist i diagrammet. Det betyr i praksis at marine konstruksjoner vil ha en levetid som er begrenset av utmatting.

Kurven kaller vi SN-kurven for prøvestaven (S - spenningsvidde, N - sykluser til brudd) og er grunnlaget for å dimensjonere mot utmatting. SN-kurven er ikke bare en materialegenskap, men avhenger sterkt av andre faktorer som korrosivt miljø, overflatebehandling, eventuell sveising, geometri og andre faktorer.

[1)] Vi bruker betegnelsen "levetid" selv om enheten er lastsykluser til brudd. Den egentlige levetiden (i måneder eller år) finner vi ved å multiplisere med perioden for lastsyklusene. For marine konstruksjoner som belastes av bølger er gjennomsnittlig periode rundt 8 sekunder. For akslingen i en flyturbin er perioden en brøkdel av et sekund.



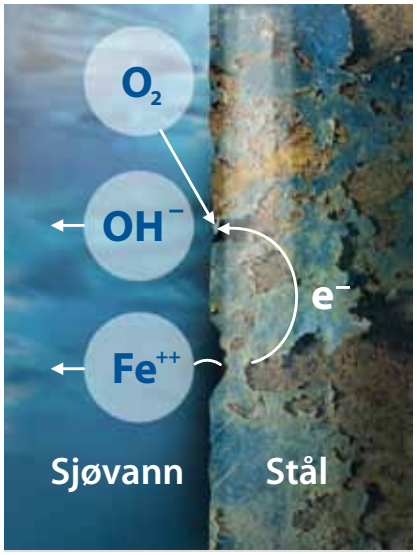
Prøvestav for utmattingsforsøk. *Strekkraft veksler mellom maksimal verdi og null*

Undringsoppgaver:

a. Finn verdien av C og m for SN-kurven i diagrammet.

b. Vis at formelen for SN-kurven (se bort fra uttmattingsgrensen) gir en rett linje på log-log-skala.

c. Et skip blir bygget for en driftstid på 30 år. Hvor mange bølgeslag vil skipet bli utsatt for i løpet av driftstiden?



Korrosjon av jern – jernet løses opp i sjøvannet som jern-ioner mens de frigjorte elektronene forbrukes i en katodisk reaksjon på overflaten.

Korrosjon

Som beskrevet tidligere, må stålkonstruksjoner beskyttes mot korrosjon, ellers vil de over tid få korrosjonsskade, det vil si at metallet blir spist opp av rust. Skip og plattformer, som er omgitt av salt sjøvann og atmosfære med mye salt, er spesielt utsatt. Uten god beskyttelse vil slike konstruksjoner av stål ha en levetid på bare noen få år. Mye av vedlikeholdskostnadene for skip og plattformer er knyttet til kampen mot rust.

Maling gir god beskyttelse. Men maling slites og må vedlikeholdes. Et vanlig syn på et skip er mannskap i arbeid med rustskrape og malerpensel.

Korrosjon er en elektrokjemisk prosess, det vil si en kjemisk reaksjon med utveksling av elektrisk ladning (elektroner og ioner). Vi skiller mellom en anodisk og en katodisk reaksjon. I enkleste form er korrosjon av stål en anodisk reaksjon der jern-atomet mister to elektroner og blir til et positivt ladet jern-ion som løses i vannet. Elektronene vandrer ut i det elektrisk ledende stålet.

$$Fe \longrightarrow Fe^{++} + 2e^-$$

Den anodiske reaksjonen må balanseres med en katodisk reaksjon der de frigitte elektronene blir bundet, ellers får vi en opphopning av elektrisk ladning i metallet, og reaksjonen vil stoppe av seg selv. For stål i sjøvann er flere reaksjoner mulig avhengig av hvor mye oksygen som er oppløst i vannet, om miljøet er surt eller basisk og andre faktorer. Men hvis det er nok oksygen i vannet, og det er i regelen tilfellet i fritt sjøvann, vil denne reaksjonen dominere:

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \longrightarrow 4OH^-$$

Uten katodereaksjon blir det ingen anode og følgelig heller ingen korrosjon. Dermed er det også katodereaksjonen som bestemmer hvor fort korrosjonen skjer. Hvis vi har en stor katode i forhold til anoden, vil korrosjonen gå hurtigere. En liten katode koblet mot en stor anode kan være ufarlig. Andre faktorer som bestemmer korrosjonshastigheten, er oksygeninnholdet i vannet og temperatur.

Hvis vi legger jern (stål) i sjøvann, vil metallet gradvis bli spist opp av den anodiske reaksjonen. Stålet går faktisk i oppløsning. Dette skjer med en hastighet av noen tidels millimeter i året, avhengig av faktorer som strømningshastighet (i vannet), temperatur og oksygeninnhold. Skip, oljeplattformer og andre marine konstruksjoner skal helst kunne brukes i 20—50 år. Over så lang tid vil korrosjon kunne svekke konstruksjonene slik at de blir ubrukbare før tiden. Konstruksjonene må derfor beskyttes mot korrosjon. Skip blir i regelen malt med bestandig skipsmaling som fornyes etter behov når skipene dokksettes for vedlikehold, gjerne hvert femte år. Plattformer for utvinning av olje og gass må ligge fast på feltet så lenge det produserer. De blir derfor beskyttet gjennom en metode kalt *katodisk vern*.

Undringsoppgave:

Når jern korroderer i sjøvann, forsvinner metallet gradvis (det tæres opp). Hvor blir det av jernet?

Hvordan beskyttes stålskip mot korrosjon?

Galvanisk korrosjon - katodisk vern

Hvis vi kobler sammen to forskjellige metaller i en elektrolytt (en elektrisk ledende væske, for eksempel sjøvann), vil det oppstå en elektrisk spenning mellom materialene, på noen tidels volt[1]. Det ene metallet får en positiv ladning i forhold til det andre. Ved å måle denne spenningen kan vi rangere metaller i spenningsrekken. I figuren er det vist spenningsrekken for noen metaller i sjøvann. Under andre forhold eller i andre elektrolytter vil rekkefølgen være forskjellig.

Hvis to forskjellige metaller kobles sammen i en slik elektrolyttisk celle, vil det gå en elektrisk strøm mellom dem. Elektronene vil gå fra det mest aktive metallet til det edlere metallet. Samtidig skjer det en anodisk reaksjon der det aktive metallet ioniseres og går i oppløsning i vannet slik reaksjonsligningen for anodisk oppløsning av jern viser. Dette kaller vi galvanisk korrosjon, og det kan gå svært hurtig.

På det edlere metallet blir den anodiske reaksjonen forhindret på grunn av strømmen av elektroner motsatt vei. Materialet blir på denne måten beskyttet. Dette utnyttes til korrosjonsbeskyttelse av stålkonstruksjoner som skal stå i sjøvann. Sink og aluminium er mer aktive enn stål (jern). Derfor utstyres offshorekonstruksjoner med såkalte offeranoder av sink- eller aluminiumlegeringer. Disse anodene vil med tiden (mange år) bli spist opp av den anodiske reaksjonen, de "ofres," mens stålet forblir upåvirket av sjøvannet. Hvis offeranodene er riktig dimensjonert, vil en på denne måten sikre seg at stålet ikke får korrosjonsskade i løpet av brukstiden for konstruksjonen.

Når flere metaller kombineres i en konstruksjon som skal stå i sjøvann, må en alltid ha spenningsrekken i tankene. På fritidsbåter av plast eller tre brukes gjerne beslag av aluminium og rustfritt stål, som hver for seg er sjøvannsbestandige materialer. Men hvis en bruker rustfrie stålskruer på et aluminiumsbeslag, vil beslaget korrodere bort, ofte forbausende raskt.

Korrosjonsbestandige materialer

Når stål korroderer, dannes det et porøst lag av oksid på overflaten. Dette er rust. Fordi rust er porøst, vil sjøvann og oksygen trenge gjennom slik at korrosjonsprosessen fortsetter under rustlaget. Aluminium og titan korroderer også i sjøvann, men oksidene av disse metallene danner et tett sjikt på noen mikrometers tykkelse. Oksidsjiktet er så tett at videre korrosjon vil gå svært langsomt, vi sier at materialet er blitt passivert. Stål som er tilsatt minst 11 % krom, vil på samme måte danne et tett og tynt sjikt av kromoksid og betegnes korrosjonsbestandige ("rustfrie") stål. Men disse materialene er for dyre eller har andre ugunstige egenskaper til at de kan brukes i store konstruksjoner som skip, plattformer, hengebruer og lignende. Når aluminium brukes i hurtiggående fartøy, er det først og fremst på grunn av det gunstige forholdet mellom tyngde og styrke. Korrosjonsbestandigheten kommer som en bonus.

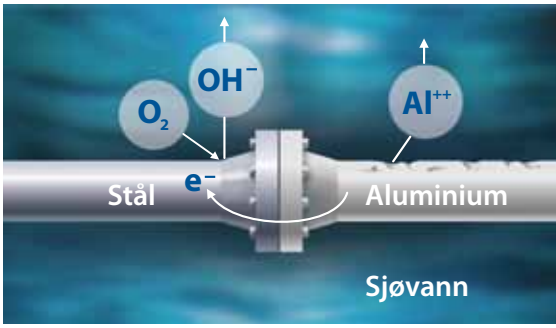
Vi undrer oss på:

Hvis du setter fast en bit aluminium på en stålkonstruksjon som står i sjøvann, vil ett av metallene korrodere, og det andre vil bli beskyttet. Hvilket metall vil bli beskyttet?

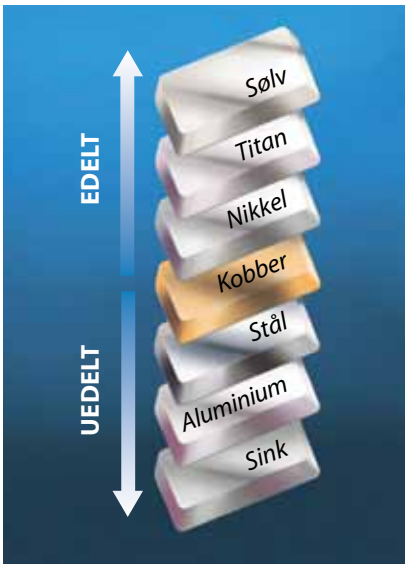
Hva om du setter en bit av titan på en stålkonstruksjon?

Ubeskyttet jern vil korrodere i sjøvann og over tid tæres bort. Hvorfor korroderer ikke aluminium på samme måte?

Hvordan lager vi korrosjonsbestandig stål?



Hvis vi kobler sammen to forskjellige metaller i sjøvann, kan det ene metallet (det mest uedle) bli tæret opp av korrosjon. Aluminium er i regelen sjøvannsbestandig, men koblet mot stål vil det korrodere, mens stålet vil bli beskyttet.



Spenningsrekken for noen metaller i sjøvann.

[1] Dette er faktisk et batteri, som vi kan trekke strøm fra! Metaller i sjøvann gir riktignok ikke så store strømmengder at de er praktisk utnyttbare. Men prinsippet (to forskjellige materialer koblet mot hverandre i en elektrolyttisk celle) er det samme som i batterier vi bruker i telefoner, datamaskiner og biler.

Forming av materialer

Ved siden av styrke og holdbarhet må konstruksjonsmaterialer også være formbare. Tenk på en bil og alle metalldelene som inngår i karosseri, motor, akslinger, hjul og så videre. Hver del er gitt en presis form, enkelte deler med en presisjon på en tusendels millimeter. Her skal vi gå gjennom noen av de vanligste formingsprosessene for metaller.

Metallutvinning

De aller fleste metallene har stor affinitet til oksygen. Bortsett fra edelmetallene (platina, gull, sølv og noen få til) finner vi derfor metallene i naturen som oksider. Jernmalm er i hovedsak Fe_2O_3 og Fe_3O_4. Aluminium utvinnes fra bauxitt som består av flere typer aluminiumoksider. Titan får vi fra rutil (TiO_2) og ilmenitt $FeTiO_3$. Det meste av kobberet utvinnes fra et mineral med sammensetning $CuFeS_2$.

Alle metaller blir laget ved en kombinasjon av smelting og til dels kompliserte kjemiske prosesser der metallet blir frigjort fra oksygenet. Samtidig blir urenheter trukket ut, og legeringsmaterialer blir tilsatt i nøye kontrollerte mengder. Et vanlig konstruksjonsstål kan ha et halvt dusin legeringselementer i mengder fra noen tidels prosent og oppover til noen få prosent. Samtidig må innholdet av urenheter som oksygen, svovel og annet begrenses til et minimum. Titan har så stor affinitet til oksygen at smeltingen må foregå i vakuum.

I tabellen er vist kjemisk sammensetning og mekaniske egenskaper for tre konstruksjonsmaterialer[1)].

- Stål NVE36 er et karbonstål med små tilsetninger av legeringselementer som gir medium styrke og god sveisbarhet. De aller fleste offshorekonstruksjoner i Norge er bygget av stål av denne typen.
- Al 5086 er mye brukt i fritidsbåter og mindre, hurtiggående fartøyer der det er viktig å ha lav tyngde.
- Ti 6Al4V er en titanlegering med tilsetninger av aluminium og vanadium, og med relativt høy styrke. Denne titanlegeringen brukes i første rekke av flyindustrien, men også av offshoreindustrien for spesielle anvendelser, blant annet i installasjoner på havbunnen med store krav til styrke.

Stål NVE36	Al 5086	Ti 6Al4Mn
C: 0.18 % maks.	Cr: 0.05 - 0.25 %	Al: 6 %
Si: 0.10 - 0.50 %	Mg: 3.5 - 4.5 %	V: 4 %
Mn: 0.90 - 1.60 %	Mn: 0.2 - 0.7%	
Flytegrense: 355 MPa	Flytegrense: 117 MPa	Flytegrense: 880 MPa
Strekkfasthet: 490 MPa	Strekkfasthet: 262 MPa	Strekkfasthet: 950 MPa
Bruddtøyning: 21 %	Bruddtøyning: 22 %	Bruddtøyning: 14 %

[1)] I tillegg til de kravene som står i tabellen, er det strenge krav til renhet, i første rekke at innholdet av oksygen, nitrogen, svovel og annen forurensing holdes lavt.

Støping

Fra smelteovnene støpes metallene ut i store emner, gjerne med vekt på flere tonn. Emnene går så videre til bearbeiding for å bli til plater, stenger, rør og andre halvfabrikata.

Støping brukes også til å lage ferdige produkter. I flere tusen år er legeringene bronse (kobber og tinn) og messing (kobber og sink) brukt som råvarer for støping, både av verktøy, våpen, smykker og kunstverk. I antikken utviklet grekerne og romerne støping av bronsefigurer til en stor kunst.

Disse bronsehestene ble støpt i Tyrkia for 3000 år siden. De står nå i Venezia.

Støpejern er en legering med mye karbon (2-4%) som i smeltet tilstand flyter svært lett. Det kan dermed fylle en støpeform med komplisert geometri uten at det blir hulrom. Formene lages ofte av sand med et bindemiddel som gjør at sanden holder formen. Hver form kan brukes bare én gang.

Ovner og peisinnsatser har tradisjonelt vært laget av støpejern, ofte dekorert med fine ornamenter.

Tradisjonelt støpejern er sprøtt og har dårlige styrkeegenskaper (lav strekkfasthet). Det skyldes karbonet som under størkning danner små flak av grafitt og som svekker materialet. Hvis en slår med hammer på en plate av støpejern (f. eks. siden på en vedovn), kan en risikere at materialet sprekker. Støpejern brukes derfor til produkter som er massive og trenger liten styrke. Typiske anvendelser for marine konstruksjoner er anker, ventiler, rørflenser og så videre.

Det er utviklet stållegeringer med samme styrke som vanlig konstruksjonsstål, og med egenskaper som egner seg til støping av produkter med store krav til styrke, for eksempel skipspropeller. Andre metaller som kan støpes, er aluminium, magnesium og titan. Avanserte produkter blir støpt i en sentrifuge, der formen slynges rundt, og sentrifugalkraften blir brukt til å sikre at hele formen blir fylt med flytende metall. Det finnes sentrifuger som kan lage utstøpninger med vekt på flere tonn.

Støping av valseblokker. Hver blokk kan veie flere tonn.

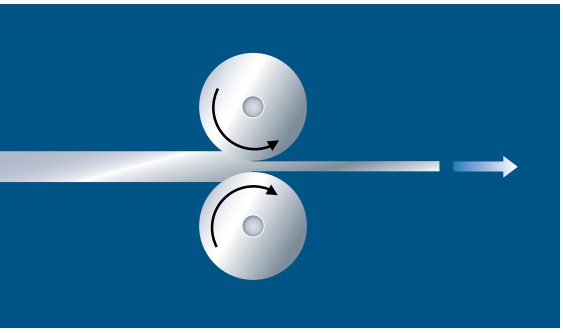
Ovner lages av plater og andre deler av støpejern, som så settes sammen. Støpeprosessen gir mulighet til å legge inn dekorative detaljer.

Propeller lages av støpestål som så maskineres med høy presisjon. Dimensjonene kan være store.

Smiing

I gamle dager var smeden en viktig person i samfunnet[1]. Han kunne smi jern til våpen og redskaper som var nødvendige for husbygging, jordbruk, jakt og forsvar. Materialemnet ble først varmet i en esse med glødende kull til det ble rødglødende og mykt. Så ble emnet hamret ut til den ønskede formen, for eksempel en øks, en kniv eller et sverd. Dette måtte skje i mange omganger med ny oppvarming imellom. Til slutt ble materialet herdet ved bråkjøling i vann og så slipt til eggen var kvass. Det var en stor kunst å kunne lage godt verktøy, og en god smed var vel ansett i samfunnet.

Smiing brukes fortsatt til å lage mange produkter, men smeden som hamrer et emne mot ambolten, er gjerne erstattet av en maskinell prosess.



Valsing av plate

Valsing

Mange konstruksjoner lages av plater eller profiler som formes og sammenføyes. Det gjelder skipsskrog, offshoreplattformer, fly, bilkarosseri osv.

I smelteverkene støpes materialene ut i blokker som kan veie flere tonn. Så går blokkene til valseverket hvor de blir varmet opp til en temperatur på flere hundre grader, slik at materialet blir mykt og lett formbart, og deretter valset ut i flere omganger til ønsket tykkelse. Hver blokk har et nøye kontrollert legeringsinnhold, og gjennom hele prosessen blir temperatur og graden av utvalsing styrt for at sluttproduktet skal få de ønskede egenskapene med hensyn til styrke og duktilitet.

[1] Johan Peter Wessel har i sitt dikt *Smeden og Bageren* gitt et humoristisk uttrykk for dette.

Ekstrusjon

Mange legeringer er så formbare at de kan *ekstruderes*. Det vil si at materialet presses gjennom en form ved stort trykk og så nærmest sprutes ut gjennom en åpning med ønsket profil, ikke ulikt måten vi dekorerer en bløtkake på med kremsprøyte. Dette skjer med materialet i fast form, altså ved temperatur godt under smeltepunktet. Gardinstenger av aluminium er laget på denne måten. I skipsindustrien brukes ekstruderte profiler til å lage lette og sterke bunnkonstruksjoner.

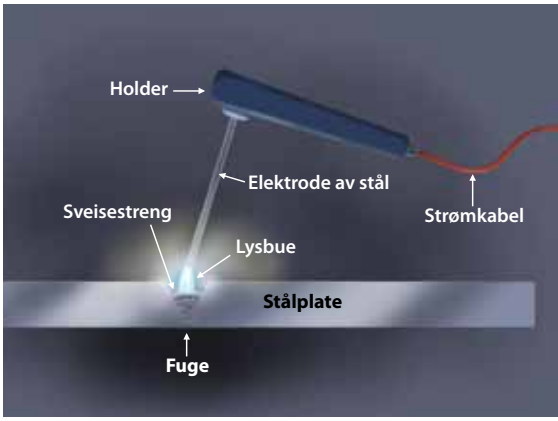
Sammenføyninger

De aller fleste konstruksjoner består av deler som *sammenføyes*. En lang rekke sammenføyningsmetoder blir benyttet: spiker, skruer, bolter, nagler, lim osv. avhenging av hva slags materialer som benyttes, og hvilke krav som stilles til sammenføyningen. Her skal vi beskrive den sammenføyningsmetoden som brukes for skip, offshoreplattformer og andre store stålkonstruksjoner, nemlig *sveising*.

Ved sveising tilføres varme som smelter materialene som skal sammenføyes. Samtidig (for de fleste sveisemetodene) tilføres det nytt smeltet materiale som fyller opp fugen. Ved avkjøling størkner materialene, og vi får en sammenføyning som i prinsippet skal være like sterk som de platene eller profilene vi startet med.

Det er utviklet en lang rekke forskjellige sveisemetoder, tilpasset de forskjellige materialene og andre forhold. De aller fleste metodene for sveising av stål bruker elektrisk lysbue som varmekilde. For plater som er mer enn noen få millimeter tykke må sveiseforbindelsen bygges opp av mange strenger, og det er en arbeidskrevende og kostbar prosess.

Det er ikke enkelt å lage gode sveiser. Det kreves godt håndlag for å kontrollere det flytende metallet, spesielt når det skal sveises i vertikale fuger eller til og med på undersiden av konstruksjoner. Det er også viktig å kontrollere mengden tilført energi (strømstyrke i lysbuen) og å kontrollere temperaturen mellom hver streng. Et spesielt problem er at det i en sveis kan det oppstå defekter i form av små sprekker eller urenheter i materialet. Det fører til at selv om en sveis har samme styrke som resten av konstruksjonen i forhold til en enkelt overbelastning, vil en sveis alltid ha dårligere utmattingsstyrke. Platene i et flyskrog (f. eks. vingene) er ikke sveist, men naglet sammen. Årsaken er at fly er utsatt for mye utmattingsbelastning, og et sveist flyskrog vil ikke ha tilstrekkelig utmattingslevetid.



Ved sveising dannes en lysbue mellom elektroden (sveisetråden) og plata. Stål smelter fra elektroden og legger seg i fugen. Fugen fylles med mange strenger, og vi får en sveiset forbindelse som er like sterk som platene.

På havbunnen i Nordsjøen ligger det et stort nettverk av rørledninger som frakter naturgass fra norsk sokkel til Tyskland, Belgia og Storbritannia. Rørene sveises sammen fra lengder på 12 m. Dette er et arbeid for spesialister.

Vi undrer oss på:

Metaller kan formes til ferdige produkter på mange måter. Beskriv tre av dem.

Beskriv hva som skjer når vi sveiser sammen to metallplater.

Dimensjonering

Som beskrevet tidligere i dette kapitlet, er de grunnleggende egenskapene for konstruksjonsmaterialer styrke og formbarhet. Men for å lage en konstruksjon må vi også dimensjonere de enkelte delene slik at de vil tåle påkjenningene som vi forventer, både de store engangsbelastningene og de mekanismene som kan føre til gradvis nedbryting (korrosjon og utmatting). Dimensjonering vil si å først styrkeberegne konstruksjonen med de metodene som er beskrevet i kapittel 6, og så beregne de platetykkelsene og andre dimensjoner som er tilstrekkelige til at spenningene i de enkelte delene av konstruksjonen er mindre enn flytegrensen for materialet. For en konstruksjon som et skip er dette et omfattende arbeid som krever et stort antall beregninger og bruk av avanserte dataprogrammer.

Havari

Historien viser at en gang i blant vil konstruksjoner bryte sammen. Skip blir brutt ned av bølgene og synker, eller de kolliderer eller grunnstøter. Fly faller ned, tog sporer av osv. Slike havarier har ofte sammensatte og kompliserte årsaker. Det kan være konstruksjonsfeil (for dårlig dimensjonering), byggefeil (dårlige sammenføyninger, sveisedefekter), materialfeil (ikke tilstrekkelig styrke), dårlig vedlikehold (korrosjon eller utmatting har fått utvikle seg) eller feil ved operasjon (feilnavigering, for stor hastighet i dårlig vær).

Plattform i Mexico-gulfen etter orkanen Lili (oktober 2002), vindstyrke 65 m/s, bølgehøyde 17 m. Her har ikke materialene hatt tilstrekkelig styrke, og plattformen i forgrunnen har totalhavarert.

Sammendrag

Materialer brukes til å lage produkter. I dette kapitlet har vi lært at materialkunnskap og teknologien for å lage produkter har preget vår sivilisasjon i mange tusen år.

Vi skiller mellom funksjonelle materialer og konstruksjonsmaterialer. For funksjonelle materialer utnytter vi egenskaper som elektrisk ledningsevne, varmeledningsevne osv. For konstruksjonsmaterialer utnytter vi i første rekke formbarhet og styrke til å lage et produkt.

Vi har fire hovedklasser av konstruksjonsmaterialer: metaller, keramer, polymerer og kompositter. De aller fleste grunnstoffene er metaller. Rene metaller har som regel for liten styrke til å kunne brukes som konstruksjonsmateriale. Men legert med selv bare små mengder av andre grunnstoffer kan egenskapene bli mye bedre, derfor er de fleste metallene vi bruker, legeringer.

Stål er det vanligste metallet vi bruker i konstruksjoner som skip, oljeplattformer og lignende. Men aluminium brukes også, spesielt til hurtiggående båter som må være lette. Stål er i hovedsak jern med små mengder karbon og andre legeringselementer. Det finnes en lang rekke forskjellige ståltyper som er utviklet for forskjellige formål.

Styrken av et materiale måler vi med strekkprøving. Flytegrensen er spenningen der materialet blir permanent deformert, mens strekkfastheten er spenningen der det begynner å slites av. Vi måler også duktiliteten, det vil si evnen materialet har til å bli formet, for eksempel til plater eller profiler som brukes i konstruksjoner. Når vi skal beregne styrken av en konstruksjon, må vi holde spenningen vi beregner (ut fra belastningene), opp mot flytegrensen for materialet.

Materialer utsettes for nedbrytningsmekanismer. Selv om belastningene for et materiale holder seg under flytegrensen, kan det med mange gjentatte belastninger oppstå utmattingssprekker som over tid vokser gjennom materialet og lager brudd. I sjøvann og andre korrosive miljøer kan metaller bli utsatt for korrosjon som med årene svekker konstruksjonen. Skip, plattformer og andre konstruksjoner som utsettes for sjøvann og bølger, er utsatt for disse nedbrytningsmekanismene.

Oppgaver

Oppgave 4.1
a) Hvordan vil du beskrive et funksjonelt materiale?
b) Nevn noen eksempler på funksjonelle materialer og hva de brukes til

Oppgave 4.2
a) Hvilke er de viktigste typer metaller som brukes i skrog for skip og flytende plattformer? Beskriv de viktigste egenskapene for metallene.
b) Hvilke andre tre hovedtyper konstruksjonsmaterialer har vi? Beskriv de viktigste egenskapene for disse.

Oppgave 4.3
a) Hva er en legering?
b) Hva er stål?

Oppgave 4.4
Hva er de hydrodynamiske årsakene til at hurtiggående båter oftest er laget av aluminium?

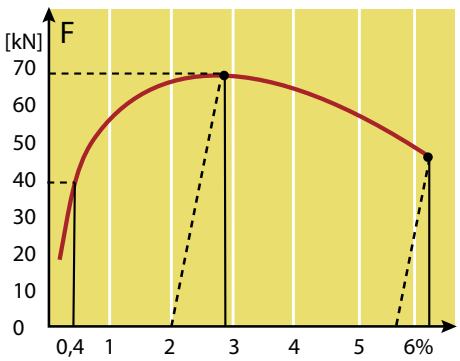
Oppgave 4.5
a) Lag en skisse som viser hvordan vi utfører en strekkprøve med et materiale.
b) Tegn skjematisk spennings-/tøyningskurven for et metall, og vis hva vi mener med flytegrense og strekkfasthet.
c) Hva skjer med materialet hvis vi belaster over flytegrensen?

Oppgave 4.6
Beskriv kort hva som skjer når et stål korroderer i sjøvann.

Oppgave 4.7
Lag en Power Point-presentasjon som beskriver hva som skjer ved sveising av stål.

Oppgave 4.8
Det vises til "undringsoppgave" om forlengelse av en stålkabel på side 4-11. Hvis du ikke besvarte denne oppgaven da du leste denne siden, må du gjøre det nå. Finn først tøyingen i kabelen.

Oppgave 4.9
Et stål har et strekkdiagram som vist i margen. Det er fastlagt ved hjelp av en prøvestav med lengde 200 mm og en diameter på 8 mm. Bestem:
a) Flytegrensen (bruk linjal til å finne ut hvor kurven begynner å krumme).
b) Forlengelsen i mm ved flytegrensen
c) Strekkfastheten
d) Forlengelsen når staven er belastet til strekkfastheten er nådd.
e) Bruddforlengelsen i mm i ubelastet tilstand. Denne bestemmes ved hjelp av den stiplete skrålinjen på figuren. Hvorfor brukes ikke den vertikale linjen?
f) E-modul uttrykt i N/mm^2 og GPa



Oppgave 4.10
Det vises til "undringsoppgaven" om strekkbelastning på side 4-13. Hvis du ikke løste denne oppgaven da du "passerte" denne siden, må du gjøre det nå.

Oppgave 4.11
De wirene som brukes for å montere undervannsinstallasjoner på store havdyp, kan ha en stor egentyngde som kommer i tillegg til den last som skal håndteres. Vi tenker oss en havbunnskonstruksjon med tyngde 20 kN som skal senkes ned til en dybde på 2400 meter. Oppdriften av konstruksjonen er da trukket fra. Konstruksjonen henger i fire wirer som hver har en diameter på 50 mm og en lengde over havflaten på 60 meter. Wirene er av stål med massetetthet 7,85 kg/dm^3, E-modul på 207 GPa og en flytegrense på 800 MPa.
Bestem:
a) Tyngden av en wire
b) Oppdrift av en wire. Massetetthet for sjøvann er 1,025 kg/dm^3
c) Strekkraft som påvirker wirene øverst når det tas hensyn til oppdrift og last. Bestem også midlere strekkraft over hele lengden.
d) Strekkspenning øverst i wirene, uttrykt i MPa og N/mm^2. Hvor stort er forholdet mellom flytegrensen og strekkspenningen? Dette forholdet kaller vi gjerne sikkerhetsfaktor.
e) Tøying og forlengelse av wirene.

Oppgave 4.12
a) Hva er utmatting?
b) Hvordan måler vi utmattingslevetid for et materiale?

Oppgave 4.13
Det vises til "undringsoppgaver" om utmatting på side 4-15. Hvis du ikke har løst disse oppgavene tidligere, bør du gjøre det nå.

Oppgave 4.14
Du har en såkalt M10-skrue som har en såkalt materialklasse 5.6. Dette er preget inn på skruehodet og betyr at strekkfastheten er 500 MPa og at flytegrensen er 60 % av strekkfastheten. Finn den største strekkraften som skruen kan belastes med. Sikkerhetsfaktoren settes til 1,8.

Oppgave 4.15
En konstruksjon er utsatt for en dynamisk belastning med midlere spenningsvidde 400 MPa og en periode på 10 sekunder. Ut fra diagrammet på side 4-15, hva blir forventet levetid for konstruksjonen?

Oppgave 4.16
Et 5,0 m langt rør av aluminium har en 40 mm utvendig og en 30 mm innvendig diameter. Det er laget av en aluminiumslegering med flytegrense 200 MPa og en E-modul på 72 GPa. Røret utsettes for en strekkraft på 66 kN. Finn:
a) Strekkspenning
b) Forlengelse i mm og tøying i promille
c) Sikkerhetsfaktor i forhold til flyting

www.stenbergformgiver.no

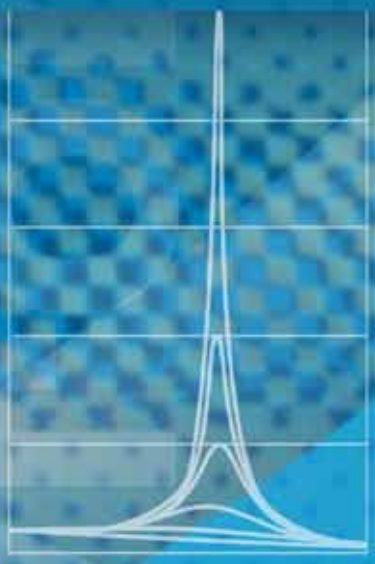
Referanser

4.1 Stig Berge: Fatigue and Fracture Design of Marine Structures. Fracture Design of Welded Structures. Kompendium UK-2006-93 ved Institutt for Marin teknikk, NTNU. Trondheim. 2006.

Forfatter: Carl Martin Larsen

Krefter og bevegelser for marine konstruksjoner

Havromsteknologi



Innhold

Repetisjon fra fysikken....2
Frie svingninger uten demping....4
Deformasjon og fjærstivhet. Statisk system....4
Dynamisk system....5
Periodisk svingning. Svingeligningen....6
Eksempler....7
Frie svingninger med demping....8
Depingskraft....8
Svingeligning med dempingsledd....8
Eksempel....9
Tvungne svingninger....10
Indre og ytre krefter. Dynamisk likevektsligning....10
Dynamisk lastfaktor....11
Eksempel....12
Variasjon av last og forskyvning. Tidsforsinkelse....12
Eksempel....13
Dynamiske laster og lastvirkning....14
Havbølger....14
Vind....15
Strøm....15
Andre dynamiske lasttyper....14
Dynamisk respons....17
Dynamisk respons for faste plattformer....17
Bevegelse av flytende konstruksjoner....17
Dynamisk respons for strekkstagplattformer....18
Dynamisk respons for slanke marine konstruksjoner....18
Oppgaver....20
Referanser....22

NTNU
Institutt for marin teknikk

5

Skip og andre marine konstruksjoner utsettes for krefter fra strøm, bølger og vind. Konstruksjonene må derfor utformes på en slik måte at de kan motstå disse kreftene.

Kunnskap om krefter og kreftenes virkning på konstruksjoner er derfor en viktig forutsetning for å kunne operere trygt under vekslende forhold på havet.

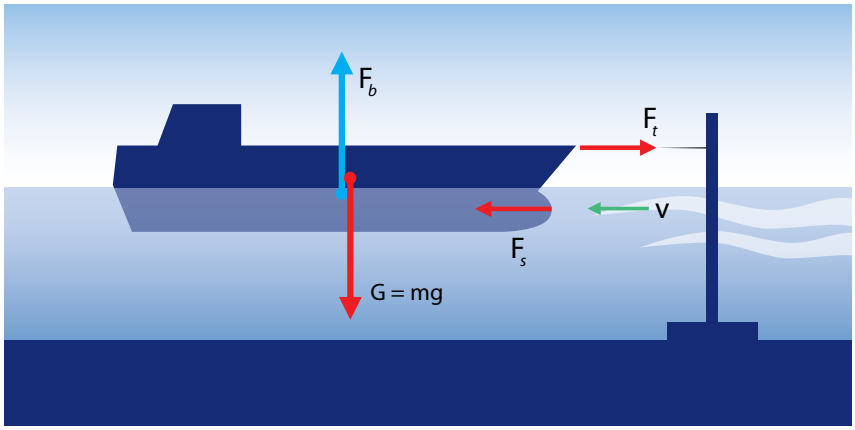
I dette kapitlet skal vi se spesielt på hvordan vi kan beregne virkning av krefter som varierer med tiden. Dette fagområdet kaller vi gjerne "dynamikk". Ordet er avledet fra det greske ordet "dynamis" som betyr kraft.

Repetisjon fra fysikken. Newtons tre lover

Newtons første lov

Newtons første lov sier at når summen av alle kreftene som virker på en gjenstand er null, er gjenstanden i ro eller beveger seg med konstant fart langs en rett linje. En slik tilstand kalles gjerne for "statisk likevekt".

For et skip som ligger i ro i stille vann, vil det være likevekt mellom skipets tyngde og oppdrift. Begge disse kreftene vil være vertikale. Dersom det er strøm i vannet og skipet er fortøyd med et horisontalt tau, vil det være likevekt mellom strømkreftene på skipet og krafta i tauet.



Illustrasjon av Newtons første lov, anvendt på fortøyd skip i strøm
Ifølge Newtons første lov må tyngden G og oppdriften F_b være i likevekt. Det samme gjelder strømkreftene F_s og krafta F_t fra tauet. Kreftene er illustrert med ulike skalaer i horisontal- og vertikalretningen.

Isaac Newton (1642 - 1727)
Newton levde på 1600-tallet og var datidens største vitenskapsmann. Han formulerte tre lover som er grunnlaget for forståelse av dynamikk.

MÅL

Etter å ha studert dette kapitlet skal du:

- Kunne forklare hva vi generelt mener med svingninger, og med periodiske, harmoniske og irregulære svingninger, frie svingninger med og uten demping, samt egensvingninger og tvugne svingninger
- Ha blitt godt kjent med grunnleggende begreper som amplitude, periode, frekvens, vinkelfrekvens og fjærstivhet
- Kunne forklare hva vi mener med resonans og hvordan den oppstår
- Kunne forkare hva vi mener med dynamiske laster og kjenne til de viktigste dynamiske lasttyper for marine konstruksjoner
- Kunne forklare hvordan skip og andre marine konstruksjoner oppfører seg når de utsettes for dynamiske laster
- Kunne utføre enkle beregninger av svingninger

Krefter og bevegelser for marine konstruksjoner

Newtons andre lov

Newtons andre lov sier at når et legeme påvirkes av en ytre kraft ΔF i tillegg til de kreftene som opptrer i statisk likevekt, vil legemet få en akselerasjon i kraftas retning. Denne loven skriver vi gjerne

$$\Delta F = m \cdot a \qquad (1)$$

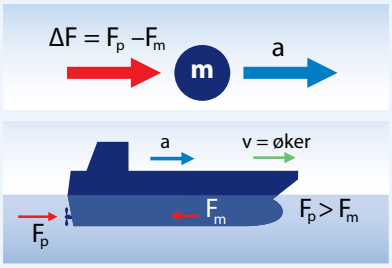
Her er ΔF tilleggskrafta med enhet Newton (N), m er massen med enhet kilogram (kg) og a er akselerasjonen som uttrykker hastighetsendring per tid og benevnes meter per sekund i sekundet (m/s^2). Merk at kraftenheten N ikke er en grunnenhet i SI-systemet. Benytter vi bare grunnenhetene, ser vi av ligningen at kraft har benevningen $kg \cdot m / s^2$.

En følge av denne loven er at dersom et skip ligger i ro og starter propellen, vil propellens skyvekraft F_P gi skipet en akselerasjon a. Skipets hastighet vil øke inntil motstanden F_m blir like stor som skyvekrafta fra propellen. Dermed har vi fått en ny likevektstilstand, men nå med en konstant hastighet.

Newtons tredje lov

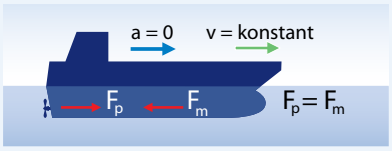
Newtons tredje lov kalles "Loven om aksjon og reaksjon" og sier noe om hvordan kreftene mellom to legemer vil være. Loven sier at dersom to legemer virker på hverandre med krefter, må kraften på det ene legemet være like stor men, motsatt rettet, i forhold til kraften som virker på det andre legemet.

Denne loven kan vi bruke for å se på kreftene som virker når en båt sleper en annen båt. Slepebåtens propell må gi en skyvekraft som er summen av krafta i slepelina og slepebåtens egen motstand, mens kraften i slepelina vil være like stor som motstanden for den båten som slepes. Et annet eksempel på kraft og motkraft er vist i figur på side 5-4.



Illustrasjon av Newtons andre lov

Propellen starter og gir skyvekraft F_P som er større enn motstanden F_m. Skipet får en akselerasjon: $a = (F_P - F_m) / m$

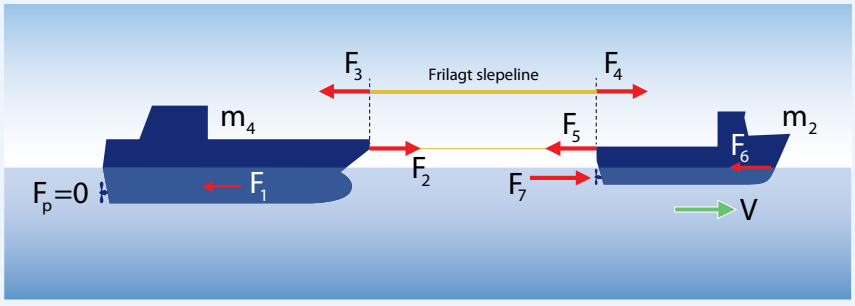


Motstanden øker etter hvert som farten øker. Når motstanden F_m er blitt lik F_P, er vi tilbake i Newtons første lov, og farten holder seg nå konstant

Krefter på skip
F1 = strømningsmotst.
F2 = kraft fra slepeline

Krefter på slepeline
F3 = strekkraft i line
F4 = strekkraft i line

Krefter på slepebåt
F5 = kraft fra slepeline
F6 = strømningsmotst.
F7 = skyvekraft propell



Illustrasjon av Newtons tredje lov

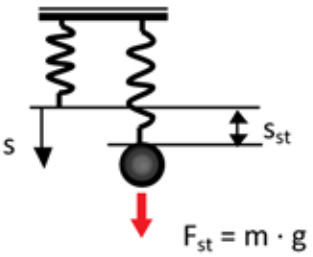
Enten slepet foregår med konstant fart eller ikke, gir Newtons tredje lov to kraftpar hvor kraft og motkraft er like store og motsatt rettet:

F2 = -F3 og F4 = -F5

Hvis slepefarten er konstant, kan Newtons første lov anvendes på hvert av de tre legemene. Dette gir:

F2 = -F1
F4 = -F3
F7 = -(F5 + F6)

Frie svingninger uten demping



Lodd som henger i ei fjær

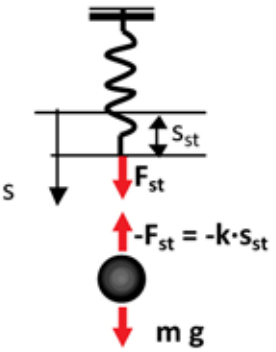
Deformasjon og fjærstivhet. Statisk system

Vi skal nå benytte Newtons lover til å beskrive det som skjer, når det oppstår en dynamisk tilstand, eller en svingning. Utgangspunktet er et lodd som henger i ei fjær. Det er ingen bevegelse. Vi har en *statisk* tilstand. Loddet har en masse m (kg) og påvirkes av tyngdekrafta slik at krafta F_{st} i fjæra blir

$$F_{st} = m \cdot g \qquad (2)$$

Her er g tyngdens akselerasjon, som på jorda er omlag 9.81 m/s^2. Fjæra har en *stivhet* som forteller hvor stor kraft som må til for at fjæra skal få en lengdeforandring på 1 meter. Fjærstivheten kalles gjerne k og har benevningen N/m. Sammenhengen mellom den statiske forskyvningen s_{st} og tyngden av loddet F_{st} er gitt av

$$s_{st} = F_{st} / k \quad \text{eller} \quad F_{st} = k \cdot s_{st} \qquad (3)$$

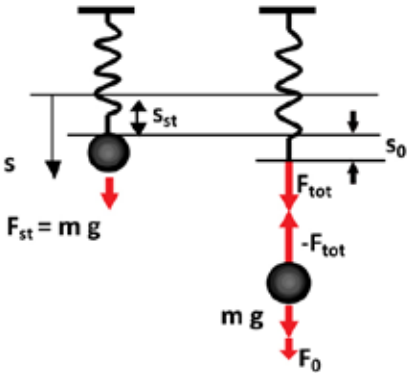


Likevekt for lodd som henger i ei fjær

Vi bruker begrepet "tyngde" for den krafta fjæra føler fra massen når massen utsettes for *tyngdens akselerasjon* g. Dette er den akselerasjonen en masse vil få dersom den faller fritt (uten luftmotstand) i jordas gravitasjonsfelt. Dersom vi flytter loddet og fjæra til månen, vil loddets masse være uforandret. Men fjæra vil få en mindre forlengelse fordi loddets tyngde er mindre på månen, der tyngdens akselerasjon bare er 1.63 m/s^2.

I denne tilstanden er det likevekt mellom tyngden av loddet og krafta i fjæra. Merk at fjæra opplever at krafta F_{st} er rettet nedover, mens for loddet virker den samme krafta oppover. Dette er et uttrykk for Newtons 3. lov: Aksjonskrafta er tyngdekrafta av loddet m·g, mens reaksjonskrafta er fjærkrafta $k \cdot s_{st}$. Disse kreftene er like store, men de har motsatt retning. Summen av de to kreftene er null, systemet er med andre ord i likevekt:

$$m \cdot g = k \cdot s_{st} \quad \text{eller} \quad m \cdot g - k \cdot s_{st} = 0 \qquad (4)$$



Likevekt før loddet slippes

Mens loddet henger i ro, tar vi tak i det og drar det nedover et lite stykke s_0. For å gjøre dette må vi dra med ei kraft som er bestemt av fjærstivheten:

$$F_0 = k \cdot s_0 \qquad (5)$$

F_0 er ei ytre kraft, og når vi holder loddet i denne posisjonen, er det likevekt mellom krafta i fjæra og summen av loddets tyngde og den krafta vi holder loddet med. Den totale krafta i fjæra er altså:

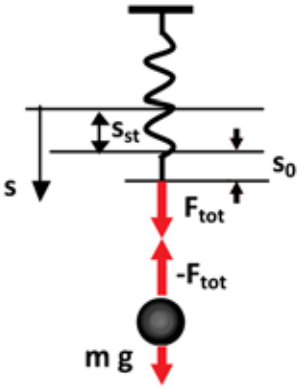
$$F_{tot} = F_{st} + F_0 = k \cdot (s_{st} + s_0) \qquad (6)$$

Dynamisk system

Ut fra ligningene (6) og (2) ser vi at

$$m \cdot g + F_0 - k(s_{st} + s_0) = 0 \qquad (7)$$

Summen av alle kreftene er null, systemet er nok en gang i likevekt. I denne tilstanden slipper vi loddet. Det som da vil skje, er at loddet begynner å bevege seg oppover og deretter nedover for så å gå oppover igjen; det oppstår en svingning. Vårt statiske system er blitt dynamisk. La oss se nærmere på hvordan vi kan beskrive det som skjer, ved hjelp av Newtons lover.



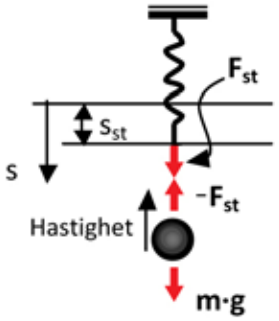
Krefter på loddet like etter at det ble sluppet.

Idet vi slipper loddet vil krafta som vi måtte ha for å holde loddet nede, forsvinne. Krafta i fjæra vil være uforandret i dette øyeblikket, for fjæra har jo ikke forandret sin lengde. Dette betyr at det nå ikke er likevekt mellom tyngden av loddet og krafta fra fjæra. Den ubalanserte krafta er rettet oppover og har samme størrelse som den opprinnelige holdekrafta:

$$F_{ubal} = m \cdot g - F_{tot} = m \cdot g - k(s_{st} + s_0) = -k \cdot s_0 \qquad (8)$$

Den ubalanserte krafta er negativ fordi den er rettet oppover, altså i motsatt retning av positiv forskyving. Denne krafta vil føre til at loddet akselererer oppover. Akselerasjonen kan finnes fra Newtons 2. lov. Kraft = masse × akselerasjon kan nå skrives:

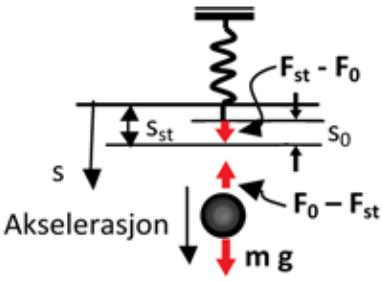
$$-k \cdot s_0 = m \cdot a_0 \,, \quad \text{eller:} \quad a_0 = -k \cdot s_0 / m \qquad (9)$$



Loddet passerer posisjon for statisk likevekt på veg opp

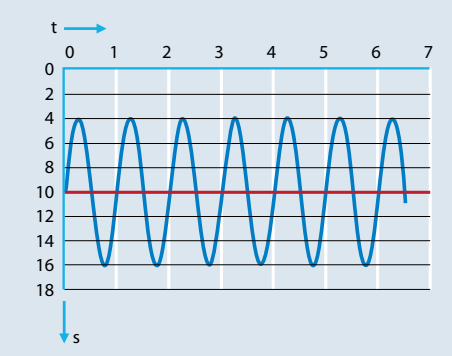
Etter hvert som loddet beveger seg oppover, vil krafta i fjæra avta slik at også akselerasjonen avtar. Når loddet passerer det punktet der det hang i statisk likevekt uten at vi dro det nedover, vil fjærkrafta være like stor som tyngden av loddet. Loddet vil da ikke lenger ha en akselerasjon, og det er tilsynelatende i likevekt. Men loddet har nå fått en hastighet oppover. I følge Newtons 1. lov kan denne hastigheten ikke endres uten at loddet påvirkes av nye krefter. Loddet vil altså fortsette sin bevegelse oppover.

Denne bevegelsen fører til at fjærkrafta blir redusert, noe som betyr at loddets tyngde - som virker nedover - blir større enn fjærkrafta som virker oppover. Vi får altså et kraftoverskudd nedover, noe som må bety at det oppstår en akselerasjon i samme retning.

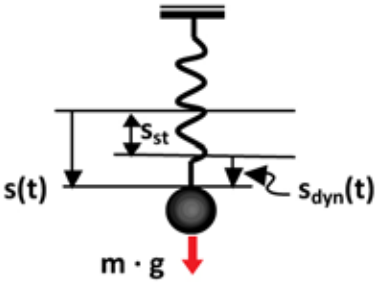


Krefter på loddet når det har maksimal forskyving oppover

Ettersom loddet nå har en hastighet oppover, vil akselerasjonen fortone seg som en retardasjon. Hastigheten minker og fører til at loddets hastighet etter hvert blir null. Dette skjer når loddet er kommet like langt oppover fra den statiske likevektstilstanden som det ble trukket nedover til det punktet der vi slapp loddet da bevegelsen startet.



Fri svingnimng uten demping



Definisjon av dynamisk forskyvning S_{dyn} (t)

Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894)

Periodisk svingning. Svingeligninga.

På dette tidspunktet vil fjærkrafta være mindre enn tyngden av loddet. Loddet har dermed en ubalansert kraft nedover og vil akselerere i den retningen. Loddet vil nok en gang passere den statiske likevektsposisjonen. Nå har det fått en nedoverrettet hastighet som gjør at loddet fortsetter å bevege seg nedover. Fjærkrafta vil øke og bli større enn tyngden av loddet. Vi får en retardasjon slik at hastigheten minker og blir null når loddet kommer ned til det punktet der vi opprinnelig holdt det, før vi slapp det løs. Nå er loddet i samme tilstand som i utgangspunktet slik at de samme bevegelsene vil gjenta seg. Prosessen vil altså fortsette som en **periodisk svingning**. Ettersom det ikke er noen ytre krefter som påvirker forløpet, kalles dette en **fri svinging**. Vi ser at den statiske posisjonen nå blir en middelverdi for massens bevegelser (markert med rød strek på figuren). Det største utslaget fra denne posisjonen kalles svingingens amplitude.

For et vilkårlig tidspunkt t gjelder

$$-k \cdot s(t) + m \cdot g = m \cdot a(t) \qquad (10)$$

Vi kan nå benytte oss av ligning (4) og får

$$-k \cdot s(t) + k \cdot s_{st} = m \cdot a(t) \qquad (11)$$

Uttrykket $s(t) - s_{st}$ blir den dynamiske forskyvingen som vi kan kalle $s_{dyn}(t)$. Dermed kan ligning (11) skrives som:

$$-k \cdot s_{dyn}(t) = m \cdot a(t) \qquad (12)$$

Denne ligningen gir en direkte sammenheng mellom den dynamiske forskyvningen og akselerasjonen for vilkårlige tidspunkt. Vi kaller den gjerne for svingeligningen.

Egenperiode og egenfrekvens

Tidsrommet mellom hver gang loddet kommer tilbake til startposisjonen, kalles svingningens egenperiode. Denne benevnes ofte T_E og er bestemt av massens og fjæras størrelser. Egenperioden kan beregnes med formelen

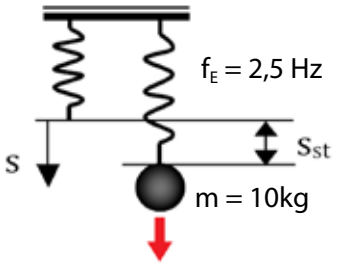
$$T_E = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}} \qquad (13)$$

Dersom massen settes inn i formelen som kg og stivheten som N/m, får vi egenperioden i sekund. Formelen forteller oss at egenperioden vil øke når massen øker, systemet blir altså tregere. Dersom fjæra blir stivere, blir perioden redusert, det vil si at vi får en raskere svingning. Vi ser ofte at man benytter frekvensen i stedet for perioden til å karakterisere svingningen. Frekvensen uttrykker antall svingeperioder per sekund og beregnes med formelen

$$f_E = \frac{1}{T_E} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad (14)$$

Enheten for frekvens er Hertz og forkortes Hz. Den har fått sitt navn etter den tyske fysikeren Heinrich Rudolf Hertz som ga viktige bidrag til vitenskapen om elektromagnetisme.

Løsning av svingeligningen (ligning 12) Skal vi vise hvordan uttrykket for egenperioden eller egenfrekvensen (ligning 13 eller 14) framkommer, krever det at vi først løser ligning 12, altså finner et uttrykk for $s_{dyn}(t)$ som tilfredsstiller ligningen. Det vil føre for langt å gjøre dette her i teksten, men spesielt interesserte elever kan forsøke å løse oppgave 5.4. Denne oppgaven gir samtidig god trening i derivasjon og innsikt i hvor anvendbar denne regnearten er.



Fjærsystem for eksempel 5.1

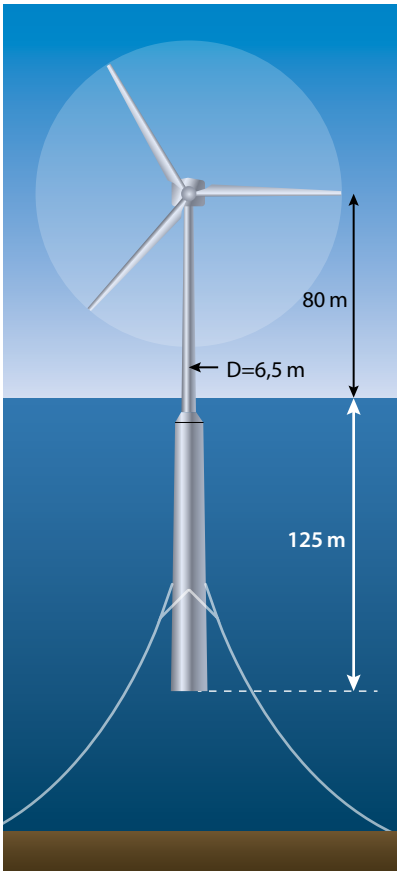
Eksempel 5.1. Frie svingninger uten demping i et fjærsystem
Et lodd med masse 10 kg er hengt opp i ei fjær. Når systemet kommer i svingninger, måles en egenfrekvens på 2,5 Hz. Bestem:
a) Fjærkonstant, k
b) Statisk forskyving, s_{st}
c) Egenperiode, T_E
d) Arnplitude s_o for en svingning som starter med"holdekraft" på 5N

Løsning
a) Fra lign. 5.14: $k = 4 \cdot \pi^2 \cdot f_E^2 \cdot m = 4 \cdot \pi^2 \cdot (2{,}5\ \text{Hz})^2 \cdot 10\ \text{kg} = \underline{2460\ \text{N/m}}$

b) $s_{st} = \dfrac{m \cdot g}{k} = \dfrac{10\ \text{kg} \cdot 9.8\ \text{m/s}^2}{2460\ \text{N/m}} = 0{,}0398\ \text{m} \sim \underline{40\ \text{mm}}$

c) $T_E = \dfrac{1}{f_E} = \dfrac{1}{2{,}5\ \text{Hz}} = \underline{0{,}4\ \text{s}}$

c) $s_o = \dfrac{F_o}{k} = \dfrac{5\text{N}}{2460\ \text{N/m}} = 0{,}00203\ \text{m} \sim \underline{2\text{mm}}$



Hywind vindkraftanlegg
Noen generelle data:
Totalt deplasement: 8000 m³
Vindturbinens effekt: 5-6 MW
Vindturbinens rotordiameter: 120 m

Eksempel 5.2. Frie, vertikale svingninger for flytende vindturbin
Figur til høyre viser en prototyp på et "Hywind" vindkraftanlegg. Totalt deplasement er $\nabla_{tot} = 8000\ \text{m}^3$. Søylen har en diameter i vannlinjen lik 6 m. Den er ankret opp med tre liner. Vi skal imidlertid se på bevegelsene før linene er montert, altså når systemet flyter fritt.
a) Også legemer som flyter har en "fjærstivhet". Som ellers, kan vi definere stivheten som kraftøking per m forskyving. I dette tilfellet må vi da se på forandringen i oppdrift (ΔB) per m forskyving av dypgangen. Vi kaller gjerne slik stivhet for vannplanstivhet i stedet for fjærstivhet. Forklar hvorfor det er arealet (A_{vl}) i *vannlinjen* som teller, og utled at vannplanstivheten er:
$k = A_{vl} \cdot \rho \cdot g$
b) Beregn vannplanstivheten i vertikal retning for konstruksjonen
c) Beregn egenperioden for små, vertikale bevegelser

Løsning
a) Det er konstrusjonens dimensjoner og form i vannlinjen og like over og under den, som bestemmer hvor mye oppdriften forandres i forhold til forandringene i dypgangen. "Fjærstivheten" blir da:

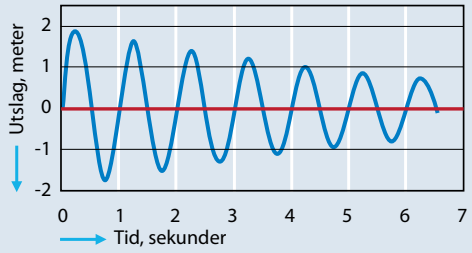
$$k = \frac{\Delta B}{\Delta H} = \frac{A_{vl} \cdot \Delta H \cdot \rho \cdot g}{\Delta H} = A_{vl} \cdot \rho \cdot g$$

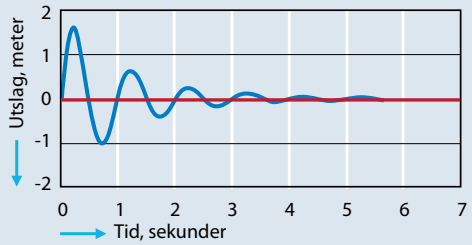
b) $k = \pi \cdot R^2 \cdot \rho \cdot g = \pi \cdot (3{,}25\ \text{m})^2 \cdot 1025\ \text{kg/m}^3 \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2 = \underline{333\ \text{kN/m}}$

$$T_E = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\nabla \cdot \rho \cdot g}{k}} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{8000\ \text{m}^3 \cdot 1025\ \text{kg/m}^3 \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2}{333 \cdot 10^3\ \text{N/m}}} = \underline{97\ \text{s}}$$

Vi undrer oss på:
En pendel svinger, men hvordan kan vi beregne egenperioden når den ikke har ei fjær?

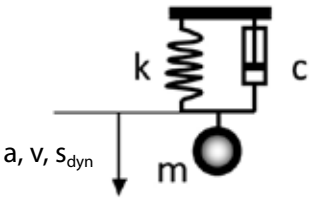
Frie svingninger med demping



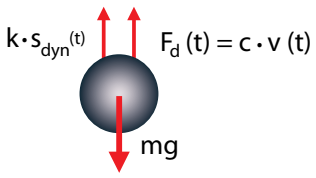


Eksempler på dempede frie svingninger med liten demping (øverst) og stor demping (nederst)

a.



b.



a. Prinsipiell illustrasjon av et fjær-masse-system som gir svingninger med demping

b. Fritt-legeme-diagram, påført alle krefter som virker på massen ved positiv bevegelse. *Vi tar imidlertid ikke med tyngden m · g i ligning 16 fordi denne allerede er tatt hensyn til ved å bruke $s_{dyn}(t)$ i stedet for s(t), se figur side 5-6.*

Dersom vi gjør forsøket med massen og fjæra, vil vi se at loddets bevegelser vil avta over tid. Loddet kommer ikke helt ned til det stedet der svingningen startet, og etter en tid vil loddet henge i ro i sin opprinnelige statiske likevektstilstand. Dette skyldes det vi kaller demping og betyr at den energien loddet og fjæra hadde, tappes fra systemet. For vårt lodd vil det være luftmotstanden som er det viktigste dempingsbidraget, og energien vil gå over til varme i lufta. Denne typen svingning kalles en dempet fri svingning.
Et velkjent eksempel på en kombinasjon av demper og fjær er støtdempere i biler. Hensikten med å ha støtdempere er å sørge for at karosseriet kan bevege seg i forhold til understellet når bilen kjører over en hump. Samtidig er det viktig at bevegelsen stopper opp så raskt som mulig etter at humpen er passert. Støtdempere i biler gir derfor en stor demping.

Dempingskraft

Demping vil vi beskrive som ei kraft F_d som alltid virker i motsatt retning av hastigheten, og som øker proporsjonalt med hastigheten. Sammenhengen mellom dempingskrafta $F_d(t)$ og hastigheten v(t) er da gitt av formelen

$$F_d(t) = - c \cdot v(t) \qquad (15)$$

Her er c en dempingskoeffisient. Ettersom F_d har enheten N, må benevningen for c være N/(m/s). Produktet av c og hastigheten v blir dermed en kraft med enheten N. Minustegnet i formelen er en følge av at krafta fra en demper alltid er rettet mot hastigheten.

Svingeligning med dempingsledd

Summen av krafta i fjæra og krafta i demperen vil være en ubalansert kraft som vil gi massen en akselerasjon. Sammenhengen mellom forskyving, hastighet og akselerasjon kan da skrives:

$$-c \cdot v(t) - k \cdot s_{dyn}(t) = m \cdot a(t) \qquad (16)$$

Fortegnene forteller oss at når hastigheten er positiv (rettet nedover på figuren), vil krafta fra demperen, slik massen merker den, være negativ. Tilsvarende vil en positiv forskyving føre til at massen merker ei negativ kraft fra fjæra. Dersom summen av krafta i demper og fjær er negativ, betyr det at den ubalanserte krafta er negativ, slik at akselerasjonen a(t) også blir negativ, altså rettet oppover på figuren.

Løsning av svingeligning med dempingsledd. Vi har foran konkludert med at frie svingninger uten demping har en egenperiode $T_E = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{m / k}$. Løsning av ligning 16 ovenfor gir tilsvarende et uttrykk for egenperioden for frie svingninger med demping:

$$T_{E,d} = \frac{T_E}{\sqrt{1 - \frac{c^2}{4 \cdot k \cdot m}}} \qquad (17)$$

Dempingens virkning på amplitudene beskrives av en eksponensialfunksjon som er vist på figuren til høyre. Vi kan ikke bruke plass på utledning av denne ligningen, men riktigheten kan bekreftes ved å bruke kjente derivasjonsregler på lignende måte som i oppgave 5.7.

Den spesifiserte eksponensialfunksjonen gir følgende forhold mellom hvilke som helst to utslag som følger på hverandre:

$$\frac{A_1}{A_2} = e^{c \cdot T_{E,d} / (2 \cdot m)} \qquad (18)$$

Her er c dempingskoeffisienten som er innført tidligere. Det kan ofte være vanskelig å finne passende erfaringsverdier for denne. Eksempelet nedenfor viser hvordan c i stedet kan beregnes fra målinger.

Eksempel 5.3: Demping av svingninger av en bøye
Svingningene som er vist til høyre, skriver seg fra en 0,4 meter høy bøye med masse 17,9 kg og øvrige data som vist til høyre. Bøya er festet til bunnen med en slakk line. En passerende enkeltbølge setter bøya i svingninger. Disse registreres med måleutstyr, og forløpet er som vist på figuren. Vi ser at svingningene dempes fort. Dempingen skyldes hydrodynamiske krefter mot bøya og lina når disse beveger seg i vannet. Tyngdepunktet er plassert slik at bøya flyter vertikalt.

Oppgaver:
a) Hvor stor er dempingskoeffisienten, c, for bøyas svingninger?
b) Bruk dempingskoeffisienten til å kontrollberegne egenfrekvensen for de frie, dempede svingningene

Løsninger:
a) Leser av på figur: $A_1 = 15$ mm, $A_2 = 6$ mm , $T_{E,d} = 1{,}0$ s
Innsatt i ligningen øverst på siden, gir dette:

$$15/6 = e^{c \cdot 1{,}0\ \text{s} / (2 \cdot 17{,}9)}$$

Dempingskoeffisienten, c, finnes ved å bruke naturlige logaritmer på begge sider av likhetstegnet:

$$\ln 2{,}5 = \frac{c \cdot 1{,}0\text{s}}{2 \cdot 17{,}9\ \text{kg}} \rightarrow c = \frac{2 \cdot 17{,}9\ \text{kg}}{1{,}0\ \text{s}} \cdot \ln 2{,}5 = 33 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 33 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}}$$

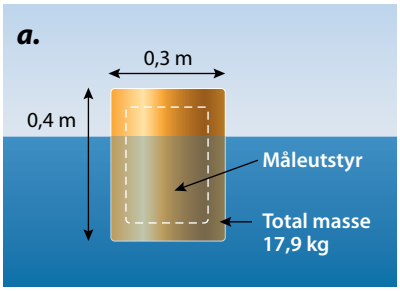
b) Finner først egenperioden for frie, udempede svingninger:

$$T_E = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{17{,}9\ \text{kg}}{710\ \text{N/m}}} = 1{,}0\text{s}$$

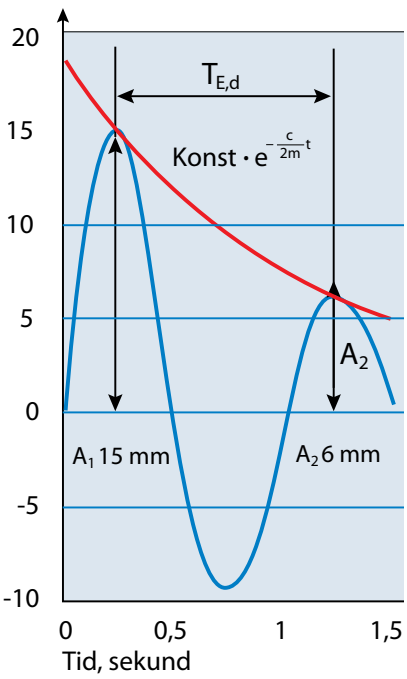
Vi kan så finne den dempede egenperioden ved å bruke lign.17, som gir:

$$T_{E,cl} = \frac{T_E}{\sqrt{1 - \frac{(33\text{Ns/m})^2}{4 \cdot 710\ \text{N/m} \cdot 17{,}9\ \text{kg}}}} = 1{,}0011\text{s}$$

Vi ser at egenperioden for den dempede svingningen for vårt tilfelle bare er marginalt lengre enn for udempet svingning. Dersom dempingskoeffisienten øker, vil imidertid forskjellen også øke.



b.

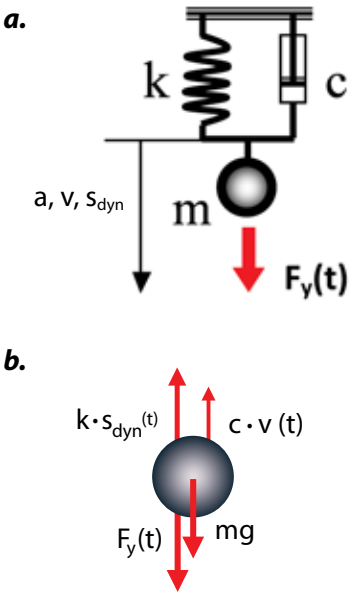


Bøye med måleutstyr
a. Data for bøye:
Total masse: m = 17,9 kg
"Fjærstivhet": $k = A_{vi} \cdot \rho \cdot g =$
$\pi \cdot (0{,}15\ m)^2 \cdot 1025 \frac{kg}{m^3} \cdot 9{,}8 \frac{m}{s^2}$
$= 710 \frac{N}{m}$

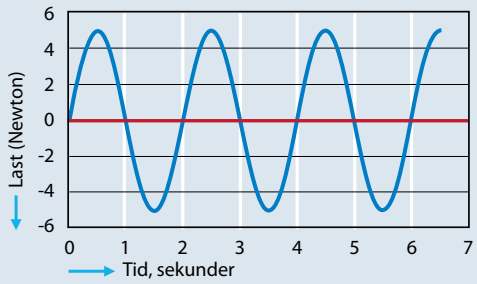
b. Frie, dempede svingninger målt på bøya

Vi undrer oss på:
Hvordan er støtdemperen på en bil laget når den både skal gi fjæring og demping?

Tvungne svingninger



a. Prinsipiell illustrasjon av et fjær-masse-system som påvirkes av ei ytre kraft $F_y(t)$ som gir tvungne svingninger
b. Fritt-legeme-diagram, påført alle krefter som virker på massen i systemet.



Last gitt som sinusfunksjon.
Periode = 2 sekunder

Indre og ytre krefter. Dynamisk likevektsligning

Vi har hittil sett på krefter i fjæra og demperen og funnet en sammenheng mellom disse og massens akselerasjon. De to kreftene kaller vi gjerne "indre krefter" da de er bestemt av egenskapene til det systemet vi ser på. Ytre krefter på marine konstruksjoner kommer gjerne fra bølger og vind, og vi skal nå se hvordan vi kan ta med slike krefter i vår dynamiske analyse.

Dersom vi har ei ytre kraft som varierer med tiden, $F_y(t)$, må vi legge denne sammen med de øvrige kreftene for å finne hvilken akselerasjon massen vil få. Vi kan altså skrive

$$-c \cdot v(t) - k \cdot s_{dyn}(t) + F_y(t) = m \cdot a(t) \qquad (19)$$

Denne ligningen ser unektelig litt uryddig ut. Vi har tre ukjente størrelser, nemlig forskyvning s, hastighet v og akselerasjon a - og vi må tilsynelatende kjenne både hastighet, forskyving og ytre kraft for å finne ubalansert kraft og dermed kunne beregne akselerasjonen. Det var den franske vitenskapsmannen d'Alembert som først fant en måte å løse problemet på. Han innså at m·a-leddet tilsynelatende blir ei kraft og at denne "krafta" kan inngå i ligningen på samme måte som krafta i fjæra og demperen. Dermed kunne han skrive ligningen slik:

$$m \cdot a(t) + c \cdot v(t) + k \cdot s_{dyn}(t) = F_y(t) \qquad (20)$$

Denne ligninga kalles gjerne "dynamisk likevektsligning" selv om m·a-leddet egentlig ikke er ei kraft. Ligninga uttrykker Newtons andre lov og beskriver det som skjer når en masse utsettes for ei ubalansert kraft.

Men problemet er ikke løst med dette. Dersom vi kjenner den ytre lasta, vil ligningen inneholde tre ukjente størrelser: a(t), v(t) og s(t). For å finne ei løsning må vi alltid ha like mange ligninger som ukjente. I prinsippet kan vi finne to nye ligninger fra definisjonen av hastighet og akselerasjon. Hastighet er den deriverte av forskyvingen med hensyn til tid, og akselerasjon er den deriverte av hastigheten:

$$v = \frac{ds}{dt}, \quad a = \frac{dv}{dt} \qquad (21)$$

Den typen ligning vi nå får, kalles differensialligning. Vi skal ikke gå inn på hvordan vi kan finne en løsning, men bare gi en kort beskrivelse av viktige egenskaper for enkle dynamiske systemer. Vi begrenser diskusjonen til tilfeller der lasta kan beskrives som en sinus-funksjon:

$$F(t) = F_0 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T_L} t\right) \qquad (22)$$

Her er F_0 lastas største verdi, som vi kaller lastas amplitude, og T_L er lastas periode. Tidsvarierende funksjoner av typen sinus og cosinus kalles gjerne harmoniske funksjoner. Det er verd å merke seg at fri, udempet svinging som er omtalt tidligere, også er en slik harmonisk funksjon.

Dynamisk lastfaktor

Et system som utsettes for en tidsvarierende last som kan beskrives med en harmonisk funksjon (se ligning 22), vil få en svingning som kan beskrives på samme måte, altså som en harmonisk funksjon. Perioden for denne svingningen vil være den samme som for lasta. Amplituden for denne svingningen kan finnes fra formelen

$$s_0 = \frac{F_0}{k} \cdot DLF \qquad (23)$$

Her er F_0 amplituden for lasta, s_0 er amplituden for bevegelsen og F_0/k den forskyvingen som vil oppstå dersom systemet var utsatt for en statisk last med verdi F_0, se ligning (3). DLF blir da en "Dynamisk last-faktor" som er bestemt av forholdet mellom egenperioden og lastas periode, T_E/T_L, og dempingskoeffisienten c. Figuren viser hvordan DLF varierer med periodeforholdet T_E/T_L for ulike dempingsverdier.

Resonans

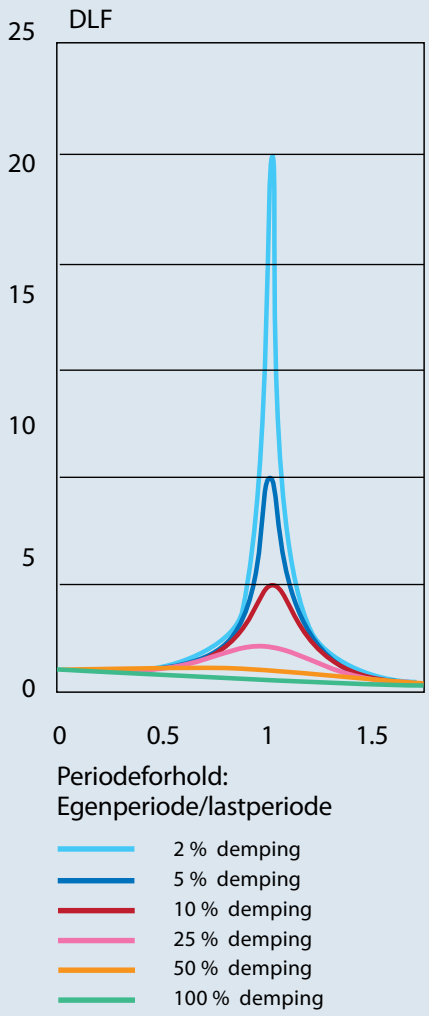
- Vi ser av figuren at responsen kan bli svært stor for et periode-forhold nær 1.0. For dette periodeforholdet har vi resonans.
- Vi ser også at dersom egenperioden er vesentlig kortere enn lastperioden (eller lastperioden vesentlig lengre enn egenperi-oden), blir DLF = 1.0.
- Dersom lastperioden er svært kort (egenperioden lang), får vi liten respons i forhold til den forskyvingen lasta ville gitt der-som den var konstant over tid (statisk last).
- En annen observasjon er at ulike verdier for demping gir helt ulik respons nær resonans, men demping betyr lite dersom vi har periodeforhold lavere enn 0,4 eller høyere enn 1,8 (om-trentlige verdier).

Vi kan finne den matematiske formelen for den dynamiske lastfaktoren ved å løse ligning (19) for en tidsvarierende last som er gitt som en sinus-funksjon, se ligning 22 . Det vil føre for langt å utlede formelen her. Resultatet blir:

$$DLF = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{T_E}{T_L}\right)^2\right)^2 + \frac{c^2}{m \cdot k}\left(\frac{T_E}{T_L}\right)^2}} \qquad (24)$$

Ligningen er illustrert i figur til høyre. Se også eksempel på neste side.

Vi undrer oss på:
Resonans er ikke bra for en konstruksjon, men kjenner du eksempler på at vi gjerne vil ha resonans?



Dynamisk forsterkningsfaktor

I figuren er dempingen oppgitt i prosent. Dette er den vanligste måten å karakterisere demping på og refererer til hvor stor demp-ingen er i forhold til en demping som fører til at fri svinging vil stoppe opp i løpet av første svinge-periode. Da er:

$$\text{Demping i \%} = \frac{100 \cdot c}{2\sqrt{m \cdot k}} \qquad (25)$$

Eksempel 5.4. Dynamisk lastfaktor for dempede, tvungne svingninger av bøye

I eksempel. 5.3 beregnet vi en dempingskoeffisient c =33 N · s/m for ei bøye med masse m= 17,9 kg, fjærstivhet k=710 N/m og egenperiode T_E=1,0 s. Vi tenker oss nå at bølger utsetter bøya for en vertikal last som gitt i ligning 22, med maksimal amplitude F_0 = : 35 N og lastperiode T_L = 1,25 s.

Oppgaver:
Bestem:

a) Tenkt statisk forskyving som svarer til den maksimale lasta F_0

b) Dynamisk lastfaktor DLF og amplitude s_0 for de tvungne svingningene. Tegn inn i figuren for DLF den beliggenhet som den funne verdien gir for bøya.

c) Dempingen i %. Hvordan stemmer dette med grafene for forskjellige dempinger i figuren?

Løsninger:

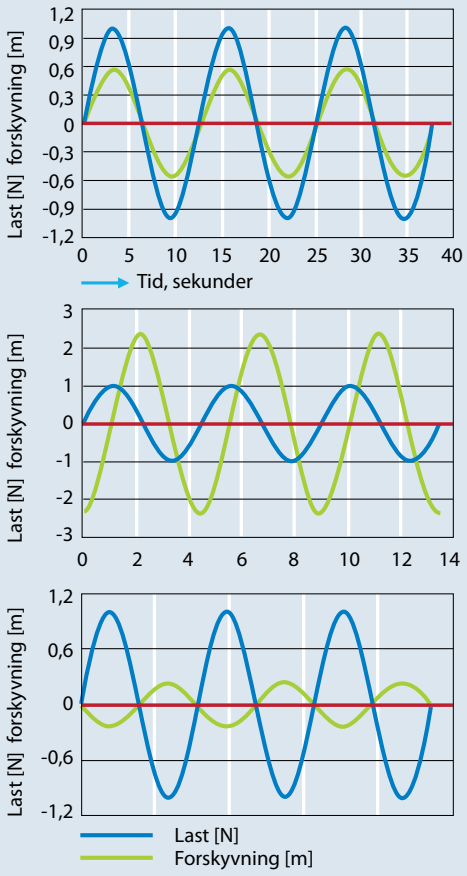
a) Tenkt statisk forskyving = F_0 / k = 35 N / 710 N/m ~ 0,05 m

b) Ved innsetting av verdiene ovenfor i ligning 22, får vi:
Dynamisk lastfaktor DLF = 2,3, som gir punkt A i figuren
Dynamisk amplitude: $s_0 = (F_0/k) \cdot DLF = 0{,}05\ m \cdot 2{,}3 = 0.12\ m$

c)

Lign. 25: $$\text{Demping} = \frac{100\% \cdot 33N \cdot s/m}{2 \cdot \sqrt{17{,}4 \cdot 710\ N/m}} = \underline{15\%}$$

Vi ser at dette passer godt med avlesing på figuren.



Variasjon av last og forskyvning

Variasjon av last og forskyving. Tidsforsinkelse.

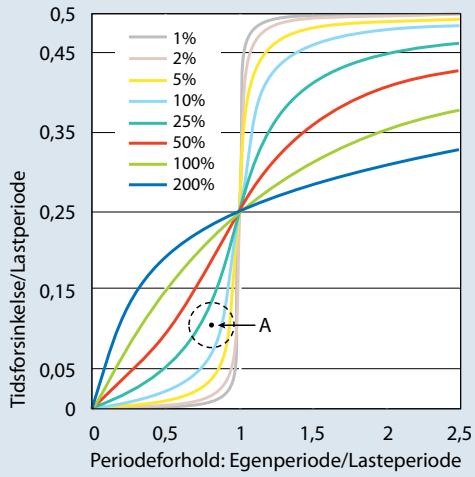
Dersom vi observerer tidsforløpet for last og forskyving, vil vi se at de to størrelsene ikke varierer synkront; forskyvingen ser ut til å være litt forsinket i forhold til lasta. Tidsforsinkelsen kan vi måle ved å se hvor lang tid det går fra lasta har hatt en maksimalverdi til forskyvingen får sin maksimalverdi. Dersom vi varierer lastas amplitude og frekvens, vil vi se at tidsforsinkelsen vil endre seg når frekvensen endres, men ikke når lastamplituden endres. Dette er illustrert på de tre figurene som viser last og forskyving som funksjon av tida når lastamplituden holdes konstant, men lastfrekvensen varierer.

Den øverste figuren viser dette for en langsomt varierende last. Her er tidsforsinkelsen liten. Forskyvningen er nesten i fase med lasta. Systemet oppfører seg nesten statisk; vi benytter gjerne begrepet "kvasi-statisk respons" om dette. Forskyvningen varierer nok med tiden, men responsen følger lasta, og den dynamiske lastfaktoren er nær 1.

På den midterste figuren er lastfrekvensen nær egenfrekvensen. Tidsforsinkelsen er nå blitt omlag en kvart periode. Lasta har rukket å bli nær null når forskyvningen har sin største verdi. Vi ser også at forskyvningens amplitude har øket kraftig, noe som er en direkte følge av at dynamisk lastfaktor nå er stor, jevnfør figuren på forrige side.

Den nederste av de tre figurene viser tidsforløpene når lastas frekvens er vesentlig høyere enn systemets egenfrekvens. Nå er lasta og forskyvningen i motfase. Når lasta har sin største positive verdi, er forskyvningen stor og negativ. Responsen ligger en halv periode bak lasta. Amplituden er nå blitt lavere enn i de to foregående tilfellene. Den dynamiske lastfaktoren er liten fordi systemet nå er for tregt til at det klarer å følge med i lastas hurtige variasjon. Merk at forskyvningens frekvens alltid er den samme som lastfrekvensen, men den høye frekvensen fører til at amplituden blir liten.

Demping og tidsforsinkelse. Lastas amplitude påvirker ikke tidsforsinkelsen mellom last og forskyvning, men dempingsnivået gjør det. Ved å variere demping og frekvens kan vi finne tidsforsinkelsen som funksjon av begge disse størrelsene. Dette er vist på figuren til høyre. Hver kurve viser forholdet mellom tidsforsinkelsen og lastperioden når forholdet mellom egenperioden og lastperioden varierer. Figuren viser slike kurver for flere dempingsnivå. Dersom periodeforholdet er lavt (langsom variasjon av lasta), er tidsforsinkelsen liten. Ved resonans kommer forskyvningen alltid en kvart periode etter lasta. Dersom lastvariasjonene blir raske, altså at lastperioden blir langt kortere enn egenperioden, vil tidsforsinkelsen bli halve perioden for lave dempingsnivå. Last og forskyvning kommer altså i motfase. Det er viktig å kjenne til disse forholdene for å forstå hvordan marine konstruksjoner oppfører seg når de utsettes for bølgekrefter.

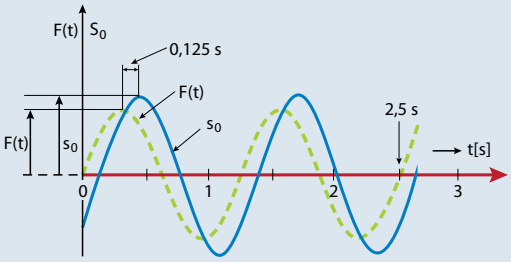


Tidsforsinkelse i forhold til lastperioden for varierende demping i prosent av kritisk demping

Eksempel 5.5. Last, forskyvning og tidsforsinkelse for bøye
Vi skal fortsette analysen av bøya som har blitt beregnet i eksemplene 5.3 og 5.4.

Oppgaver
a) Bøyas beliggenhet i et DLF-diagram ble på side 5-11 beskrevet ved hjelp av punkt A. Tegn også inn punkt A i diagrammet for til deping og tidsforsinkelse til høyre.
b) Bestem tidsforsinkelsen mellom lastas variasjon og bøyas forskyvning.
c) Tegn i samme figur grafer for lastas variasjon og forskyvningens forløp.
d) Gir de to forløpene omtrent samme helhetsbilde som figurene på side 5-22 viser?

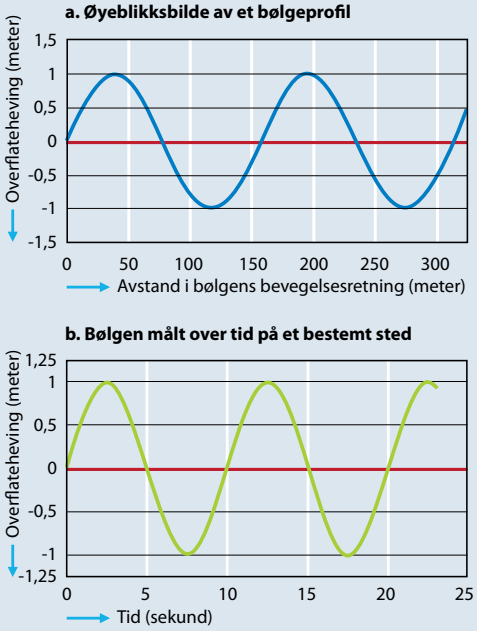
Løsninger:
a) Se figuren
b) Leser av: Tidsforsinkelse/Lastperiode = 0,10, som gir:
Tidsforsinkelse = 0,10 · 1,25 s = 0,125 s
c) Svingningsforløp for last og bøyas forskyvning: Se figur
d) Når $T_E / T_L < 1,0$, som i eksemplet, er det naturligst å sammenligne med den øverste av diagrammene på side 5-12, og vi ser at det er stor likhet.



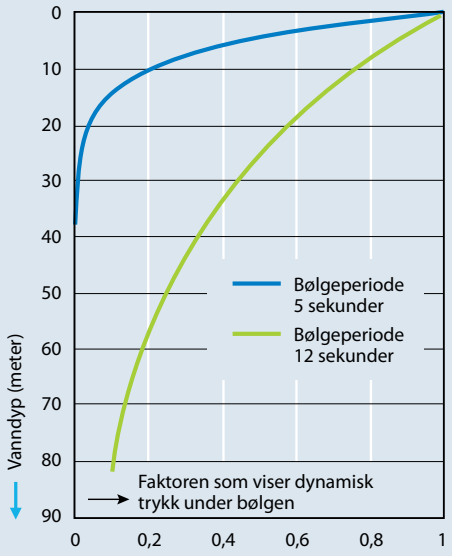
Variasjon av last og forskyvning for bøye i eksempel 5.5
$T_E/T_L = 1,0/1,25 = 0,8$, $\Delta T = 0,125s$

Vi undrer oss på:
Hvorfor blir tidsforsinkelsen alltid en kvart periode når lastperioden er den samme som egenperioden?

Dynamiske laster og lastvirkning



Bølgeprofiler



Dynamisk trykk under bølger

Skip og marine konstruksjoner utsettes for tidsvarierende laster fra flere ulike kilder. Vi skal her gi en kort oversikt over de viktigste dynamiske lasttypene og forklare hvordan typiske konstruksjoner vil oppføre seg når de utsettes for slike laster.

Havbølger

Havbølger er utførlig beskrevet i kapittel 1. Vi skal her bare gi en stikkordsmessig beskrivelse av de viktigste forhold som har betydning for dynamiske krefter.

- Havbølger skapes av vind, men det er tyngdekrafta som bestemmer bølgenes form og vandring.

- Bølgelengden L er avstanden mellom to bølgetopper. Bølgeperioden T er tiden det tar fra en bølgetopp passerer et visst sted til den neste bølgetoppen kommer på det samme stedet. Sammenhengen mellom bølgeperioden T og bølgelengden L på dypt vann er gitt ved

  formelen $L = \frac{gT^2}{2\pi}$ (26)

  Her er g tyngdens akselerasjon. Med "dypt vann" menes at vanndypet er større enn en halv bølgelengde.

- De bølgene som har betydning for vanlige skip og marine konstruksjoner, har perioder mellom 4 og 25 sekunder. Dette betyr at bølgelengdene varierer mellom 25 og 975 meter.

- De høyeste bølgene som vi forventer å se i norske farvann, er omlag 32 meter fra bølgedal til bølgetopp. En slik bølge har en periode på omlag 15 sekunder. Bølgelengden vil da være 350 meter.

- Bølger med lengre perioder enn 20 sekunder kalles vanligvis dønninger, og har langt mindre langt mindre bølgehøyder enn de største bølgene.

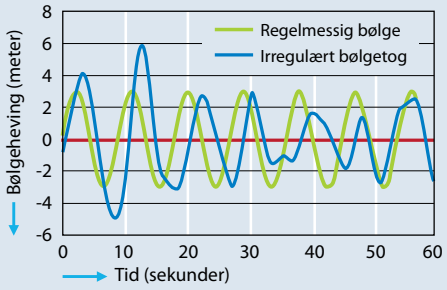
- Bølger med lange perioder påvirker trykk og gir vannbevegelser langt nedover i dypet, mens bølger med kort periode dempes ut på et langt mindre dyp. En bølge med 15 sekunders periode vil merkes helt ned til 150 meters dyp, mens en bølge med 4 sekunders periode bare skaper merkbare bevegelser ned til 10 meter.

- Havbølger er uregelmessige slik at de bølgene som opptrer i en gitt situasjon, inneholder mange bølgefrekvenser. Se figur neste side. Dette har stor betydning for hvordan bølgene påvirker skip og marine konstruksjoner. For å beskrive slike bølger må vi bruke statistikk, men vi kan ikke gå inn på teorien for denne typen beregninger her.

Vind

Vind beskrives gjerne ved å oppgi en midlere vindhastighet og en karakteristisk verdi for vindkast. Eksempel: "Vindhastighet 20 m/s med 30 m/s i kastene". Dette tolker vi som at vi har en midlere hastighet på 20 m/s og en dynamisk variasjon med karakteristisk amplitude på 10 m/s. Middelvinden vil gi en konstant (statisk) kraft på en konstruksjon, mens vindkastene vil gi tidsvarierende (dynamiske) krefter.

Den dynamiske vindhastigheten er, i likhet med bølger, uregelmessig, og vi må derfor benytte statistikk når vi skal beskrive vind.



Bølgehevinger i regelmessige og uregelmessige bølger

Strøm

Du kan lese mer om havstrømmer på sidene fra 11-12 til 11-15. De kan deles i flere typer.

- Globale strømmer som styres av temperaturforskjeller på jordkloden, de store kontinentenes beliggenhet og jordrotasjonen. Golfstrømmen er en slik global havstrøm.
- Lokale havstrømmer som styres av vannmengder fra de store elver, ulikt saltinnhold og lokal geografi. Den norske kyststrømmen, som har sitt utgangspunkt i Østersjøen, er en slik strøm. Det er et upresist skille mellom globale og lokale havstrømmer.
- Strøm som skyldes tidevann, er egentlig en gravitasjonsbølge som går rundt jordkloden og som har to bølgetopper. Den skaper høyvann omtrent to ganger i døgnet. Tidevannsstrømmen er ikke kraftig i de store havrommene, men kan bli meget sterk på grunn av lokal geografi. I Norge har vi flere eksempler på det. Saltstrømmen ved Bodø er kanskje den mest kjente.
- Vinddrevet strøm skyldes skjærkrefter (friksjon) mellom luft og vann. Strømretningen vil avvike fra vindens retning. Denne strømkomponenten vil bygges opp gradvis av vedvarende vind og vil fortsette noe tid etter at vinden har sluttet å blåse. Les mer på side 11-12.
- Spesielle hendelser, f.eks. virvelavløsning i globale strømfelt ved spesielle kystformasjoner eller plutselige "fallstrømmer" fra grunt vann ned til store havdyp som følge av forskjeller i tetthet. Denne typen strømmer kan bli meget kraftige, men har kort varighet og liten geografisk utbredelse.

Tidsvarierende strøm kan nok skape problemer for visse typer marine operasjoner, men vi vil vanligvis ikke se på dette som dynamiske effekter fordi endringene skjer langsomt. En stabil strøm vil imidlertid føre til virvelavløsning rundt konstruksjoner, se figur side 5-17, og slike virvler vil gi tidsvarierende krefter som kan gi vesentlig dynamisk respons. Perioden for virvelavløsning rundt en sirkulær sylinder, T_v, kan beregnes ut fra formelen

$$T_v = 5\frac{D}{V}$$

Her er V strømhastigheten i m/s og D diameteren på sylinderen i meter. Faktoren 5 er bestemt ut fra observasjoner av virvelavløsning.

Det vil oppstå krefter på tvers av strømretninger med samme periode som virvelavløsningen. Slike krefter er ikke store i forhold til bølgekrefter, men ved resonans kan de likevel gi store bevegelser. Denne typen bevegelser er et problem for lange, slanke rør av ulik type, men også for flytende plattformer.

Vi undrer oss på:
Hvorfor blir tidsforsinkelsen alltid en kvart periode når lastperioden er den samme som egenperioden?

Andre dynamiske lasttyper

Jordskjelv medfører vertikale og horisontale bevegelser av sjøbunnen og vil gi svingninger i konstruksjoner som står der dette skjer. Jordskjelv er sjeldne i havområdene rundt Norge, og de som opptrer har lav intensitet. Likevel må plattformer på norsk sokkel kontrolleres slik at man er sikker på at de tåler de jordskjelvene vi tror kan komme. Det er imidlertid få eksempler på at jordskjelv har hatt betydning for utformingen av våre konstruksjoner.

Tsunami er en type havbølger som skapes av jordskjelv, se side 1-28/29. Det er store vertikale forskyvninger av havbunnen som er spesielt farlige. En tsunami er helt ufarlig – knapt merkbar - på stort vanndyp, men når bølgen når inn mot land, kan den få meget dramatiske følger. Bølgen kan bli svært høy og skylle langt innover land. Det er bunnforholdene i strandsonen som avgjør hvor farlig en tsunami er. Det er områder der vanndypet øker gradvis over en lang strekning fra land som er spesielt utsatt. Les mer på sidene 1-28/29.

Kollisjon mellom to skip eller mellom skip og plattform skjer, men heldigvis sjeldent. Slike støt vil kunne gi skader på både skip og plattform, og bare en dynamisk analyse kan gi svar på hvor store skadene kan bli. Alle plattformer på norsk sokkel er utformet for å tåle kollisjoner av en viss størrelse uten at det fører til havari. Du kan lese mer om dette på side 6-25.

Gjenstander som faller vil gi en dynamisk belastning der fallet ender. Det oppstår en kortvarig last av samme type som ved en kollisjon. Det er spesielt viktig å beskytte bunninstallasjoner for oljeproduksjon mot fallende gjenstander. Krav om slik beskyttelse er gjennomført på norsk kontinentalsokkel.

Eksplosjon er en annen type hendelse som gir en kortvarig dynamisk last. Eksplosjoner i et lukket rom vil føre til store skader, og eksplosjoner har ført til flere totalhavari av skip. Det er mulig - men ikke vanlig - å utføre dynamiske beregninger av konstruksjoner utsatt for eksplosjoner. Risiko knyttet til eksplosjoner, blir heller redusert ved å satse på å forhindre at det skjer, og unngå at eksplosjonsfarlige områder lukkes inne. Eksplosjon i friluft kan selvsagt også gjøre skade, men i langt mindre grad enn i et lukket rom.

Kranoperasjoner utføres ofte i forbindelse med feltutbygging til havs. En tung last som henger i en wire, vil være et dynamisk system der wiren blir fjæra som massen henger i. En wire er jo normalt ganske stiv, men når den blir lang nok, får den en betydelig elastisitet. Dersom kranen står på et skip som beveger seg i bølger, kan bevegelsene forsterkes slik at lasta får større bevegelser enn skipet. Dette er spesielt viktig ved installasjon av bunninstallasjoner for olje- og gassproduksjon på store vanndyp.

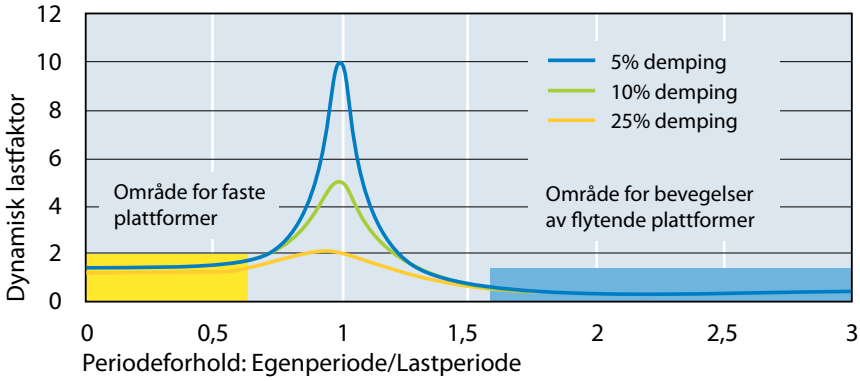
I det følgende vil det bli gitt en kort diskusjon omkring bølgers virkning på skip og utvalgte marine konstruksjoner.

Dynamisk respons

Dynamisk respons for faste plattformer

Demping i stål- og betongkonstruksjoner er normalt under 5%. Vi vet at disse konstruksjonene vil bli utsatt for store bølgekrefter. Dette betyr at disse konstruksjonene må unngå resonans i frekvensområdet der bølgekreftene er store. I praksis betyr det at egenperiodene må være kortere enn 4-5 sekunder.

Vi skal ikke gå inn på hvordan egenperioder for faste plattformer kan beregnes. Vi nøyer oss med å slå fast at dersom en plattform forlenges uten at konstruksjonen forsterkes, vil egenperioden øke proporsjonalt med kvadratet av lengden. Økt vanndyp betyr derfor at konstruksjonen må få en betydelig forsterking. Dette vil bli kostbart, noe som gjør at flytende produksjonsanlegg blir foretrukket på store dyp. På Trollfeltet er vanndypet 330 meter. Betongplattformen som står der, er den største på norsk sokkel, og det vil nok aldri bli installert en fast plattform på dypere vann enn dette hos oss. Trollplattformen har en egenperiode på omlag 4 sekunder og er altså på grensen for hva som kan godtas.



Dynamiske lastfaktorer for faste og flytende marine konstruksjoner

Bevegelse av flytende konstruksjoner

For faste plattformer er det altså viktig at egenperioden er kort. For bevegelsene av en forankret, flytende plattform er det viktig at egenperioden er lang. Slike plattformer legger seg altså på motsatt side av resonanstoppen. Egenperiodene skal gjerne være lengre enn 25 sekunder, og dersom periodene er kortere, er det viktig å dokumentere at dempingen er tilstrekkelig høy til å hindre at bevegelsene blir for store.

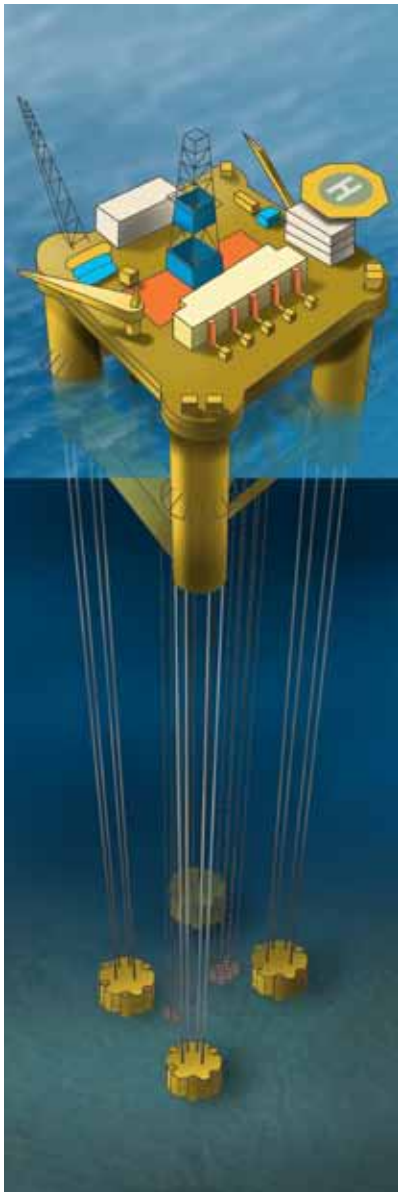
Egenperiodene for flytere er dels bestemt av forankringssystemet (se side 10-16) og delvis av flyterens form og størrelse. Formen spiller også en stor rolle for demping og for hvor store bølgekreftene vil bli. Dempingen av slike bevegelser er langt større enn for faste konstruksjoner.

Vindkrefter vil variere og kan ha i seg perioder i det samme området som egenperiodene for bevegelser. Resonans vil derfor kunne oppstå, men dempingen øker vesentlig med bevegelsens amplitude, noe som gjør at bevegelsene likevel blir akseptable.

Stålunderstell for bunnfast plattform. *Bunnfaste plattformer kan også være bygget i betong, se side 10-13 (Statfjord A og Troll).*

Flytende marine konstruksjoner *som brukes i olje/gass-utvinngen, kan være enten spesialskip som ovenfor, eller flytende plattformer av ulike typer, se sidene 10-14/15. Der kan du lese mer om disse.*

Vi undrer oss på:
Hvordan kan vi lage petroleumsplattformer som skal stå i områder med is og isfjell?



Strekkstagplattform
Plattformen holdes på plass av 16 strekkstag. Disse er utformet som stålrør med en diameter på 0,82 m. Stagene er montert med en samlet forspenning på 250 MN som drar plattformen så mye ned i sjøen at den får en oppdrift på totalt 1100 MN, se oppgave 10.1. Strekkstagplattformer kalles på engelsk "Tension Leg Platform" .

Dynamisk respons for strekkstagplattformer

Strekkstagplattformen er en spesiell plattformtype som benyttes på store dyp. På norsk sokkel har vi Snorre- og Heidrun-plattformene av denne typen. De to plattformene ligger begge på ca. 350 meters vanndyp i henholdsvis Nordsjøen (Tampen-feltet) og Norskehavet (Haltenbanken). Snorre er en stålplattform, mens Heidrun er bygget i betong (se side 4-7).

Plattformtypen karakteriseres ved at den har et overskudd av oppdrift og er forankret til havbunnen med vertikale strekkstag. Disse utbalanserer oppdriftsoverskuddet og er helt kritiske komponenter for å ivareta plattformens sikkerhet. Ryker et slikt stag vil det kunne bety katastrofe, noe som skjedde i Den meksikanske Golf under orkanen Rita i 2005. De norske plattformene er imidlertid konstruert etter andre regler enn de amerikanske, noe som gjør dem sikrere i forhold til en slik hendelse.

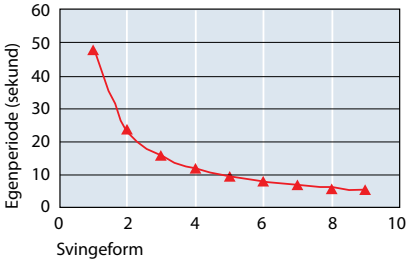
Dynamiske egenskaper er helt sentrale for design av denne plattformtypen. Bevegelsene i bølgenes retning (jaging) minner om en omvendt pendelbevegelse. Kreftene i strekkstagene vil ikke øke vesentlig når horisontale krefter fra vind, strøm og bølger skyver på plattformen. Men stagene blir skråstilt når plattformen skyves horisontalt. Da blir det horisontalkomponenter av stagkreftene som gir tilbakeføringskrefter. Egenperioden må følge de samme regler som for flytende plattformer. Her gjelder det altså å få perioden lang nok til å unngå resonans med bølgekreftene, noe som ikke byr på problemer når bare vanndypet er stort nok.

Vertikale bevegelser (hiv) fører til strekkøkning i stagene og må tilfredsstille samme krav til egenperioden som vi kjenner for faste plattformer: Egenperioden må ikke bli særlig lengre enn 4 sekunder for å unngå skadelig resonans. Plattformens masse og egenskapene til strekkstagene bestemmer egenperioden. Dersom stagene blir lange, vil deres stivhet bli redusert, og egenperioden vil øke med mindre stagenes tverrsnitt økes. Dette vil begrense bruken av denne plattformtypen på de virkelig store dypene. Magnolia-plattformen i Den meksikanske Golf står på 1450 meters vanndyp, noe som ser ut til å være det største dyp denne plattformtypen kan tåle.

Vi undrer oss på:
Hvordan er det mulig å installere en strekkstagplattform?

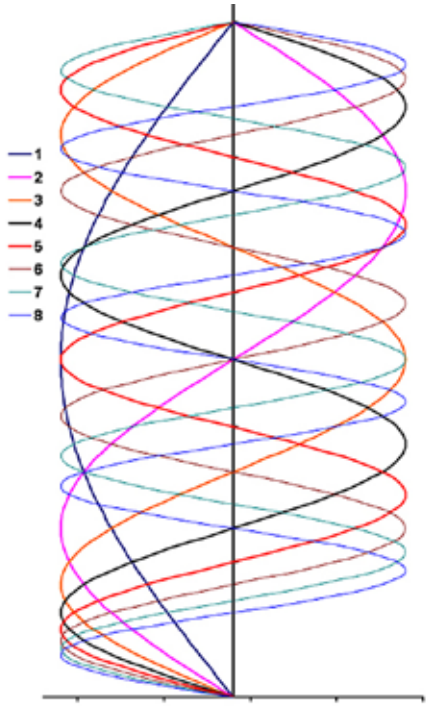
Dynamisk respons for slanke marine konstruksjoner

Mange anvendelser. Slanke marine konstruksjoner omfatter stigerør, strekkstag, rørledninger under utlegging og i frie spenn, og andre lignende konstruksjonselement. Det som karakteriserer disse, er at de vil ha mange egenperioder som kan komme i resonans, og at det faktisk er umulig å unngå dette. Men store amplituder vil gi stor demping, noe som vil begrense svingningene. Kunnskap om dynamikk er imidlertid viktig for å kunne dimensjonere riktig, og for å kunne forsikre seg om at skadelig utmatting ikke vil forekomme.



Egenperioder for stigerør på 2000 m vanndyp

Bølgekrefter og demping i vann er viktig. Figurene til høyre viser typiske egenperioder og egensvingeformer for et borestigerør på 2000 meters vanndyp. Borestrengen, som selv er et rør, ligger inne i stigerøret. Boreslam går ned gjennom borestrengen og tilbake til plattformen i stigerøret. Stigerøret har mange egenperioder, og hver periode er knyttet til en svingeform. Den lengste egenperioden er nesten 50 sekunder og er knyttet til svingeformen som bare har en bue over hele rørets lengde. Perioden er så lang at denne svingeformen ikke kan komme i resonans med krefter fra store bølger. Men fra figuren ser vi at det er flere egenperioder mellom 20 og 5 sekunder. Egensvingeformer som er knyttet til disse periodene, vil dermed kunne få resonans. Det som hindrer skadelige svingninger i slike rør, er demping fra vannet på større dyp enn der bølgekreftene virker. Dette betyr at man må gjøre dynamiske analyser av slike rør for å undersøke om dynamisk respons kan skade røret. I slike analyser er det viktig å kunne beskrive både bølgekrefter og demping i vann nøyaktig.



Svingeformer for langt stigerør

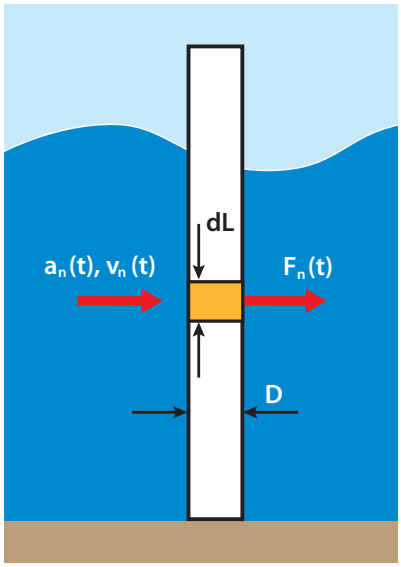
Virvelavløsning. En tredje kilde til dynamisk respons i slanke marine konstruksjoner er krefter fra virvelavløsning som følge av havstrømmer. Dette er en spesiell responstype som er selvbegrensende – amplituden blir sjelden større enn én diameter. Det spesielle med slike svingninger er at frekvensen øker når strømhastigheten øker, slik at den svingeformen som oppstår også vil forandres. Spenningene vil normalt ikke bli store, men det kan likevel oppstå utmattingsskade. Alle stigerør på flytende produksjonsanlegg må derfor analyseres for å sjekke at de tilfredsstiller krav til utmatting. Et tiltak for å begrense utmattingsskade er å montere spiralformete spoilere på røret. Dette er imidlertid kostbart, og man vil derfor gjerne unngå bruken av slike spoilere.

Virvelavløsning

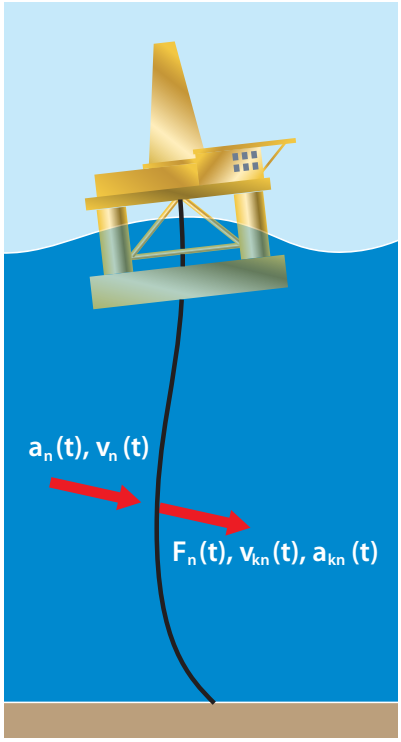
Vi undrer oss på:

Blås opp en lang, slank ballong. Hold den fast i en ende, og beveg den i en lang bue med utstrakt arm. Kanskje den vibrerer? Hva skjer?

Krefter fra bølger



Fast pel på havbunnen



Stigerør for boring fra flytende plattform

Det er ofte vanskelig å beregne krefter fra bølger på en konstruksjon. Dette har sammenheng med at konstruksjonen vil påvirke bølgen slik at det ikke er tilstrekkelig å kunne beregne vannets bevegelser i en uforstyrret bølge, slik det er beskrevet i kapittel 1. Men dersom konstruksjonen er liten i forhold til bølgelengden, kan vi anta at den ikke påvirker bølgen nevneverdig. Da kan vi benytte den såkalte Morisons ligning til å beregne krefter. Vi skal se nærmere på hvordan vi gjør dette for en fast pel som står på havbunnen.

Krefter på en fast pel på havbunnen

Pelen er vist på figur i margen. Den er loddrett og har konstant diameter D. Den er så stiv at vi kan anta at den ikke beveger seg når den utsettes for bølgekrefter. Diameteren er om lag 1/6 av bølgelengden, og dette gjør at vi kan benytte Morisons ligning. Generelt vises til side 1-18 når det gjelder bølgebevegelser av vannet. Bølgen gir horisontal hastighet v_n og akselerasjon a_n i et tidspunkt t. Vannbevegelser langs pelen gir ikke krefter av betydning. Ser vi på en del av pelen med lengde dL, kan vi finne kreftene i dette tidspunktet med formelen:

$$F_n(t) = \left[\frac{1}{2}\rho C_D D\, v_n(t)|v_n(t)| + \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} a_n(t)\right] dL$$

Her er ρ vannets tetthet [kg/m^3]. Merk at krafta som skapes av vannets hastighet, øker med kvadratet av hastigheten og er proporsjonalt med det projiserte arealet D · dL, mens krafta fra akselerasjonen er proporsjonal med akselerasjonen og pelens volum. De to krafttypene kalles ofte henholdsvis dragkraft og volumkraft. C_D er den samme størrelsen som vi beskrev på side 3-9. Den er om lag 0,8 for en sirkulær sylinder i typiske vannhastigheter. C_M kalles massekoeffisienten og er om lag 2,0 for en sirkulær sylinder.

Krefter på stigerør

Nederste figur viser et stigerør som vil få store bevegelser fra bølgekrefter og som følge av plattformens bevegelser. I dette tilfellet må vi ta hensyn til både bølgeinduserte vannbevegelser og rørets bevegelser. Det vil føre for langt å gå nærmere inn på slike beregninger.

Eksempel 5.6. Beregning av krefter på en vertikal pel

Ta utgangspunkt i øverste figur og data i margen på neste side, og beregn og besvar følgende:

a) Amplitudene for akselerasjon og hastighet på aktuelt punkt på pelen
b) Amplitudene for dragkrafta og volumkrafta
c) Tegn opp tidsfunksjonene, og bestem største totale kraft

Benytter vi lineær bølgeteori for dypt vann sammen med Morisons ligning, får vi:
Hastighet på dybde z, tidspunkt t:

$$v(z,t) = \frac{H}{2}\frac{2\pi}{T} e^{-\frac{\omega^2}{g}z} \sin(\frac{2\pi}{T}t)$$

Akselerasjon på dybde z, tidspunkt t:

$$a(z,t) = \frac{H}{2}\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 e^{-\frac{\omega^2}{g}z} \cos(\frac{2\pi}{T}t)$$

T er bølgens periode, H er bølgehøyden og g er tyngdens akselerasjon.
Dragkraft på element med diameter D og lengde dL:

$$F_D(t) = \frac{1}{2}\rho \cdot C_D \cdot D \cdot dL \cdot v(z,t) \cdot |v(z,t)|$$

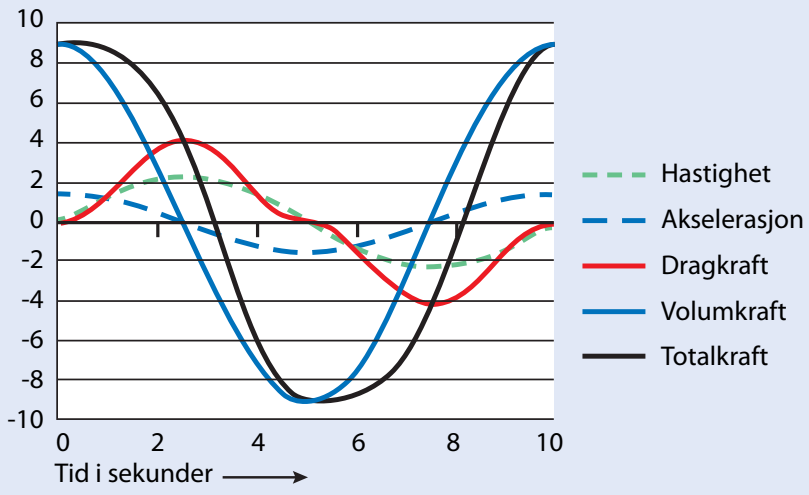
Volumkraft på element med diameter D og lengde dL:

$$F_V(t) = \rho \cdot C_M \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot dL \cdot a(z,t)$$

ρ er vannets tetthet, C_D er dragkoeffisienten og C_M er massekoeffisienten. Setter vi inn aktuelle verdier, finner vi ved hjelp av et dataprogram:

Hastighetsamplitude:	I overflaten: 3,14 m/s, på 8 meters dyp: 2,28 m/s
Akselerasjonsamplitude:	I overflaten: 1,97 m/s², på 8 meters dyp: 1,43 m/s²
Amplitude for dragkraft:	4,147 kN
Amplitude volumkraft:	8,989 kN

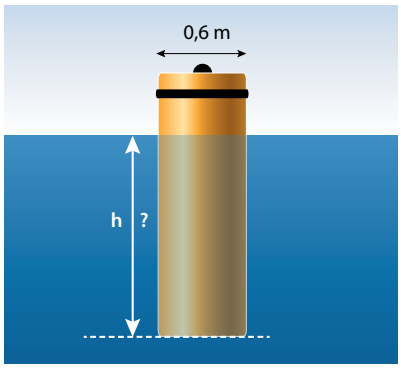
Tidshistoriene for hastighet, akselerasjon, de to kraftkomponentene og total kraft er vist på figuren. Merk at dragkraften ikke er en harmonisk funksjon fordi hastigheten inngår med leddet v(t) · |v(t)|.



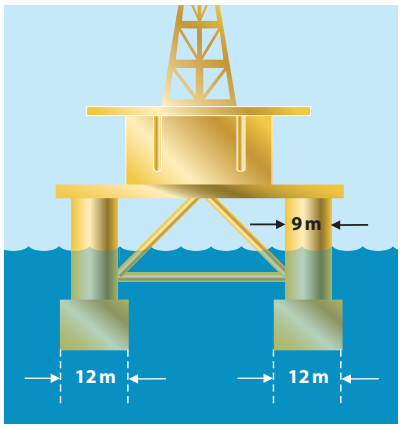
Data for eksempel 5.6

Pelens diameter:	*3 meter*
Bølgens periode:	*10 sekunder*
Bølgens amplitude:	*5 meter*
Vanndyp til segmentets midtpunkt:	*8 meter*
Lengde av segment:	*1 meter*
Vannets tetthet:	*1000 kg/m³*
Dragkoeffisient C_D:	*0,8*
Massekoeffisient C_M:	*2,0*

Oppgaver

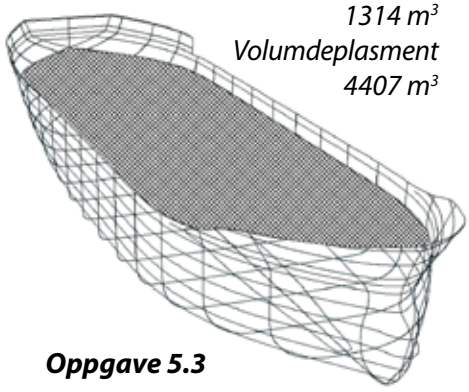


Oppgave 5.1

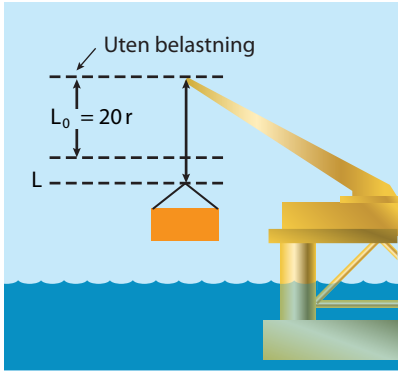


Oppgave 5.2

Vannlinjeareal
1314 m³
Volumdeplasment
4407 m³



Oppgave 5.3



Oppgave 5.4

Oppgave 5.1

En sylindrisk bøye for registrering av bølgehøyder flyter i sjøen. Den har en masse lik 800 kg som har blitt fordelt slik at bøyen holder seg stabilt i opprett stilling. Diameter: 0,6 m. Tetthet lik 1025 kg/m³.

a) Beregn hvor dypt bøyen flyter under statiske forhold

b) Beregn egenperioden for bøyens frie, vertikale bevegelser (hiv) når den ligger og "dupper" etter passering av en enkeltbølge.

Oppgave 5.2

En halvt nedsenkbar plattform for leteboring er utført som vist i figur på side 2-24. Mellom pongtongene og dekket er det 6 rørsøyler med diameter 9 m. Plattformen har en total masse på 29000 tonn. I tillegg kommer en hydrodynamisk masse som for hiv kan settes til 12 000 tonn.

a) Beregn egenperioden for frie, vertikale svingninger (hivbevegelser)

Oppgave 5.3

a) Vis at den vanlige ligningen for beregning av svingningers egenperiode $T_E = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{m/k}$ kan omskrives til følgende ligning for flytende legemers frie, vertikale svingninger i vannet (hiv):

$$T_E = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m}{A_{vl} \cdot \rho \cdot g}}$$

b) Det vises til utskrift fra dataprogrammet "Freeship" på side 2-17 for et skip med volumdeplasement 4407 m³ i saltvann. Vannlinjearealet for dette skipet er beregnet til 1314 m². Bestem egenperioden for frie, vertikale svingninger for skipet (hiv-bevegelser)

Oppgave 5.4

En bunnramme med masse 12 tonn skal løftes fra en lekter før den installeres på havbunnen. I en periode blir den da hengende i en stålkabel med opprinnelig lengde 20 m og diameter 25 mm. Stålet har en elastisitetsmodul lik 207 GPa. Les mer om styrkeegenskaper til stål på sidene 4-10/11/12. Beregn:

a) Strekkspenning, tøyning og forlengelse i kabelen.

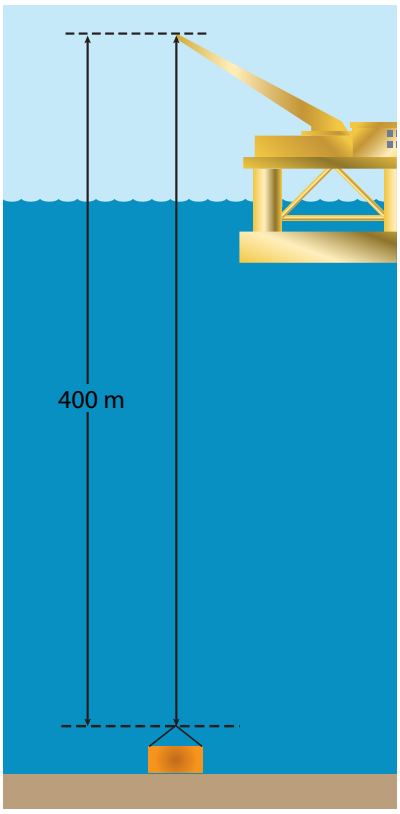
b) "Fjærstivheten" og egenfrekvensen for systemet

Oppgave 5.5

Det vises til oppgave 5.4. Bunnrammen, som altså har en masse på 12 tonn, skal senkes ned til havbunnen med den samme stålkabelen slik at den blir 400 m lang. I denne tilstanden må vi ta hensyn til tre forhold når vi skal beregne krefter og bevegelser:

- Stålkabelen vil bidra med tyngde når vi skal beregne krafta i kabelen
- Oppdrift vil redusere krafta i kabelen, og beregnes på vanlig måte.
- Massen til modulen får et bidrag fra vannet. Dette bidraget kalles "hydrodynamisk masse". I dette eksemplet kan vi anta at denne massen er den samme for vertikal- og horisontalbevegelser og er gitt av massen til fortrengt vannmengde.

a) Beregn statisk kraft i stålkabelens øvre og nedre ende
b) Beregn total masse for modulen,egenperioden og egenfrekvens for modulens vertikalbevegelse. Du skal da ikke ta med massen til kabelen. Volumet av modulen settes til 3 m^3.



Oppgave 5.5
Vi regner med at kabelen i sin helhet henger i vann

Oppgave 5.6
Den generelle formelen for egenperioden for en svingning er som kjent $T_E = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{m/k}$, er stivheten. Fjærkrafta kalles gjerne "tilbakeføringskrafta" og kan beregnes ut fra $F_x = k \cdot s$, der s er utslaget. For en pendel kan vi bestemme stivheten ved å beregne tilbakeføringskrafta for et lite utslag s, se figur til høyre.

Når massen til pendelen er m, må den vertikale komponenten av snorkrafta være $m \cdot g$. Tilbakeføringskrafta F_x må da bli $m \cdot g \cdot t_{ga}$.
For små vinkler vil tangens og sinus til en vinkel være det samme som vinkelen selv i radianer. Vi kan derfor bestemme F_x ved ligninga

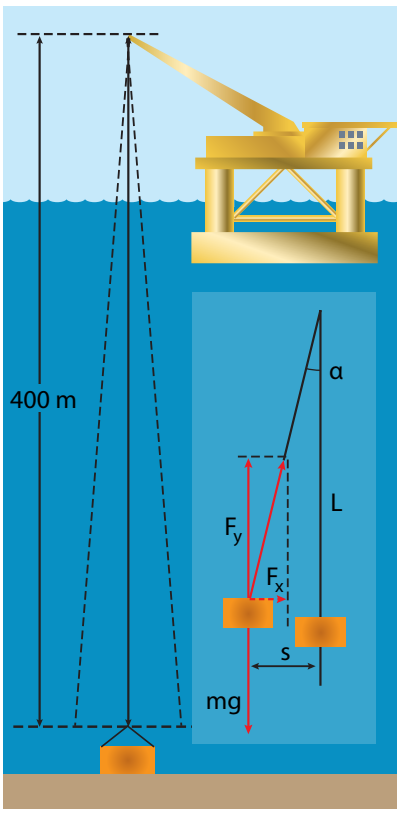
$$F_x = \frac{m \cdot g \cdot s}{L}$$

Dette betyr at stivheten k kan bestemmes som $k = m \cdot g / L$.
Egenperioden blir da

$$TE = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m}{m \cdot g / L}} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{L}{g}} \text{ (luft)}$$

Dette betyr at pendelens egenperiode i luft er bestemt av snoras lengde og tyngdens akselerasjon, men er uavhengig av pendelens masse.

Når pendelen henger i vann, må utledningen av ligninga for egenperioden ta hensyn til at snorkrafta påvirkes av oppdrifta, og at pendelens masse får et bidrag fra hydrodynamisk masse. Da kan du ikke forkorte slik det ble gjort ovenfor.
a) Finn bunnrammens egenperiode for eventuell pendelutslag når den henger i vann og kabelen er 400 m lang



Oppgave 5.6

Oppgave 5.7 (kan kanskje være vanskelig, men tas med for å vise interesserte elever eksempel på anvendelse av matematikk og fysikk)
Du skal finne fram til hvilke løsninger ligning 5.12 har, altså finne fram til hvilke funksjoner, sdyn(t), som passer i ligningen:

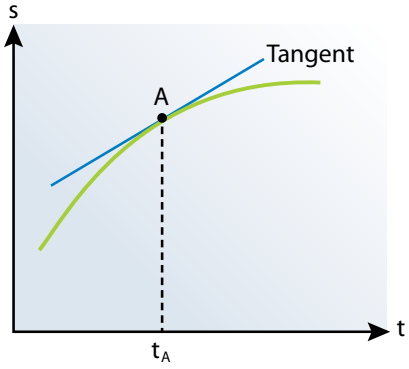
$$-k \cdot s(t) = m \cdot a(t) \qquad (5.12)$$

Her har vi for enkelhets skyld skrevet s(t) i stedet for $s_{dyn}(t)$. Samtidig skal du også påvise at ligning 5.13 for bestemmelse av egenperioden er riktig.

$$TE = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}} \qquad (5.13)$$

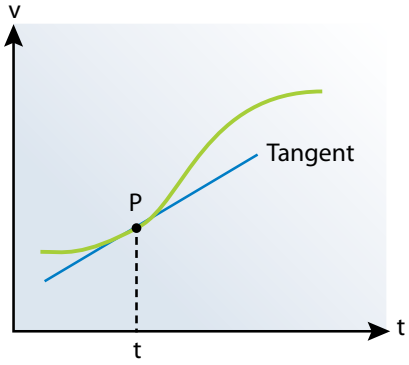
Siden begge deler er "på kanten" av hva som bør tas med av stoff i denne boka, har vi nedenfor beskrevet, trinn for trinn, hvordan du skal gå fram på enkleste måte.

Oppgaver



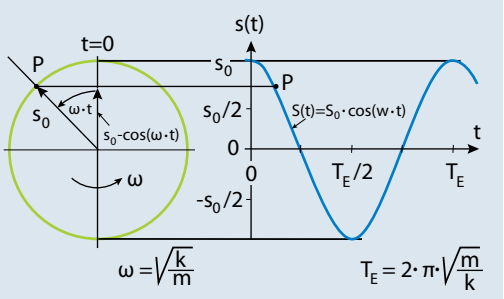
Veigraf for bevegelse der farten varierer. Fra ERGO Fysikk 2
Momentanfarten v ved tidspunktet t_A er lik stigningstallet for tangenten i punkt A. Momentanfarten blir altså:

$$v = \lim_{\Delta t = 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = s'(t)$$



Fartsgraf for en gjenstand med varierende akselerasjon. Fra ERGO Fysikk 2
Akselerasjonen er stigningstallet til tangenten. Momentanakselerasjonen blir:

$$a = \lim_{\Delta t = 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = v'(t) = s''(t)$$



Generering av graf for svingeligning

a) Aller først skal vi repetere fra fysikken (for eksempel fra ERGO Fysikk 2) hvordan vi kan bestemme fart og akselerasjon for en forskyving hvor funksjonen for denne er kjent, se figurer til høyre.

Momentanfart : v = lim ds/dt = s´(t) når dt = 0 (5.24)
Momentanakselerasjon a = lim dv/dt = v`(t) = s´´(t) (5.25)

Vi kan altså finne fart og akselerasjon i et hvilket som helst tidspunkt (t) ved å bestemme henholdsvis den førstederiverte og den andrederiverte av veifunksjonen med hensyn til tiden, og så sette inn aktuelle verdier for t. Vis hvordan dette kan brukes til å omforme (5.12) til følgende form, som ofte kalles svingeligningen:

$$s``(t) + \frac{k}{m} s(t) = 0 \qquad (5.26)$$

b) En slik ligning kaller vi en differensialligning av annen orden. Å løse en slik ligning høres kanskje vanskelig ut. Dette ligger utenfor matematikkpensumet i videregående skoler, men vi kan også bruke sunn fornuft. I dette tilfellet skjønner vi nemlig at funksjonen s(t) må være periodisk og derfor i utgangspunktet være basert på en sinusfunksjon eller en cosinusfunksjon (eller en sum av disse). Ved å derivere to ganger vil nemlig de samme funksjonene da komme tilbake, men da med motsatt fortegn. Dermed skulle det bli mulig at summen av selve funksjonen s(t) og den andrederiverte s``(t) kunne bli lik null, slik som ligning 5.26 krever. Vi prøver oss med følgende funksjon:

$$s(t) = A \cdot \cos(w \cdot t) \qquad (5.27)$$

Du skal nå påvise (ved å derivere to ganger) at følgende verdier passer i hovedligningen 5.26 (husk kjerneregelen):

$A = s_0$ (startforskyvningen, når t settes lik null)
$\omega = \sqrt{k/m}$

Vis ved dimensjonsanalyse at ω må ha dimensjonen 1/s og altså, matematisk sett, må være en vinkelhastighet (radianer/s). Det forutsettes at startfarten v(0) er lik 0. Hvis det ikke er tilfelle, må løsningen (5.27) utvides med et ledd B · sin (ω · t).

c) Påvis at egenperioden for en svingning kan finnes av ligningen

$$T_E = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Hermed har du nå bevist at svingeligningen 5.26 har følgende løsning:

$$s(t) = s_0 \cos \sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t \qquad (5.28)$$

og at egenperioden for en svingning er

$$T_E = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Her er k= fjærstivhet [N/m] og ω = vinkelhastighet [rad/s].

Oppgave 5.8

Det vises til oppgave 5.2 og de data som der er oppgitt for en flytende boreplattform. Vi forutsetter at denne oppgaven allerede er løst. Hvis ikke, må du gjøre det nå. Etter at plattformen har blitt slept fram til et nytt borested, har den kommet i hivsvingninger. Før plattformen er blitt ankret opp på det nye stedet, kan vi betrakte disse som frie, udempede svingninger. Vi setter amplituden lik 1, 0 m ved t = 0.

a) Bestem den vinkelhastigheten w som kan knyttes til svingningene

b) Bestem funksjonen s(t), og tegn opp en graf som viser hvordan utslagene varierer for den første egenperioden

c) Bestem funksjonen v(t), og tegn opp tilhørende graf for hastigheten til svingebevegelsen i denne perioden

d) Bestem funksjonen a(t), og tegn opp grafen for akselerasjonene under svingebevegelsen

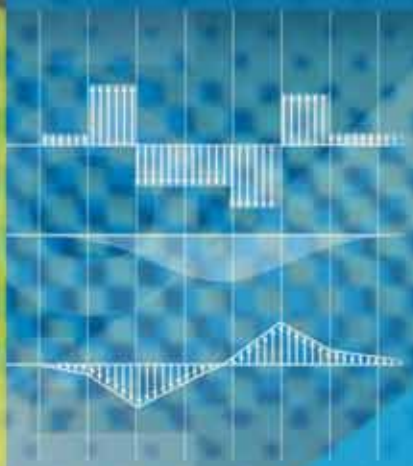
Referanser

5.1 Carl Martin Larsen. Marin dynamikk. Kompendium i fag 4183, Masterprogram i marin teknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, Institutt for marin teknikk. Trondheim, 2012

Forfatter: Jørgen Amdahl

Marine konstruksjoners styrke

Havromsteknologi



Innhold

Innledning....2
Grunnleggende statikk....4
Krefter og momenter....4
Bøyemoment- og skjærkraftdiagrammer....6
Grunnleggende fasthetslære....8
Deformasjoner og spenninger....8
Arealtreghetsmomenter og bøyespenninger....10
Skipet som bjelke. Skrogbjelken....12
Deformasjoner av skrogbjelken – hogging og sagging 14
Sammenbrudd av skipsskrog – eksempler....16
Bøyemomenter og skjærkrefter ved hogging og sagging 18
Skipets konstruksjonsmessige oppbygging....20
Statikk for fagverkskonstruksjoner....22
Fagverksplattformer for petroleumsutvinning til havs 24
Alexander Kielland-katastrofen (Nordsjøtragedien 1980) 26
Sammenstøt mellom skip og plattform....28
Tårnkonstruksjoner for vindkraftverk til havs....30
Oppgaver....32

NTNU
Institutt for marin teknikk

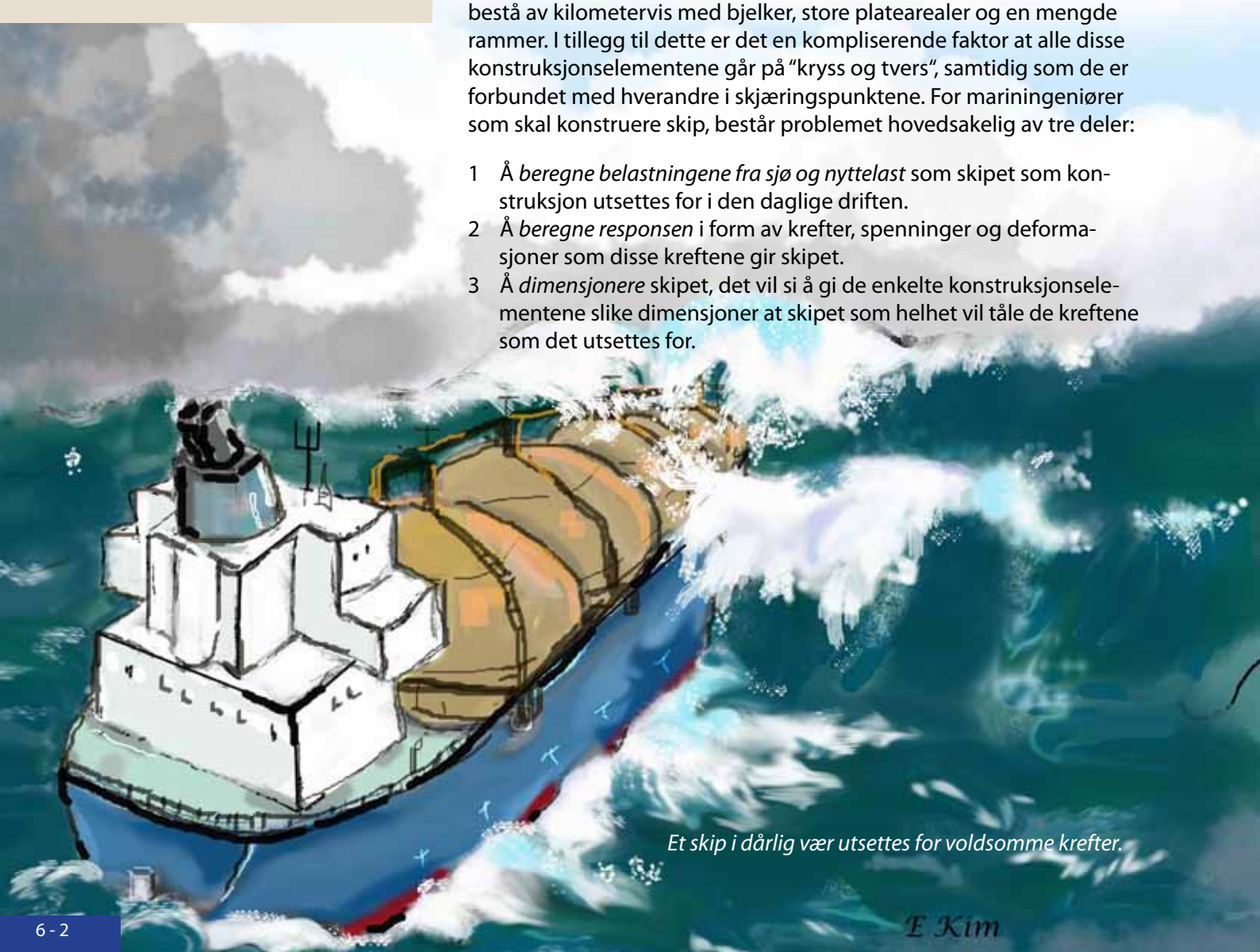
6

Kapitlet handler om marine konstruksjoners styrke. Mange skip har brutt sammen fordi de var konstruert uten tilstrekkelig styrke eller ble lastet slik at styrkemessige påkjenninger ble større enn forutsatt. Også for mange andre havkontruksjoner enn skip er styrkemessig dimensjonering av avgjørende betydning.

Skip utsettes for store påkjenninger. Få som har vært ombord i et skip på sjøen i dårlig vær, vil tvile på at skipet som konstruksjon utsettes for store påkjenninger. I slikt vær treffer bølger skroget, vann fosser over dekk, og skipet reagerer på disse påkjenningene med vibrasjoner og "knirkelyder". Men også når et skip går i stille vann, det vil si i vann der bevegelsene er minimale, vil det utsettes for betydelige krefter, selv om dette er lite merkbart for oss passasjerer. Slike krefter er blant annet hydrostatisk trykk på skipssidene og på bunnen, og gravitasjonskrefter på grunn av skipets masse. Et skip utsettes derfor bestandig for store påkjenninger.

Styrkeberegninger er nødvendige, men vanskelige. Alle skip må konstrueres for å tåle de påkjenningene/kreftene som de møter i den daglige driften. Det er imidlertid en formidabel oppgave å gjøre konstruksjonsmessige beregninger på et skip, en konstruksjon som kan bestå av kilometervis med bjelker, store platearealer og en mengde rammer. I tillegg til dette er det en kompliserende faktor at alle disse konstruksjonselementene går på "kryss og tvers", samtidig som de er forbundet med hverandre i skjæringspunktene. For mariningeniører som skal konstruere skip, består problemet hovedsakelig av tre deler:

1 Å *beregne belastningene fra sjø og nyttelast* som skipet som konstruksjon utsettes for i den daglige driften.
2 Å *beregne responsen* i form av krefter, spenninger og deformasjoner som disse kreftene gir skipet.
3 Å *dimensjonere* skipet, det vil si å gi de enkelte konstruksjonselementene slike dimensjoner at skipet som helhet vil tåle de kreftene som det utsettes for.



Et skip i dårlig vær utsettes for voldsomme krefter.

Marine konstruksjoners styrke

Å beregne belastningene på skip er en utfordring, fordi skipet beveger seg kontinuerlig. Som du selv sikkert har erfart, består ikke havoverflaten av regelmessige sinusformede bølger som kommer pent på rekke og rad etter hverandre. I praksis kommer bølgene i tilsynelatende kaotisk uregelmessighet. Dette betyr at man må studere/analysere bølgenes og responsens statistiske egenskaper.

Vi lager en forenklet modell
Studier av hvordan belastningene virker på de enkelte konstruksjonselementene i skipet, vil falle langt utenfor det som er hensikten med dette kapitlet. Vi må begrense oss til å studere skipet som *en* bjelke. I denne sammenheng skal vi se på to viktige og kritiske konstruktive fenomener for skip, nemlig hogging og sagging. Dette har betydning for hvordan last og andre vekter bør fordeles over skipets lengde. Vi skal kort vise hvordan det er mulig å foreta beregninger av dette. Vi skal videre gi et meget kort innblikk i hvordan et skip er bygget opp fra et konstruktivt synspunkt.

Fagverkskonstruksjoner. På havet og i havrommet finner vi også forskjellige platformkonstruksjoner. I en lærebok om havromsteknologiene hører det naturlig med å komme litt inn på styrkemessige forhold ved disse.

MÅL

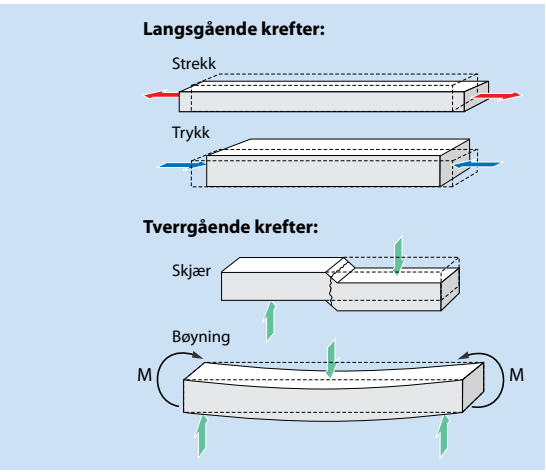
Etter å ha studert dette kapitlet skal du:

- Ha blitt godt kjent med grunnleggende begreper fra statikken og fasthetslæren, for eksempel bøyemomenter og skjærkrefter, spenninger og deformasjoner.
- Kunne betrakte skipet som en bjelke som utsettes for deformasjonstypene hogging og sagging og tilhørende bøyespenninger.
- Kunne beregne bøyemomenter og skjærkrefter som påvirker et skip, avhengig av forskjellige måter å laste skipet på.
- Ha fått et kort innblikk i hvordan et skipsskrog konstruksjonsmessig bygges opp for å kunne tåle de belastninger det utsettes for.
- Ha blitt kjent med oppbyggingen av fagverk for plattformer og andre havkonstruksjoner

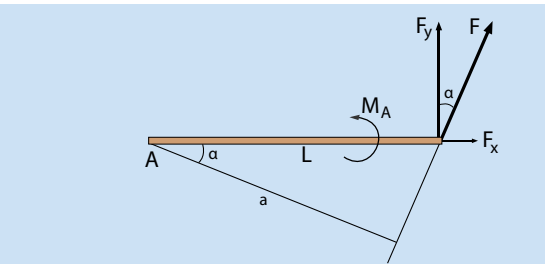
Undringsoppgave:

Er det noen forskjell mellom begrepene skipskonstruksjon og skipsdesign?

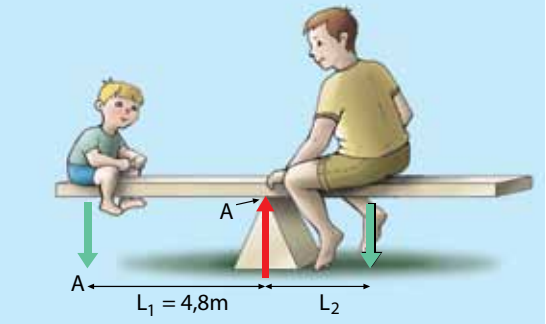
Grunnleggende statikk. Påkjenninger fra krefter og momenter

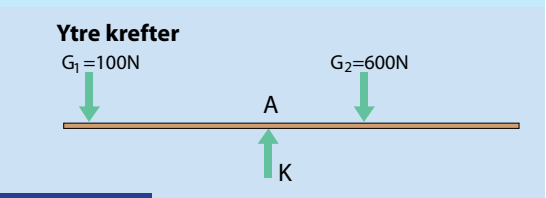


Typer ytre kraftpåkjenninger på en bjelke
Figuren illustrerer også hvilke deformasjoner som kreftene gir Skip utsettes særlig for tvers-gående krefter. Disse skriver seg fra oppdriften og fra tyngder av skipskontruksjonen og lastene



Definisjon av bøyemoment
Bøyemomentet om punkt A kan defineres på to måter:
1) $M_A = F \cdot a$
2) $M_A = F_y \cdot L = F \cdot \cos\alpha \cdot L$
Strekkraft i bjelken: $F_x = F \cdot a$





De typer krefter som kan påkjenne et legeme, inndeles gjerne som vist på figur til venstre. Svært ofte er det bjelker eller lignende legemer (f.eks skip) som skal analyseres og det er da hensiktsmessig å skille mellom langsgående og tversgående krefter (i x- og y-retninger). Eventuelle skråttstilte krefter kan enkelt dekomponeres i disse hoved-retningene. Som figuren viser, snakker vi altså om fire hovedtyper kraftpåkjenninger, og vi skal se nærmere på disse.

Strekkrefter og trykkrefter

Slike kraftpåkjenninger beskrevet i kapittel 4 og det vises til side 4-10.

Ytre bøyekrefter og bøyemomenter

Definisjon. Vi har tidligere benyttet begrepet moment flere ganger for å beskrive at krefter kan ha en **dreievirkning** på legemer. Se sidene 2-12 og 3-24. Forutsetningen var at kraften måtte ha en arm å virke på i forhold til omdreiningsaksen. Sammen med dreievirkningen kan et dreiemoment også *deformere* legemet, i form av vridning (torsjon).

Momenter er også av betydning når krefter **bøyer på** et legeme i stedet for å vri på det. Vi snakker da om bøyemomenter. Også slike momenter defineres som tidligere ved å multiplisere kraften med en arm. Fortsatt defineres armen som den vinkelrette avstand mellom kraftens retning og det punktet vi skal ta momentet om. Som det framgår av figur, kan vi da skrive

Bøyemoment om punkt A: $M_A = F \cdot a = F_y \cdot L$

Er det en horisontal avstand som oppgis som arm, er det altså kraftens vertikale komponent, $F_y = F \cdot \cos\alpha$, som gir bøyemoment. Den horisontale kraftkomponenten, $F_x = F \cdot \sin\alpha$; vil utsette bjelken for en ren strekkraft.

Eksempel 6.1 Ytre bøyemomenter og krefter på vippehuske.
Det vises til figur. En voksen person med tyngde G2 må sette seg nærmere vippepunktet enn et barn med tyngde G1. Beregn riktig arm og kraften som virker på planken i vippepunktet.

Momentlikevekt om vippepunktet A gir:

$$G_1 \cdot L_1 = G_2 \cdot L_2$$

og dermed

$$L_2 = L_1 \cdot G_1/G_2 = 0{,}8 \text{ m}$$

Kraftlikevekt i vertikalretning gir:

$$K = G_1 + G_2 = 100 \text{ N} + 600 \text{ N} = 700 \text{ N}$$

Eksempel 6.2 Ytre bøyemomenter og krefter på broplanke. Opplagerkreftene ved A og B skal beregnes. Dette gjøres ved å bruke Newtons 1. lov både på krefter og momenter. Kraftlikevekt og momentlikevekt (om punkt A) gir da følgende ligninger:

$$K_A + K_B = G = 600\ N$$

$$600\ N \cdot 2{,}0\ m = K_B \cdot 6{,}0\ m$$

med $K_A = 400\ N$ og $K_B = 200\ N$ som løsninger. Vi ser at opplagerkraften nærmest gutten blir størst, dette er generelt tilfelle: Kreftene går helst "korteste" vei.

Likevektsbetingelser for et legeme som er i ro eller beveger seg med konstant hastighet. Det er vel kjent fra fysikken at Newtons 1. lov da må gjelde for de ytre krefter som virker på legemet. Algebraisk sum av kreftene må være lik null i alle retninger. I følge eksemplene ovenfor må vi imidlertid også bruke en slik likevektsbetingelse på de *momenter* som kreftene utsetter legemet for. Sum av kreftenes momenter om et hvilket som helst punkt må være lik null. Vi forutsetter da at det velges forskjellige fortegn avhengig om momentene forsøker å dreie legemet med eller mot urviseren.

Hovedbetingelsene for de ytre krefter og momenter som virker på et legeme som er i ro (eller beveger seg med konstant fart), kan på matematisk form skrives slik:

$$\Sigma F = 0 \quad \text{(gjelder i i en hvilken som helst retning)}$$

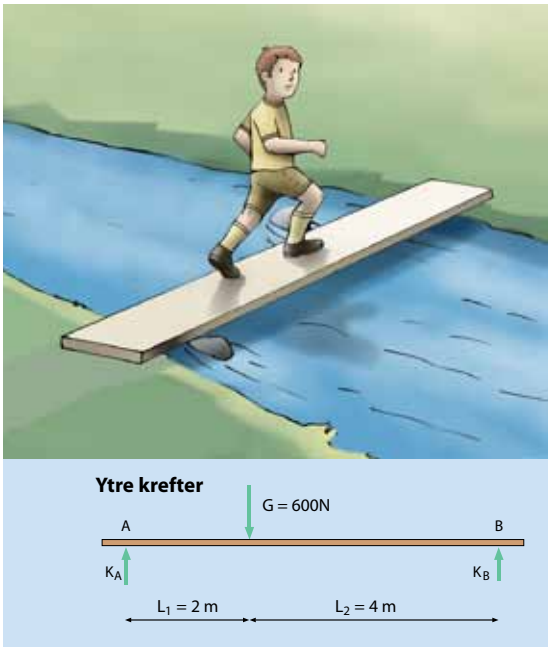
$$\Sigma M = 0 \quad \text{(gjelder om et hvilket som helst punkt)}$$

I begge tilfelle må det regnes med fortegn (altså algebraisk). Vanligvis defineres vertikale krefter som positive når de virker oppover langs y-aksen. Ytre momenter velges som positive når de vrir med urviseren.

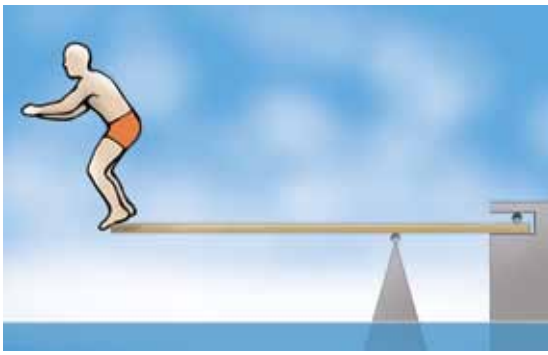
Skjærkrefter

Det vises til figuren øverst på venstre side. Tversgående krefter karakteriseres ved at de, i tillegg til å utsette bjelken for bøyning, også utsetter den for tendens til **avskjæring**.

Med skjærkrefter som virker i et bjelkesnitt, mener vi "skjærvirkningen" fra resultanten av alle tversgående (vinkelrette) krefter som ligger til venstre for bjelkesnittet. Resultanten bestemmes av de samme krefter som utsetter bjelken for bøyemomenter. Skjærkrefter følger den samme fortegnsregelen som er nevnt ovenfor for vertikale krefter, altså positive når de virker oppover. Det forutsettes at avstanden til snitt x er regnet fra bjelkens venstre endepunkt. Vanligvis er påkjenningen fra bøyning farligere for en bjelke enn avskjæringstendensen.



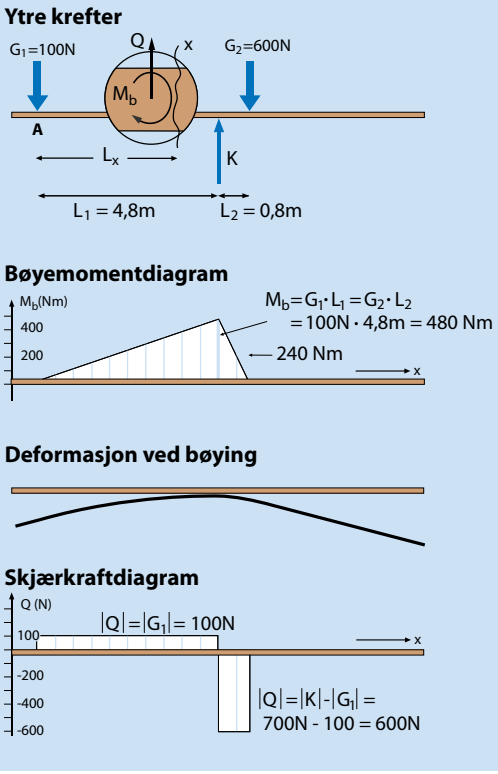
Ytre krefter på broplanke
Gutten har en tyngde lik 600N og befinner seg 2 m ute på planken.



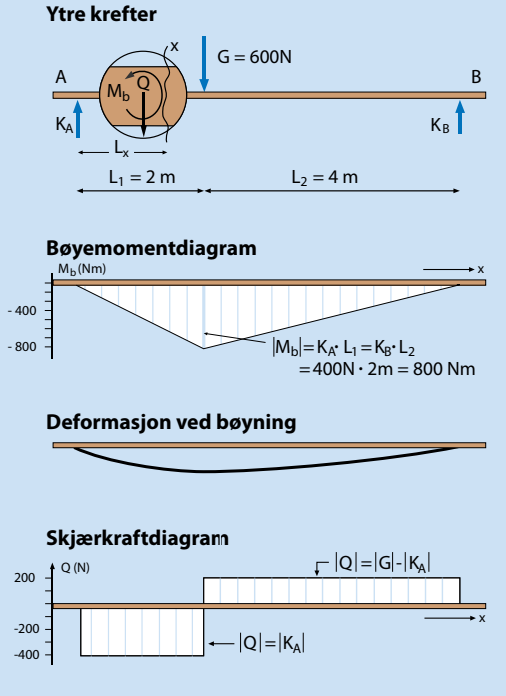
Undringsoppgave:

Hvilke krefter virker på stupebrettet til ovenfor? Hvor store er hver av kreftene? Hvilke retninger har de?

Grunnleggende statikk. Bøyemomentdiagrammer og skjærkraftdiagrammer.



Påkjenninger på vippehuske



Påkjenninger på broplanke

De ytre kreftene som virker på en bjelke, gir indre påkjenninger, nemlig bøyemomenter og skjærkrefter som varierer langs bjelken. Disse resulterer i spenninger og deformasjoner. For å kunne vurdere hvor farlige spenningene og deformasjonene er, må vi få kartlagt variasjonen av både bøyemomenter og skjærkrefter langs bjelken, slik at det framgår hvor maksimalverdiene opptrer og hvor store de er. Opptegning av bøyemomentdiagrammer og skjærkraftdiagrammer er da nødvendige hjelpemidler.

Bestemmelse av bøyemomentdiagram og skjærkraftdiagram

Vi fortsetter med de samme eksemplene som er gitt på sidene foran.

Eksempel 6.3 Bøyemomentdiagram og skjærkraftdiagram for vippehuske. Det vises til figurene til venstre. De ytre kreftene utsetter bjelken for indre bøyemomenter. Det skal kartlegges hvordan disse varierer som funksjon av avstanden L_x fra punkt A. Vi kan da tenke oss at vi skjærer av bjelken i snitt x. For at den venstre bjelkedelen likevel skal være i likevekt, må den utsettes for et indre moment M_b som er like stort som det ytre momentet $G_1 \cdot L_x$ om snittet og *motsatt rettet*. Dette tenkte, "påsatte" momentet er tegnet inn på bjelkefiguren. Vi ser at det må være positivt i følge definisjonen som er gitt foran. Det er variasjonen av dette indre bøyemomentet i forskjellige snitt langs bjelken vi skal illustrere i bøyemomentdiagrammet. Vi skjønner at dette må variere lineært med x langs bjelken fram til vippepunktet. I snitt som ligger til høyre for dette, må vi ta hensyn også til kraften som påvirker bjelken fra selve opplagerpunktet. For eksempel i et snitt som ligger 0,4 m fra vippepunktet (og 5,2 m fra A),vil de ytre kreftene gi følgende moment om snittet:

$$M_b = -(100\ \text{N} \cdot 5{,}2\ \text{m}) + (700\ \text{N} \cdot 0{,}4\ \text{m}) = \div 240\ \text{Nm}$$

I snittet må det derfor virke et *indre* bøyemoment lik +240 Nm som holder likevekt med det ytre momentet. Dette kontrollpunktet gir dermed en lineær graf rettet ned mot null i høyre endepunkt.

Når vi skal kartlegge skjærkreftene som virker på bjelken, tenker vi på samme måte. For at den i tankene frilagte, venstre delen skal forbli i likevekt, må også summen av *kreftene* være null. Den må derfor "påsettes" en kraft Q som vist på figuren. Denne indre kraften kaller vi skjærkraft. Vi skjønner at den må være like stor som G_1 og motsatt rettet. I følge fortegnsregelen foran, blir den positiv og kan altså illustreres som vist i skjærkraftdiagrammet i figuren. I snitt som legges i den høyre del av bjelken, må det "påsettes" en skjærkraft lik ÷600N.

Eksempel 6.4 Bøyemomentdiagram og skjærkraftdiagram for broplanke. Beregnes i oppg. 6.6, med resultat som vist i figur til venstre

Fordelte krefter/laster

Hittil har vi bare sett på tilfeller hvor belastningene på bjelkene skriver seg fra enkeltkrefter, det vil si krefter som virker på ett punkt eller på svært begrensede flater. Krefter kan imidlertid også opptre med mer eller mindre jevn *fordeling* over større flater. Oppdrift er godt eksempel på en slik jevn fordelt belastning. Et annet eksempel er tyngder, som ofte opptas på større flater og ikke i et punkt. Begge deler er meget aktuelle belastningsformer for marine konstruksjoner. Derfor skal vi nedenfor ta for oss et par eksempler på hvordan bøyemoment-diagrammer og skjærkraftdiagrammer kan bestemmes når jevnt fordelte laster opptrer sammen med enkeltlaster.

Eksempel 6.5 Bøyemoment- og skjærkraftdiagram fra kombinasjon av enkeltlast og jevnt fordelt last. Vi skal ta for oss Geirs flåte fra side 2-11 nok en gang. For enkelhets skyld forutsetter vi at Geirs tyngde virker i et punkt midt på flåten og at vi kan se bort fra den lille tyngden av selve flåten. Først fastlegges den ytre kraftbelastningen. Denne må bli som vist på figur til høyre. Oppdriften virker jevnt fordelt på hele bunnen. Den må være lik Geirs tyngde og kan uttrykkes pr. lengdeenhet av flåten slik:

$$q = G/L = 53\ kg \cdot 9{,}8\ m/s^2 / 1{,}2\ m = 520\ N / 1{,}2\ m = 433\ N/m$$

Indre bøyemomenter beregnes for snitt som ligger i avstandene B, C, D, E og F fra punkt A. Nedenfor er vist bergningen for snittet gjennom C, som ligger 0,4 m fra A. For at den delen av flåten som dermed frilegges, fortsatt skal være i likevekt, må den påvirkes av et negativt, indre bøyemoment i punkt C. Dette momentet må ha tallverdi lik

$$M_b = \text{kraft x arm} = q \cdot x_C \cdot x_C/2 = 433\ N/m \cdot 0{,}4\ m \cdot 0{,}4m/2 = 35\ Nm$$

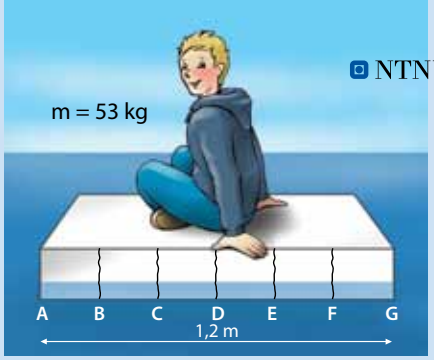
Dette punktet avsettes som markert i bøyemomentdiagrammet, sammen verdier fra tilsvarende beregninger for de øvrige punktene: A: 0, B: -9 Nm, D: -78 Nm, E: -35 Nm, F: -9 Nm, G: 0).
Det vises til oppg. 6.7, hvor du bes kontrollberegne disse verdiene.

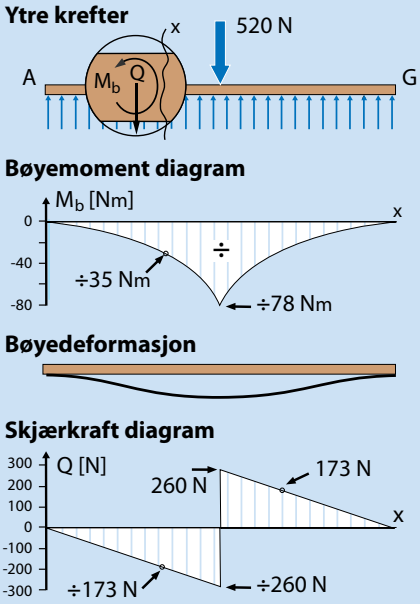
Sum ytre krefter som virker på bjelken til venstre for snitt C, vil være lik $q_C \cdot x_C = 433\ N/m \cdot 0{,}4\ m = 173\ N$ (positiv). Indre skjærkraft som balanserer med denne, må derfor være -173 N. Vi innser at skjærkraften må variere lineært fra 0 til $-433\ N/m \cdot 0{,}6m = -260\ N$ i punkt D. I for eksempel snitt E blir ytre krefter lik -520 N + 433 N/m*0,8 m = -173 N. Balanserende skjærkraft må da være +173 N. Skjærkraften avtar lineært fra maksimalverdien i punkt D til null i punkt G. Legg merke til at spranget i skjærkraft der Geir sitter, er lik Geirs tyngde.

Eksempel 6.6 Bøyemoment- og skjærkraftdiagram for kombinasjon av to enkeltlaster og jevnt fordelt last. Det vises til figurer nederst til høyre. Geir har med seg lillebroren sin på tur. For at flåten fortsatt skal ha riktig trim (ligge horisontalt i vannet), har han plassert seg litt lenger bak enn i forrige eksempel. Bestemmelse av M_b- og Q-diagrammer foretas i prinsippet på samme måte som ovenfor og nødvendige beregninger forutsettes gjennomført i oppgave 6.9. Resultatene av disse er presentert i figurene til høyre. Vi ser at absoluttverdien av maksimalt bøyemoment avtar fra 78 Nm til 68 Nm, mens maksimal skjærkraft øker fra 260 N til 271 N.

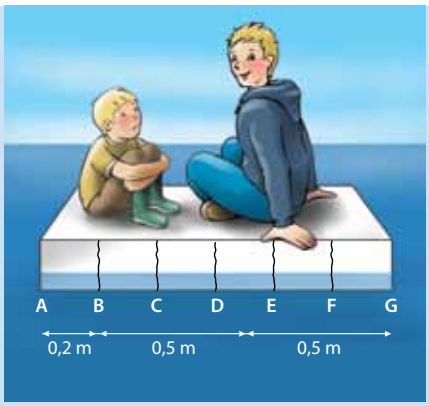
Undringsoppgave:

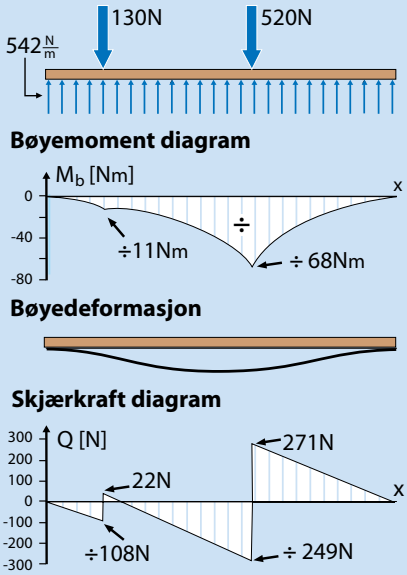
Hva er egentlig grunnen til at maksimalt bøyemoment på flåten avtar på tross av at det tas om bord en ekstra last?





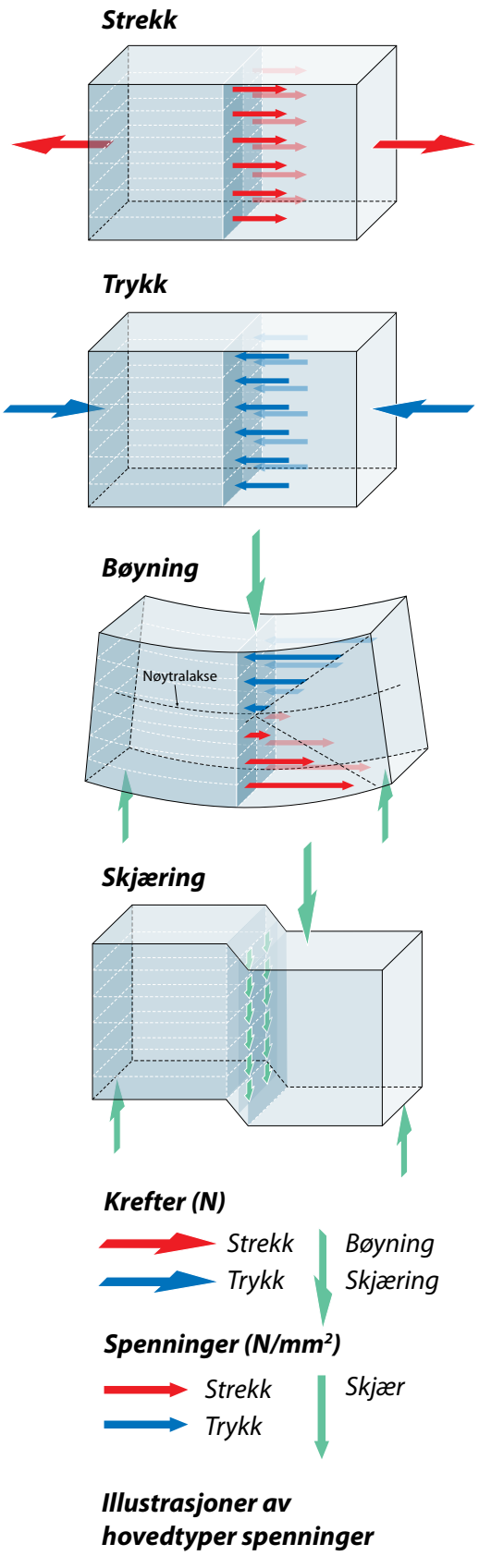
Påkjenninger på flåte





Påkjenninger på flåte med ekstralast

Grunnleggende fasthetslære. Deformasjoner og spenninger



Illustrasjoner av hovedtyper spenninger

Når et legeme utsettes for ytre krefter, for eksempel laster og opplagerkrefter, vil det i legemet oppstå *indre* påkjenninger. Disse kan i verste fall resultere i at legemet bryter fullstendig sammen. *Fasthetslæren* handler om hvordan vi kan undersøke nærmere farene ved disse påkjenningene og dimensjonere legemet slik at det oppnås en ønsket sikkerhet mot brudd. De indre påkjenningene som først og fremst blir vurdert i slike sammenhenger, er de *deformasjoner* og *spenninger* som de ytre kreftene resulterer i. Begge disse typer indre påkjenninger er meget viktige i en rekke sammenhenger. Vi må derfor gi en viss "smakebit" av disse temaene, men detaljert behandling hører først hjemme i eventuelle senere teknologiske studier.

Deformasjoner

De forskjellige typer kraftpåkjenninger som ble omtalt på side 6-4, gir ulike deformasjoner av legemer. Disse illustreres pånytt til venstre.

Forlengelse og sammentrykking. Slike deformasjoner forårsakes av strekk- og trykkrefter som virker på legemet og er behandlet nærmere i kapittel 4 (se side 4-10 og videre).

Bøyedeformasjon. Dette er en type deformasjon som blir resultatet når et legeme utsettes for bøyemomenter. Bøyedeformasjoner er vist i alle figurene på sidene foran. Hvis de gitte fortegnsreglene for bøyemomenter følges, vil bjelken bøyes nedover når de indre bøyemomentene er negative. Da vil bjelkens overside være konkav og utsettes for sammentrykking.. Omvendt vil positive indre bøyemomenter bøye bjelken oppover (med konveks overside, som utsettes for forlengelser).

For å kunne vurdere nærmere de bøyedeformasjoner et legeme utsettes for, er det derfor av stor betydning å få fastlagt bøyemomentdiagrammet.

Beregning av størrelsen på nedbøyninger av en bjelke ligger utenfor rammen av denne boken. Disse vil selvsagt være avhengig av bøyemomentenes størrelse og materialegenskaper til bjelken.

Skjærdeformasjoner. Dette er forskyvningsdeformasjoner som oppstår ved at tverrkrefter kan medføre tversgående glidninger i et bjelkesnitt, se skjematisk illustrasjon nederst til venstre. For å kunne vurdere hvor farlige skjærdeformasjonene kan bli, er det viktig å kjenne skjærkraftdiagrammet for hele bjelken.

Spenninger

Med spenninger mener vi generelt kraftpåkjenninger per flateenhet av en snittflate i for eksempel en bjelke.

Strekk- og trykkspenninger. Disse spenningstypene er allerede behandlet i kapitlet om materialteknologi og det vises til sidene 4-10 og videre. For oversiktens skyld er strekk- og trykkspenninger også illustrert øverst på forrige side, og vi gjentar at *spenninger fra en strekk- eller trykkraft (F) beregnes som: $\sigma = F/A$ [N/m^2 = Pa]*. Her er A tverrsnittsarealet til legemet. Denne spenningen er konstant over tverrsnittet. Den har samme enhet som sjøtrykket mot et skips sider eller bunn.

Bøyespenninger. Vi ser på den bjelken som er vist på figur på venstre side og tenker oss at bjelken er satt sammen av langsgående fibre. Når bjelken bøyes som vist, vil de fibrene som ligger på undersiden forlenges. Her oppstår det derfor strekkspenninger. Fibrene på oversiden vil derimot forkortes, slik at det her blir trykkspenninger. Ved nøytralaksen, som går gjennom tverrsnittets tyngdepunkt, og som her befinner seg på midten av bjelkehøyden, vil det bli en overgang mellom strekk og trykk og dermed ingen deformasjon.

Strekk- og trykkspenninger som oppstår ved at tverrkrefter gir bøyning av en bjelke, kaller vi bøyespenninger. Som antydet i figur til høyre og utledet i oppg. 6.10, kan de uttrykkes som

$$\sigma_{b,maks} = \frac{M_b}{I} \cdot \frac{h}{2} \qquad [\frac{N}{m^2} = Pa]$$

hvor

M_b = bøyemomentet (Nm) i aktuelt snitt

I = arealtreghetsmomentet for bjelkens tvrrrsnitt (m^4). For rektangulært tverrsnitt er $I = bh^3/12$

h/2 = avstanden fra punktet med null bøyespenning (nøytralaksen til tverrsnittet) til overflaten hvor maksimale trykk- eller strekkspenninger opptrer. Spenningene (σ_t eller σ_s) ved andre avstander (z) fra nøytralaksen finnes ved å erstatte h/2 med z

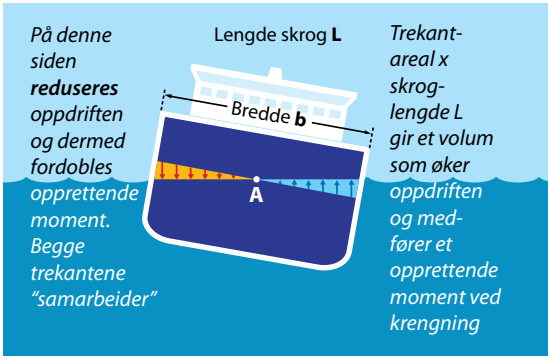
Dette er en meget viktig ligning i fasthetslæren. For "spesielt interesserte" vises til ytterligere omtale på neste to sider, med blant annet eksempler på beregninger. Det vises også til blant annet oppg. 6.10.

Skjærspenninger. Slike spenninger skriver seg fra tversgående krefter (symbolisert med Q) og karakteriseres ved at de virker *parallelt* med snittflaten. De er derfor av en helt annen karakter enn strekk- og trykkspenninger, som jo virker normalt på snittflaten og som dermed med et samlenavn kalles normalspenninger. Også *skjærspenninger angis som kraft pr. flateenhet: $\tau = Q/A$.* Det er begrenset hvor stor skjærspenning de ulike materialer tåler. Blir en skjærspenning for høy, resulterer den i et avskjæringsbrudd. Skjærspenninger kan også kalles *skyvningsspenninger* og er egentlig friksjonskrefter som oppstår i en snittflate når en bjelkedel får en tendens til å forskyves eller gli i forhold til en annen.

Vi undrer oss på:

Hvorfor inngår ordet "treghet" i begrepet arealtreghetsmoment?

Krengning av fartøy ligner matematisk på bøyning av bjelke

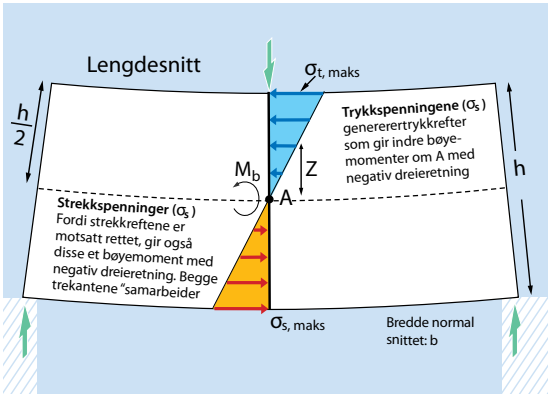


På side 2 - 14 er det påvist at opprettende moment om A blir:

$$M_A = \frac{L \cdot b^3}{12} \rho \cdot g \cdot tan\alpha = I \cdot \rho \cdot g \cdot tan\alpha$$

Størrelsen $I = L \cdot b^3/12$ kalles arealtreghetsmomentet og gjelder når vannlinjearealet som fortrenges av fartøyet er rektangulært. α er krengningsvinkelen

Bøyning av bjelke



Matematisk er krengning av fartøy og bøyning av bjelke like. Det skisserte utgangspunktet leder fram til følgende ligning for en bjelkes indre bøyemoment:

$$M_{bA} = \frac{bh^3}{12} \cdot \frac{\sigma_{b,maks}}{h/2} = I \cdot \frac{\sigma_{b,maks}}{h/2}$$

Denne ligningen er bygget opp på samme måten som ligningen for opprettede moment i et krengende fartøy. Interesserte kan løse oppgave 6.10 for å se detaljer i utledningen.

Arealtreghetsmoment (I) er en sentral størrelse i beregning både av stabilitet for skip og bøyning av bjelker

Grunnleggende fasthetslære. Arealtreghetsmomenter og bøyespenninger

Bøyespenningsligninger: Fasthetslærens viktigste ligning

Fordi bøyespenninger normalt utgjør den alvorligste respons som utløses av ytre belastninger både i skipskonstruksjoner og generelt i konstruksjonsteknikken, er det mange som mener at det er god dekning for overskriften ovenfor. Det er derfor på sin plass å gi noen eksempler på bruk av denne viktige ligningen. Som nevnt foran, uttrykker ligningen hvordan strekk- og trykkspenninger vokser fra null ved nøytralaksen til maksimumsverdier på bjelkens overflater. Avstanden fra nøytralaksen er da h/2. Normalt er det først og fremst de maksimale bøyespenningene vi er interessert i å beregne. I så fall kan man gjøre det ved hjelp av følgende, innkortede, form på den viktige "bøyespenningsligningen":

$$\sigma_{b,\,max} = \frac{M_b}{W}$$

Den nye størrelsen W kalles motstandsmoment og blir for et rektangulært tverrsnitt:

$$W = \frac{I}{h/2} = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

Eksempler på beregninger av bøyningsproblemer

Eksempel 6.7 Sammenbrudd av vippehuske. Planken i vippehuska i eksempel 3 er 20 cm bred og 5 cm tykk. Hvor stor er maksimal bøyespenning ved vippepunktet? Planken er av furu, som har en trykkfasthet på 40 MPa. Er det fare for at planken bryter sammen i trykk?

Det framgår av eksempel 6.3, side 6-6 at bøyemomentet ved vippepunktet er 480 Nm. Arealtreghetsmomentet for planketverrsnittet er:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{0{,}2\text{m} \cdot (0{,}05\text{m})^3}{12} = 2{,}083 \cdot 10^{-6}\ \text{m}^4$$

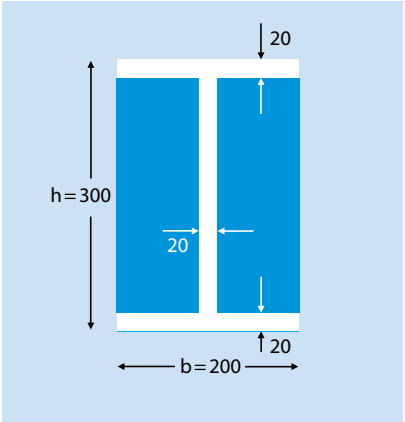
Maksimal spenning får man i strekk (overside) eller trykk (underside) i en avstand lik h/2 = 2,5 cm fra nøytralaksen. Dette gir maksimal trykkspenning lik

$$\sigma_{t,\,max} = \frac{M_b}{I} \cdot \frac{h}{2} = \frac{480\ \text{Nm} \cdot 0{,}025\text{m}}{2{,}083 \cdot 10^{-6}\ \text{m}^4} = 5{,}76 \cdot 10^6\ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \underline{5{,}76\ \text{MPa}}$$

Vi ser at denne bøyespenningen bare utgjør ca. 14 % av de kritiske spenningen, og det er ingen fare for at vippehuska svikter. Den maksimale spenningen kunne vi også funnet direkte ved å bruke ligningen hvor motstandsmomentet inngår.

Eksempel 6.8 Beregning av arealtreghetsmoment for I-profil. Beregn arealtreghetsmomentet for en bjelke med I-formet tverrsnitt som vist til venstre. Svar: Vi kan benytte formelen for rektangulært tverrsnitt ved først å beregne for tverrsnittet som omhyller profilet og deretter trekke fra de to mørkeblå tverrsnittene. Dette gir:

$$I = \frac{200\text{mm} \cdot (300\text{mm})^3}{12} - \frac{2 \cdot 90\text{mm} \cdot (260\text{mm})^3}{12} = 1{,}86 \cdot 10^8\ \text{mm}^4$$



Typisk I-formet tverrsnitt for bjelke. Alle mål i mm.

Eksempel 6.9 Vurdering av ulike tverrsnittsformer med hensyn på areal treghetsmomenter. De tre tverrsnittene til høyre har samme tverrsnittsareal. Hvilket av dem har størst arealtreghetsmoment? Svar: For enkelhets skyld regner vi fortsatt i mm. Arealtreghetsmomentet for tverrsnitt 1 er allerede beregnet i eksempel 6.8. For de to andre går vi fram på sammen måte:

A : $I = 1{,}86 \cdot 10^8\ mm^4$

B : $I = 200\ mm\ (300\ mm)^3/12 - 180mm \cdot (260\ mm)^3/12 = 1{,}86 \cdot 10^8\ mm^4$

C : $I = 200\ mm \cdot (300\ mm)^3/12 - 2 \cdot 95\ mm \cdot (247\ mm)^3/12 = 2{,}11 \cdot 10^8\ mm^4$

Tverrsnitt C har 13 % større arealtreghetsmoment enn tverrsnitt A og B. Større arealtreghetsmoment gir mindre bøyespenning. Det betyr at tverrsnitt C er mest effektivt med hensyn på bøying. Med andre ord:

Det lønner seg å legge mye materiale der bøyespenningen er størst. Dette er typisk for I-bjelker som benyttes i mange bærende konstruksjoner både i marine konstruksjoner og i bygninger.

Tverrsnitt A og B har samme arealtreghetsmoment. Et skip må selvsagt kunne bære last innvendig, og det passer derfor fint at en "hul", rektangulær tverrsnittsform ikke er noe dårligere enn andre former som det er naturlig å sammenligne med.

Bøyning i horisontalplanet

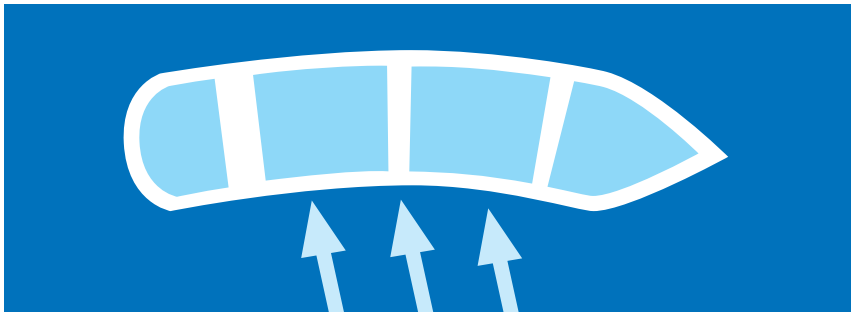
Hittil har vi utelukkende sett på vertikal bøyning av bjelker, det vil si bøyning om en horisontal akse. Men skip som går i bølger, vil også utsettes for horisontale krefter og disse kan resultere i bøyning av skipet i horisontalplanet, se figur nedenfor. Vi sier da at bøyningen skjer om en vertikal akse. Stadig er det et arealtreghetsmoment som bestemmer bøyespenningene, men dette må beregnes noe annerledes. Måten å tenke på blir likedan, men nå må vi bytte om betydningen av bredden og høyden. Dermed blir arealtreghetsmomentet for horisontal bøyning $I = b^3 \cdot h/12$.

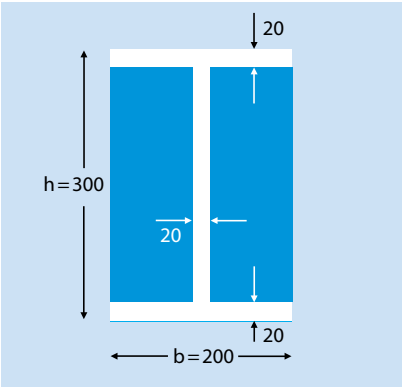
Eksempel 6.10 Vurdering av tverrsnittsformer med hensyn til horisontal bøyning. Hva er arealtreghetsmomentene for tverrsnitt A og B om en vertikal akse?

A : $I = 2 \cdot (200\ mm)^3 \cdot 20\ mm/12 + (20\ mm)^3 \cdot 260mm/12 = 0{,}268 \cdot 10^8\ mm^4$

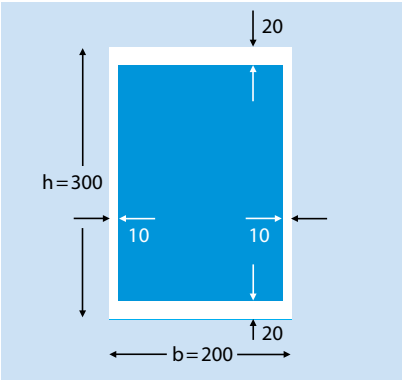
B : $I = (200\ mm)^3 \cdot 300\ mm/12 - (180\ mm)^3 \cdot 260mm/12 = 0{,}736 \cdot 10^8 mm^4$

Tverrsnitt B har 2,75 ganger så stort arealtreghetsmoment for bøyning om vertikal akse. Det er altså gunstig med hensyn til horisontal bøyning. Dette er viktig for et skip som går i bølger, og "kasseformen" er altså positiv også i denne sammenhengen.

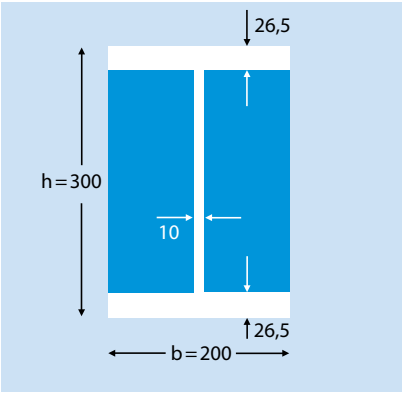




Tverrsnitt A



Tverrsnitt B



Tverrsnitt C

Tverrsnitt former for bjelker. Alle mål i mm.

Vi undrer oss på:

Vi har studert eksempel 6.7. Hvor tynn furuplanke (med bredde 20 cm) er det mulig å bruke i vippehuska uten at den bryter sammen

Skipet som bjelke - skrogbjelken

Skrogbjelken

Få store konstruksjoner er helt stive. Flere hundre meter høye skyskrapere settes i merkbar bevegelse av jordskjelv og sterk vind, selv om de ser aldri så stive ut der de står. Det samme er tilfellet for skip. De kontinuerlig skiftende kreftene som virker på et skip vil skape en ujevn fordeling av påkjenningene over skipets lengde og bredde. Dette gjør at skipet vil bli bøyd. Skip bøyes som en konstruksjonsmessig enhet, i prinsippet akkurat på samme måte som en bjelke som står fast i en vegg og utsettes for ulike krefter. I konstruktiv forstand kan derfor skipet betraktes som en flytende bjelke, kalt for skrogbjelken. Denne utsettes for belastninger fra nyttelasten og egenvekten (gravitasjonskrefter), bølger og hydrostatisk trykk fra den omkringliggende sjøen. Det er vanlig å splitte de totale belastningene opp i en fra stille vann og en fra bølger:

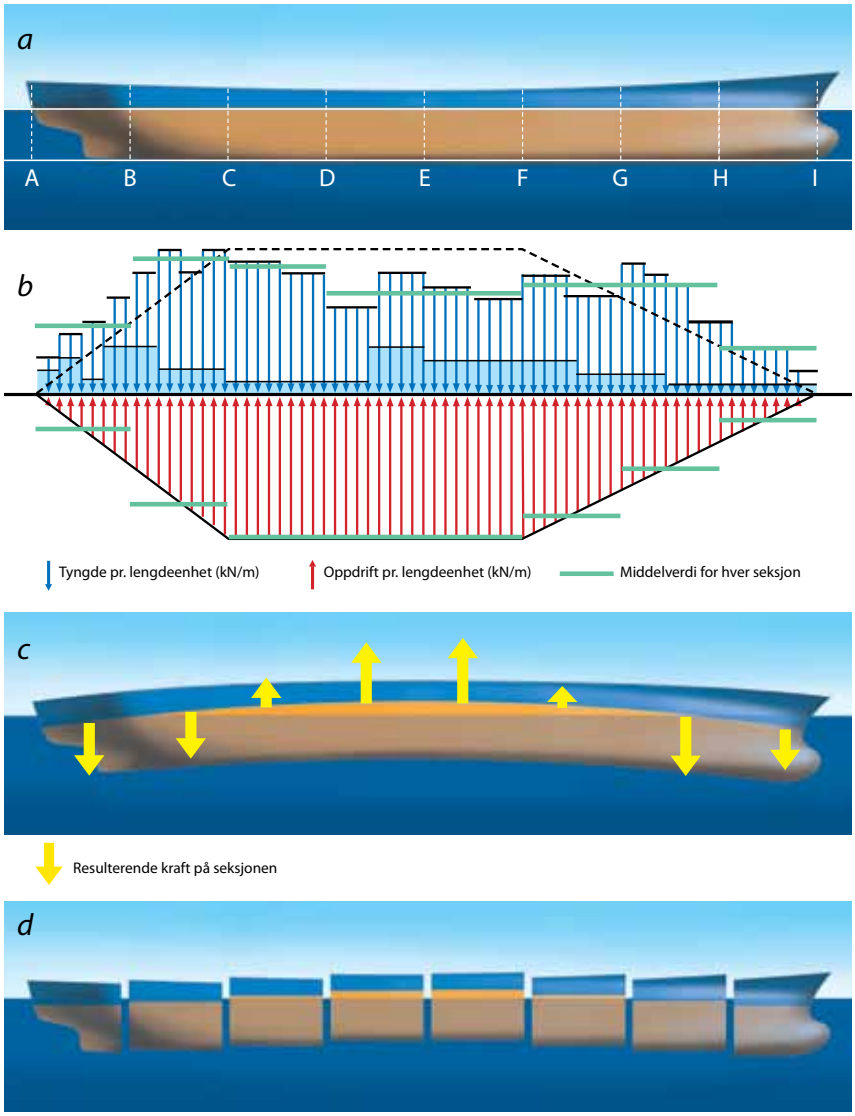
⇨ Totale laster = Stillevannslaster + bølgelaster

Belastninger

Bølgelaster kan vi enkelt forstå hva er ved å tenke på bølger som bærere av energi. For å kunne regne på bølgelaster må man lære mye mer om bølgeteori og differensialligninger enn det som er naturlig i denne boka. Derfor vil vi her konsentrere oss om stillevannslaster. Bølgelastene utgjør vanligvis ca. 60% av de totale belastningene.

Stillevannslastene er de lastene/kreftene skip er påvirket av når de ligger i vann der bevegelsene er minimale. Stillevannslastene kan deles opp i to typer krefter, henholdsvis gravitasjonskrefter og oppdriftskrefter. Vi vet fra hydrostatikken (se kapittel 2) at oppdriften er avhengig av det vannvolumet som skipet fortrenger. Skip har ikke lik geometrisk form over hele lengden, og det vil derfor være en ujevn fordeling av oppdriftskreftene over skrogbjelken. Der hvor skipet er fyldig, som oftest i området omkring midtspantet, vil oppdriftskreftene per lengdeenhet være store. I baugen og akter, der skipet er relativt slankt, vil ikke oppdriften være så stor. Fordelingen av oppdriften er i praksis avhengig av formen på seksjonsarealskurven (SAK) Se figur b til høyre.

Gravitasjonskreftene, som skyldes skipets masse, vil også vanligvis være ujevnt fordelt over skrogbjelken (skipets lengde). Store og relativt konsentrerte vekter kan for eksempel være maskineriet, propellen og lasten. Det vil imidlertid være store forskjeller fra skip til skip. Figuren til høyre viser grovt hvordan man kan tenke seg at gravitasjonskreftene på grunn av skipets masse (de blå pilene) og oppdriftskreftene (de nederste, røde pilene) er fordelt over skipets lengde. Ved beregning av stillevannsbelastninger ligger skipet i likevekt, det vil si stille og rolig på vannet. Da vil summen av de totale oppdriftskreftene være lik summen av de totale gravitasjonskreftene.



Som en oppsummering kan vi si at den statiske belastningen på skrogbjelken i stille vann fram kommer som en differanse mellom to størrelser, nemlig tyngde og oppdrift. Ved stillevannsbelastninger studerer vi en likevektssituasjon der skipet ligger rolig i vannet. Den totale tyngden og den totale oppdriften til skipet vil da være like store og motsatt rettet, men ujevnt fordelt på langs av skrogbjelken.

Vi undrer oss på:

Hvor stor blir den algebraiske sum av de resulterende krefter som virker på skrogbjelken og som er vist i figur c ?

a. Seksjonsoppdeling.
Skip bygges opp seksjonsvis. Her er det delt opp i 8 seksjoner.

b. Fordelte belastninger (kN/m)
To hovedtyper. Den ene ene er forårsaket av gravitasjonskrefter fra:
• Lettskipsvektene (mørkeblå del)
• Dødvekten (resten av blå pil)
Den andre hovedtypen er oppdriften. Totalt sett må disse balansere med hverandre, det vil si at blått areal må være lik rødt areal på figuren. Grafen som beskriver oppdriften, kalles seksjonsarealkurven (SAK). Figuren viser bare et skjematisk eksempel. I praksis beregnes denne av dataprogrammer, f. eks. "Freeship". V. hj. a. SAK er det mulig å beregne oppdriften av hver enkelt seksjon. Derfor er middellinjer lagt inn med grønt for hver seksjon, både for oppdrift og gravitasjonskreftene. SAK er også markert speilvendt, slik at det framgår tydelig at skipet har "overskudd av" last i forkant og akterkant og "underskudd av" last midtskips.

c. Resulterende krefter på skrogbjelken og deformasjoner av denne *Disse er markert med gult. Resultanten av kreftene på hver seksjon virker oppover på de midterste seksjonene og nedover på ytterste. Disse resultantene deformerer derfor skipet som vist. Slik deformasjon kalles hogging.*

d. "Fri flyt" av seksjonene.
Hvis vi tenker oss at de enkelte seksjoner kunne flyte fritt, ville seksjonene AB og GH fått størst dypgang. Oppdriften ville i så fall øket i forhold til figur c slik at kraftresul-tanten ble null for hver seksjon. Det er skjærkreftene i skroget som forhindrer en slik fri forskyvning mellom seksjonene.

Belastninger og deformasjoner i stille vann når det lastes for mye i forkant og akterkant av et skip (hogging).

Deformasjoner av skrogbjelken – hogging og sagging

Hogging: Assosieres med "hog", engelsk for en svinerase med sterkt krummet rygg. Sagging: Kan assosieres med ungdomsmote.

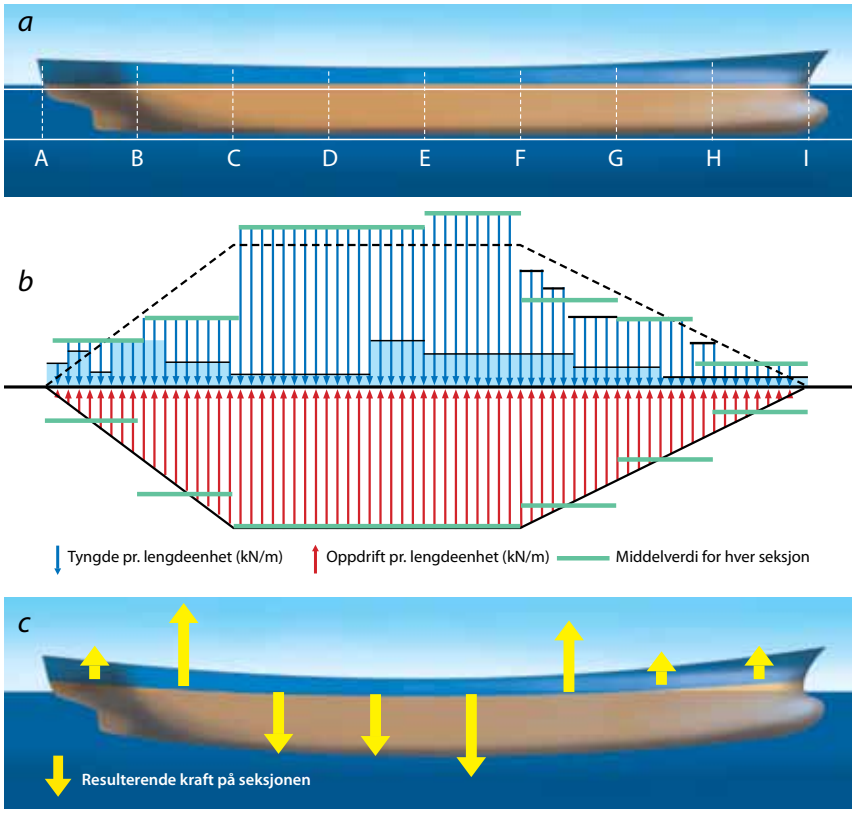
Som vist i figur b på forrige side, vil tyngder og oppdrift bli ujevnt fordelt over en skrogbjelke. Vi skal nå vurdere hvilke deformasjoner dette kan medføre.

Hogging

I den nevnte figuren er grafen for fordelingen av oppdriften speilvendt og lagt inn sammen med fordelingen av tyngdene. Vi ser da tydelig at skipet har større tyngder enn oppdrift på endene og mindre tyngder enn oppdrift midtskips. Skipet er blitt bygget i seksjoner, og figur c viser de totale krefter som virker på hver seksjon (seksjonsvise arealer fra figur b). Resultanten for hver seksjon er markert med gult og framkommer som differensen mellom de seksjonsvise tyngdene (blå piler) og oppdriftene (røde piler). Hvis seksjonene hadde kunnet flyte fritt, ville de fått forskjellig dypgang, som vist i figur d. I virkeligheten er alle seksjonene koblet sammen og vil få samme dypgang når skipet flyter på rett kjøl. Noen seksjoner vil da få sin dypgang redusert, mens andre må øke dypgangen. Det oppstår dermed skjærkrefter mellom seksjonene. Disse gir skjærdeformasjoner i skrogbjelken og resulterer videre også i bøyemomenter og bøyedeformasjoner. Både skjærkreftene og bøyemomentene er illustrert i figurer på side 6-18. Bøyedeformasjonene som oppstår, er vist sterkt overdrevet i figur c foran. **En slik skrogform, som altså skyldes "overskudd" av last i begge endene av et skip, kalles for hogging.**

Sagging

Den motsatte situasjon av hogging kalles for sagging, og denne skyldes altså for mye last midtskips. Skrogbjelken "siger" da ned på midten, som forklart og illustrert i figurene nedenfor.



a. Seksjonsoppdeling.
Skipet er delt opp i 8 seksjoner.

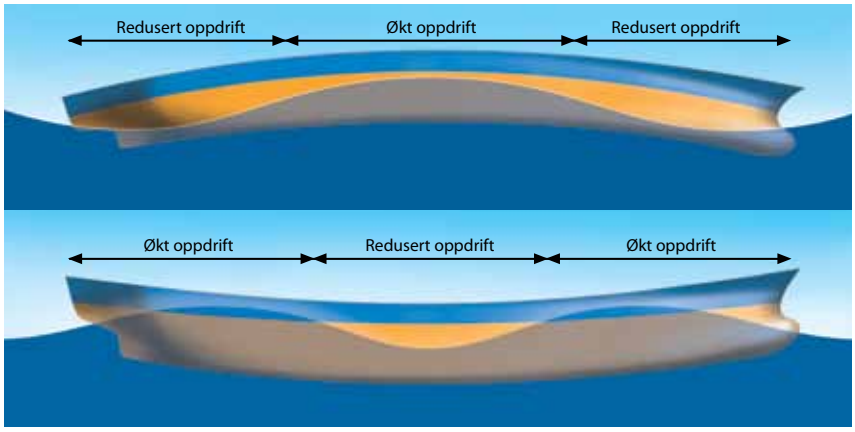
b. Fordelte belastninger
Figuren illustrerer eksempel på fordeling av krefter pr. lengdeenhet av skipet (kN/m), se forklaring til tekst til tilsvarende figur på forrige side. Linjer for midlere belastning for hver enkelt seksjon er markert med grønt både for tyngdebelastningene og oppdriften.

c. Resulterende krefter på skrogbjelken og deformasjoner av denne.
Resulterende krefter pr. lengdeenhet framkommer som differensen mellom de grønne middellinjene for tyngder og oppdrift som virker på de enkelte seksjonene. Resultantene er tegnet inn med gult med valgt plassering i skrogets vannlinjeplan. Kreftene deformerer skrogbjelken, som vist overdrevet.

Belastninger og deformasjoner ved sagging i stille vann, altså når det lastes for mye midtskips og for lite forut og akterut.

Hogging og sagging på bølger

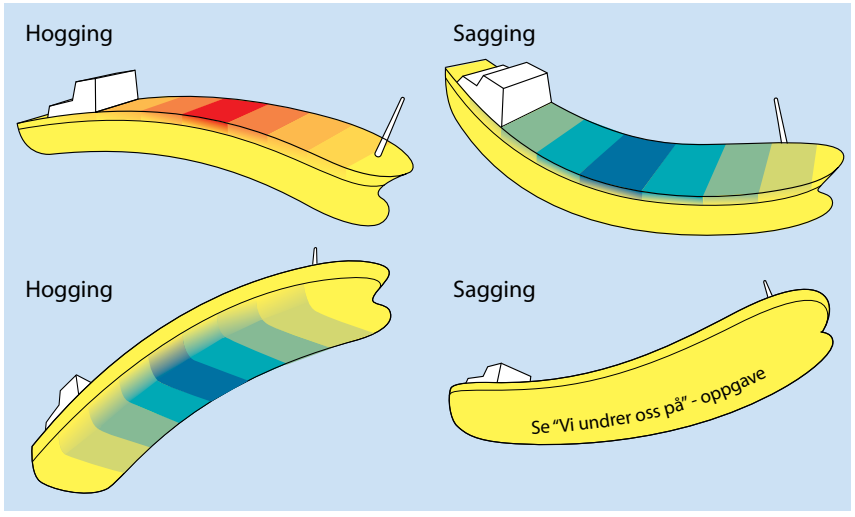
Når et skip beveger seg gjennom en bølge, vil bølgenes form virke inn på skipets oppdrift. Dette skyldes at bølger har topper og bunner, og disse må nødvendigvis også passere skipet. Det er enkelt å innse at en bølge i en posisjon som vist på figuren nedenfor, vil øke oppdriften midtskips og redusere oppdriften på forskipet og akterskipet. Dermed vil skipets hogging bli størst når bølgen er omtrent i den viste posisjon. Tilsvarende vil en bølge som gir en bølgebunn midtskips og bølgetopper ved for- og akterskip, resultere i sagging, se figur. Også den bølgedannelse som skipet selv forårsaker, vil interferere med de bølger det møter og dermed virke inn på hogging og sagging. Det vil imidlertid føre for langt å gå nærmere inn på bølgelaster i denne boka.



Eksempler på at hogging og sagging også kan forårsakes av bølger selv om oppdrift og tyngdebelastninger i stille vann balanserer med hverandre.

Spenninger i skrogbjelken ved hogging og sagging

Foran er vist eksempler på hvordan resulterende krefter fordeler seg langs skrogbjelken ved hogging og sagging. Disse ytre kreftene utsetter skroget for indre bøyemomenter og skjærkrefter og gir dermed både deformasjoner og spenninger. Nedenfor er det forsøkt å vise hvordan bøyespenningene virker på skroget. Disse fordeler seg etter den viktige ligningen $\sigma_b = M_b \cdot z/I$, som er gitt på side 3-9. Her er I arealtreghetsmomentet for det skrogsnittet som skal kontrolleres, og z er avstanden fra nøytralaksen.



Spenningsfordelinger i skrogbjelken ved hogging og sagging. Sammenlign med bøyemomentkurven på sidene 5-18 og 5-19 .

Vi undrer oss på

Nederst til høyre i de fire figurene ovenfor er spenningene ikke blitt illustrert ved hjelp av farger. Fullfør tegningen med riktige fargenyanser.

Sammenbrudd av skipsskrog – eksempler

Sprekkdannelse på grunn av for store strekkspenninger kan enkelt demonstreres ved hjelp av et viskelær. På undersiden dannes det "buler". Dette kan i skipskonstruksjoner opptre før sprekkdannelsene kommer.

Konstruksjonsbrudd

Gjennom historien har det skjedd en rekke episoder hvor skip har brukket i to, enten ved kai under lasting/lossing eller i rom sjø. Slike ulykker er selvsagt svært alvorlige.

Årsaker til sammenbrudd. Ulykkene kommer stort sett av at man ikke har full oversikt over de globale kreftene som virker på skipet. Konstruksjonsbrudd ved kai skjer for eksempel ved at man under lasting eller lossing har latt det utvikle seg store skjevfordelinger av lasten i forhold til oppdriften. Dette kan gi hogging eller sagging i altfor stor grad. Som vi har sett foran, vil hogging medføre strekkspenninger i den øvre delen av skrogbjelken, som i praksis vil si dekket. Ved sagging er det bunnkonstruksjonen som utsettes for de største strekkspenningene.

Blir strekkspenningene for store, kan det oppstå sprekker i materialet. Dermed svekkes konstruksjonen, og situasjonen forverres. Både spenningene og sprekkdannelsene øker ytterligere, og en slik "ond sirkel" kan fort føre til fullstendig sammenbrudd.

En slik prosess kan enkelt demonstreres ved hjelp av et viskelær. Dersom viskelæret bøyes kraftig, vil du se at den overflaten som utsettes for strekkspenninger, etter hvert får økende sprekkdannelser og at disse til slutt fører til sammenbrudd. Det samme kan altså hende med en skrogbjelke. Siden denne er mye stivere enn et viskelær, vil imidlertid sprekkdannelsene eventuelt begynne å opptre allerede ved deformasjoner som er så små at de ikke kan sees med det blotte øye. Brudd ved hurtig forplantning av sprekker utløst av store strekkspenninger forhindres særlig ved å bruke stål med tilstrekkelig stor duktilitet (seighet) og vil normalt være godt kontrollert i dagens skip. Fra den tiden man gikk over fra klinkede til sveisede skip, har man flere eksempler på strekkbrudd på grunn av for dårlig materialkvalitet. Velkjente eksempler er de såkalte Liberty-skip i den 2. verdenskrig, som brakk i to i kaldt, men stille vær.

Sammenbrudd på grunn av for stor hogging
Sammenbrudd av tankskipet "Energy Concentraion" i Rotterdam havn. Her begynte sammenbruddet ved at trykkspenningene i bunnplatene ble for store, slik at disse ble utsatt for knekking (buling).

Eksempler på konstruksjonsbrudd ved hogging og sagging under stillevannsbelastninger

Etter det som er beskrevet ovenfor, er det selvsagt av største viktighet at ledelsen om bord på et skip løpende kontrollerer at skipet lastes eller losses på en korrekt måte. Dette ble for eksempel ikke gjort med et tankskip som brakk i to under lossing av olje, se bilde nedenfor.

Øverst til høyre: *Sammenbrudd pga. altfor stor sagging i bulkskipet "Eurobulker 1" i Athen havn. Årsaken var ujevn fordeling som oppsto under lasting av flere tusen tonn sement. Her var det dekksplatene som ble utsatt for knekkning (buling) pga. for store trykkspenninger.*

Det finnes også flere eksempler på tilsvarende ulykker hvor feil lasting eller lossing har gitt altfor stor *sagging* av skipsskrogene. Et eksempel på dette er vist ovenfor til høyre.

Kontroll av skrogbjelkens styrke

Slike beregninger utføres etter retningslinjer som er utarbeidet av såkalte klasseselskaper. Ethvert skip må godkjennes av et klasseselskap, som kontrollerer alle planlegginger og forhåndsberegninger av skipet følger opp byggeprosessen og foretar ettersyn så lenge skipet er operativt. Et eksempel på et slikt selskap er Det Norske Veritas (DNV), som er et av verdens største.

Retningslinjene forutsetter at styrkeberegningene skal foregå i to hovedtrinn.

- **I det første trinnet må det fastlegges hvilket bøyemoment og hvilken skjærkraft som skal legges til grunn for dimensjoneringen av skrogbjelken.** Her oppgir DNVs regler diverse minimumskrav for stillevannsbelastninger, se neste side (grønn graf), og videre må man også legge til skjærkraft og bøyemoment på grunn av skipets gange i sjø. Forholdet mellom stillevannsbelastninger og bølgebelastninger kan variere fra skip til skip, men som en tommelfingerregel kan en si at bølgebelastningene står for ca. 60% av de totale belastningene. Det vises for øvrig til neste side.

- **I trinn to beregnes bøyespenninger og skjærspenninger.** For begge disse spenningene oppgir DNVs regler øvre grenser, som altså ikke kan overskrides. Bøyespenningen baseres da på ligningen som er oppgitt på side 6 -10. Denne krever beregning av arealtreghetsmoment og motstandsmoment for aktuelle skrog—bjelketverrsnitt, noe som blir for komplisert å ta opp i denne boka. Det henvises imidlertid til en meget forenklet oppgave 6.13. Dersom bøyspenningene er for store, er arealtreghetsmomentet for lite. Da må platetykkelsene i skipets dekk og bunn økes. Skjærspenningene vil derimot generelt være størst i skipets side eller langskipsskott og påvirkes særlig mye av platetykkelsen. Det kan derfor bli nødvendig å øke platetykkelsen i side eller langskipsskott for å redusere skjærspenningene til akseptabelt nivå.

Vi undrer oss på

Hvordan kan vi mer detaljert beskrive den feil som ble begått under lossingen av det tankskipet som er avbildet på side 6-16.

Bøyemomenter og skjærkrefter ved hogging og sagging

a. Fordelte belastninger (kN/m) fra oppdrift og tyngder *på samme skip som vist på side 3-17. Skipet har en lengde Lpp = 240 m og volumdeplasement ∇ =97600 m^3, altså Δ= 980 · 10^3 kN. Skipet er delt opp i 8 seksjoner à 30 m. Skalaen for oppdriftsarealet finnes ved å måle trapeset i mm^2 og sette dette lik tyngdedeplasementet i kN (se oppg. 5.9). Dermed har også arealet for tyngdebelastningene den samme skalaen.*

b. Resulterende totalbelastning pr. seksjon (kN/seksjon)
I figur a er det lagt inn middellinjer (grønne) som markerer middelverdiene pr. seksjon av de fordelte belastningene (kN/m) fra oppdrift og tyngder som virker på seksjonen. Ved utmåling og subtraksjon av arealene under disse middellinjene kan resulterende belastning pr. seksjon fastlegges (se oppg. 6.11). Størrelse og retning av resultantene er markert med gule piler og angitt med tallverdier.

c. Resulterende, fordelt belastning for hver seksjon (kN/m)
Resultantene fordeles jevnt langs hver enkelt seksjon ved å dividere med seksjonslengden (240m/8= 30 m). Slike jevnt fordelte belastninger symboliseres gjerne med q.

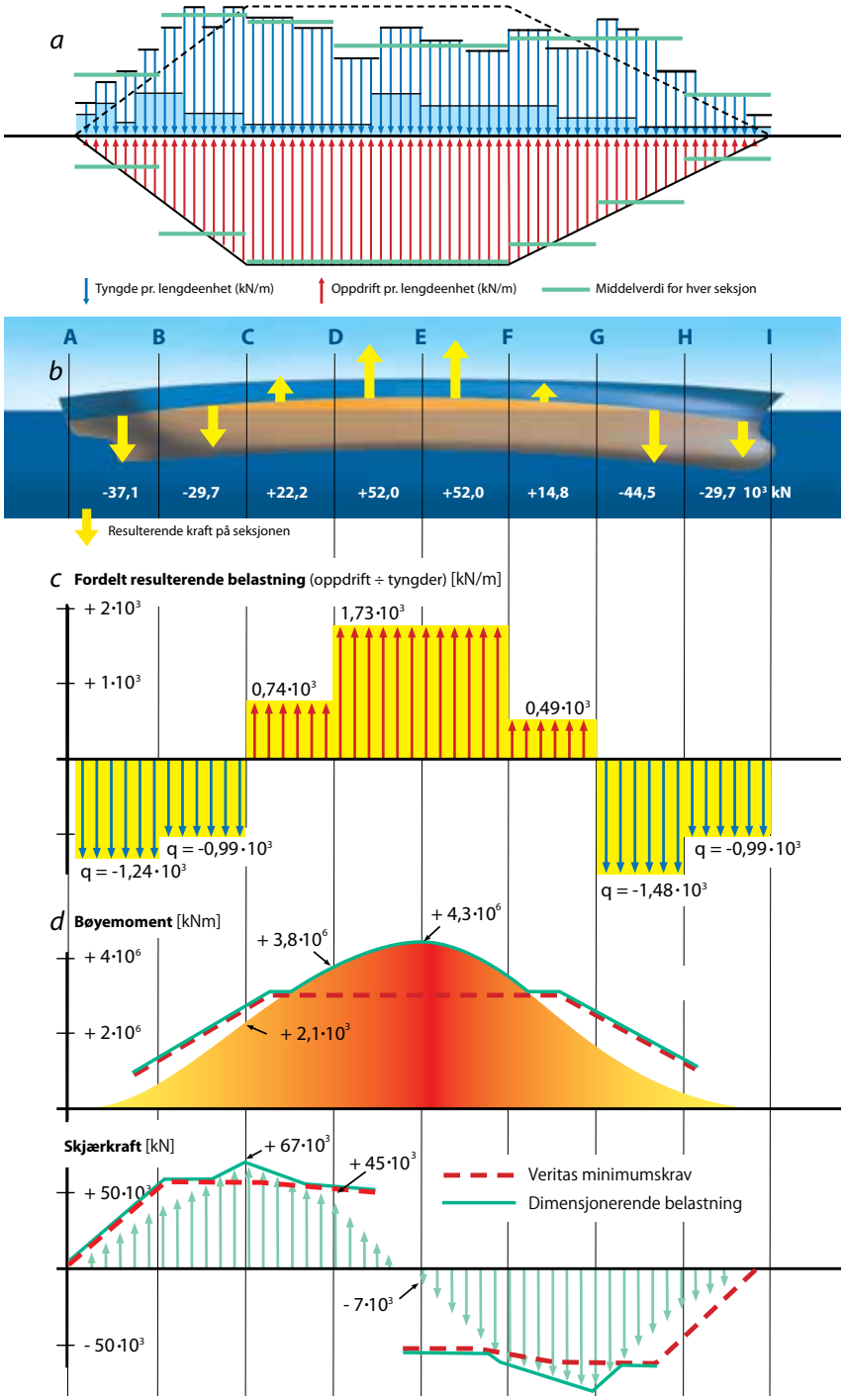
d. Bøyemomentkurve og skjærkraftkurve for skroget
Basert på de resulterende, fordelte belastninger kan bøyemomenter og skjærkreftene beregnes for diverse snitt langs skrogbjelken og kurven fastlegges. Beregningene gjøres som vist på sidene 6 - 6/7 og i eksempel 11. Veritaskravene er lagt inn med rødt og dimensjonerende belastning med grønt.

Bestemmelse av bøyemoment- og skjærkraftkurver for en 240 m lang skrogbjelke under hogging i stille vann

Beregningene gjennomføres på det samme skipet som foran ble brukt til å forklare fenomenene hogging og sagging. Det forutsettes at skipet har et volumdeplasement lik **97 600 m³** (massedeplasement 100 000 tonn), en lengde på **240 m** og er delt opp i **8 seksjoner**.

Beregning av bøyemomenter og skjærkrefter ved hogging

Framgangsmåte. Denne framgår av figurene nedenfor og figurtekstene. Det vises også til eksempel 6.11 og til oppgave 6.11.

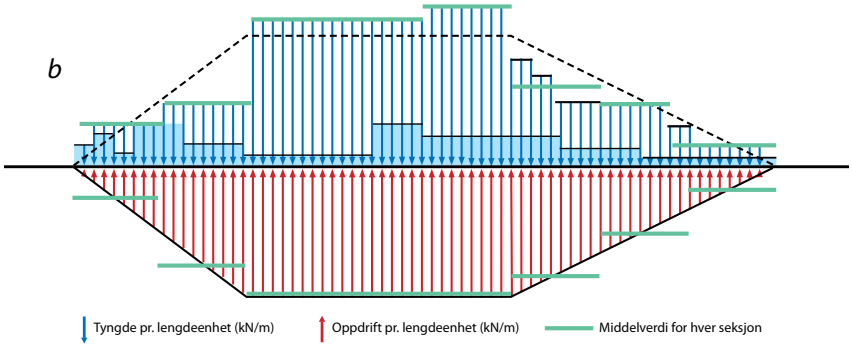


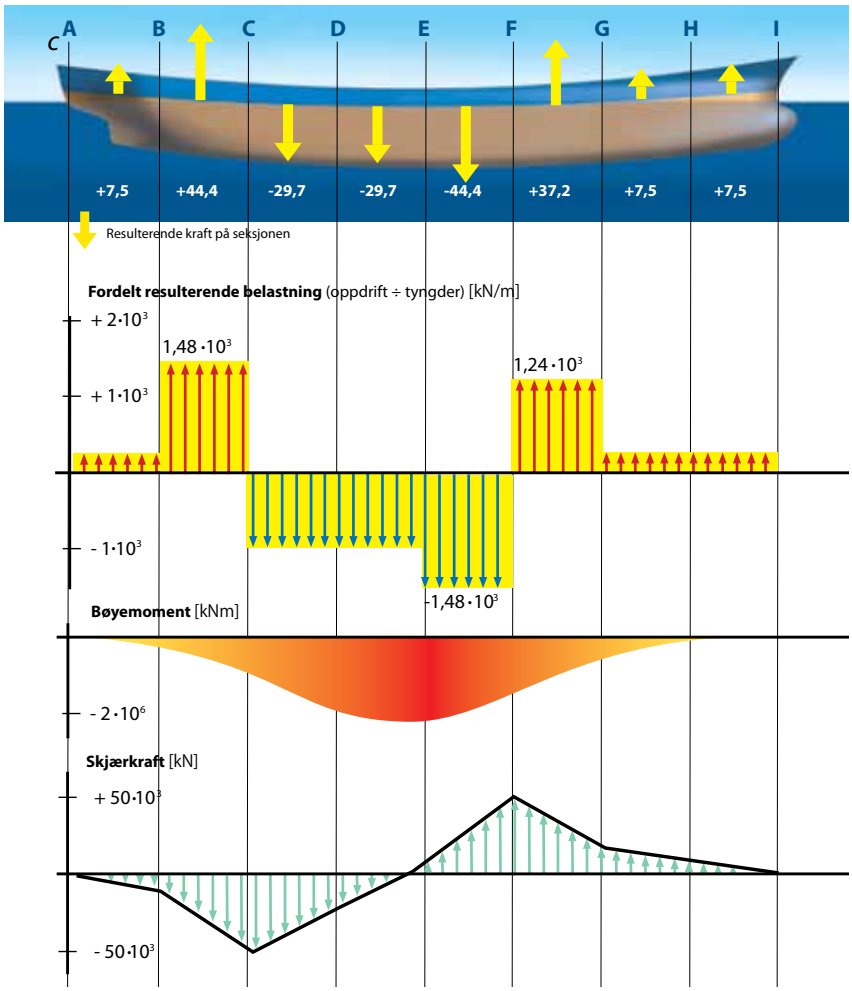
Eksempel 6.11. Beregning av bøyemoment og skjærkraft i et skrogbjelkesnitt under hog-belastning i stille vann. Snittet skal legges ved høyre ende av seksjon nr. 3 (snitt D). Det skal baseres på de resulterende, fordelte belastninger som framgår av figur c på forrige side. *Løsning:* Det vises til generell metode beskrevet på sidene 6 - 6/7 og til figurtekst til høyre. Virkelig opptredende, *indre* bøyemoment må altså være $+3{,}8 \cdot 10^6$ *kNm* i snitt D når skrogbjelken er i likevekt (inntegnet i figur side 6-18).

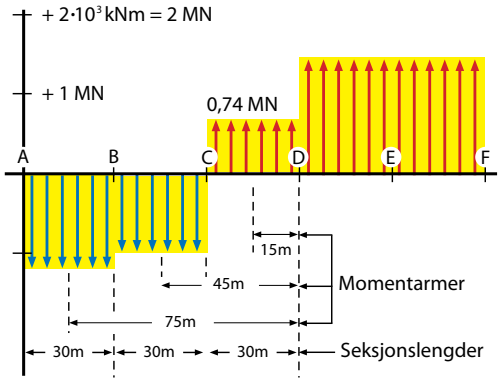
Sum ytre krefter som virker på frilagt skrogdel til venstre for snitt D blir -45 MN. Virkelig *indre* kraft, altså skjærkraft, må dermed være $+45 \cdot 10^3$ *kN* som påvirker skrogdelen i snitt D. Innen hver seksjon varierer skjærkreftene lineært, slik det framgår av figur nederst på forrige side.

Bøyemomenter og skjærkrefter ved sagging

Framgangsmåten er som foran og kommenteres ikke mer.







Figur til eksempel 6.11, utsnitt av figur nederst på forrige side

Ytre bøyemoment om snitt D:
-1,24MN/m · 30m · 75m=-2,8 GNm
-0,99MN/m · 30m · 45m=-1,3 GNm
+0,74MN/m · 30m · 15m=+0,3GNm
Totalt: - 3,8 GNm
De to første momentene og summen er negative (dreier mot urviseren).

Ytre krefter som påvirker frilagt skrogdel til venstre for snitt:
A: 0
B: 0 - 1,24 MN/m · 30 m = -37 MN
C: - 37MN- 0,99MN/m · 30m=-67MN
D: - 67MN+0,74MN/m ·30m=-45MN

Det er brukt følgende prefikser:
kiloNewton: kN = 10^3 N
MegaNewton: MN = 10^6 N
GigaNewton: GN = 10^9 N

Bestemmelse av bøyemoment- og skjærkraftkurver for en skrogbjelke under sagging i stille vann

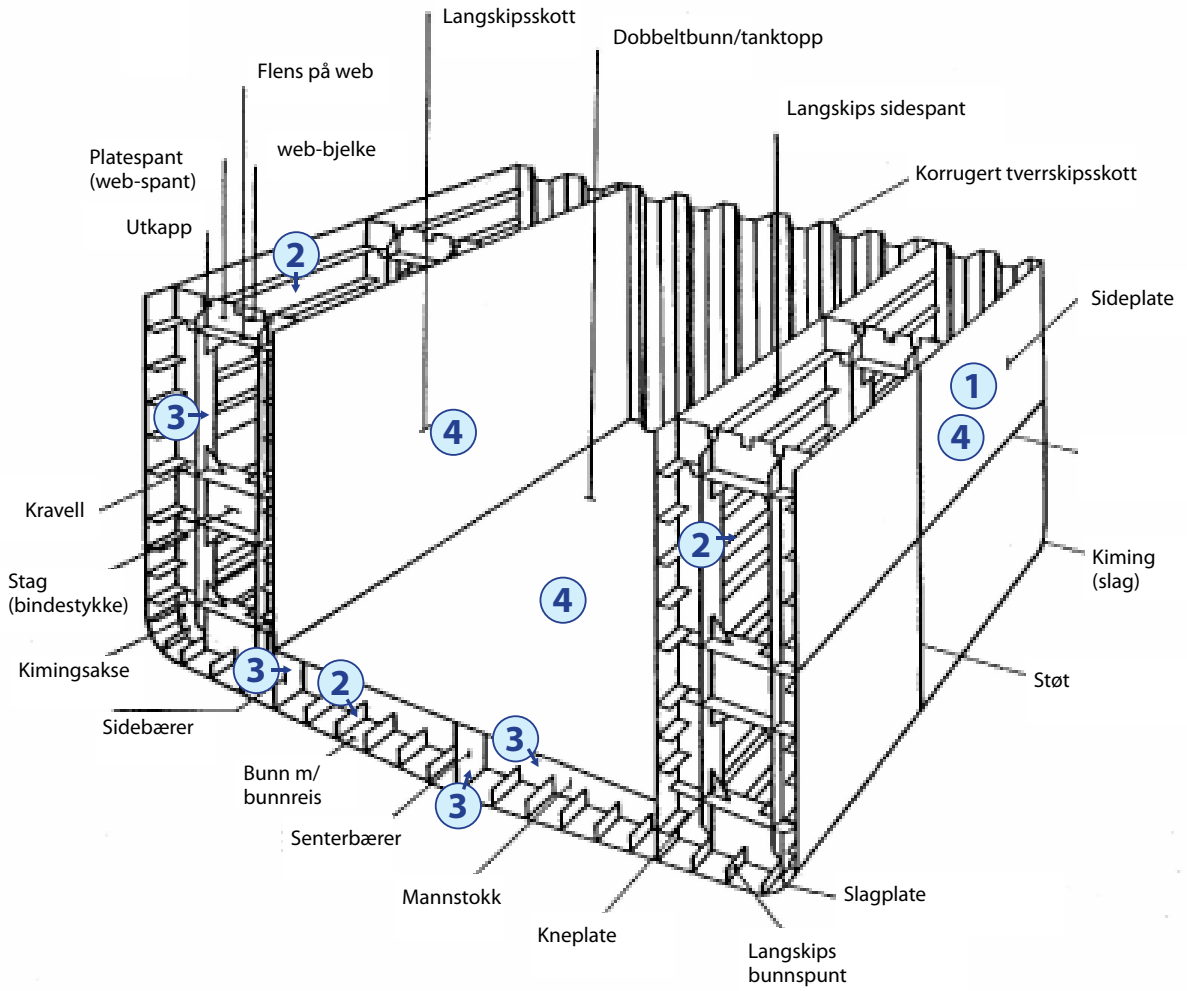
Det forutsettes samme skip som behandlet på forrige side, og det vises til den figurteksten.

Skipets konstruksjonsmessige oppbygning

Et skip består av en rekke konstruksjonselementer som satt sammen utgjør den fantastiske konstruksjonen som et skip er. Vi skal her forsøke å gi en fysisk forklaring på tankegangen som ligger bak oppbygningen av et skip. Se figur nedenfor.

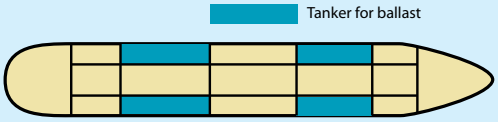
De ytre kreftene på skipet tas opp og fordeler seg i de ulike konstruksjonselementene. I et tankskip kan disse hovedsakelig deles inn i fem nivåer:

1 **Plater:** Finnes i bunnen, på dekket, på skipets sider og i skottene. Platenes tykkelse varierer med hvor de benyttes, det vil si med hvilke påkjenninger de utsettes for. Platetykkelsen vil være særlig stor der det er store langskips bøyespenninger og/eller stort trykk fra sjø eller nyttelast. Dette vil gjelde skipets dekk og bunn.
2 **Stivere:** Finnes i bunnen, på dekket, på skipets sider og i skottene.
3 **Bærere:** Finnes i tverrskipsrammer og i langskips bærere.
4 **Paneler:** Paneler er en betegnelse på plater som er avstivet med stivere og bærere. Skipssidene og langskipsskottene, dekk og bunn, kan oppfattes som paneler.
5 **Skrogbjelken:** Skipet som helhet - alle konstruksjonselementene satt sammen til en helhet.



Bilde fra bygging av tankskip.

Platene i skipsbunnen må oppta differansen mellom ytre vanntrykk og eventuelt trykk fra lasten. Platene i skipsbunnen er ikke alene i stand til å oppta dette trykket, som kan bli svært stort dersom skipet stikker dypt. De må derfor avstives. Avstivingen skjer ved at det blir sveiset fast stivere ②. Stiverne kan gå både på langs og på tvers. Langsgående stivere er mest vanlig for store skip (se figur forrige side), mens tverrgående stivere helst benyttes på mindre skip. Disse stiverne vil fungere som opplager for platene. På store lengder vil vanntrykket også bli for stort for denne konstruksjonen, som dermed må stives opp ytterligere med bærere ③. Bærerne går da på tvers av stiverretningen. Det kan være behov for både langsgående og tverrgående bærere på spesielt store skip, som for eksempel på tankeren vist i figur på forrige side. Bærerne er opplagret på skipets langsgående paneler (skipssider og langskipsskott) og på tverrskips skott/paneler.



Typisk tankinndeling for en oljetanker. Det stilles krav både til antall tanker, maksimalstørrelse per tank og separate ballasttanker. Dessuten kreves det i dag både doble sider og dobbel bunn i tankskip.

Vi kan dermed snakke om en kraftgang som beskriver hvordan trykkdifferansen som vi startet med, gir belastninger i alle de ulike konstruksjonselementene. Kraftgangen blir som følgende:

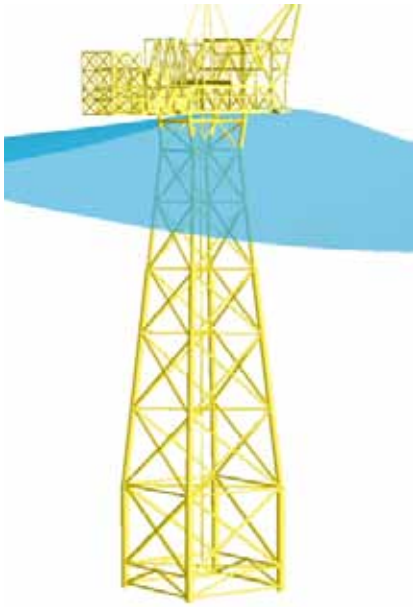
Plater → Stivere → Bærere → Paneler → Skrogbjelken

I denne boka har vi bare hatt plass til å se litt på bøye- og skjærbelastninger på siste nivå, nemlig i skrogbjelken. De øvrige konstruksjonselementene blir også utsatt for skjær- og bøyespenninger og må beregnes. Hver liten stålbit kan delta i kraftgangen på alle nivåer. Den totale spenningen blir summen av alle spenningene på de ulike nivåene. Antall beregninger blir formidabelt. De må gjennomregnes både for hogging og sagging. Dessuten kreves det omfattende beregninger av stabilitet.

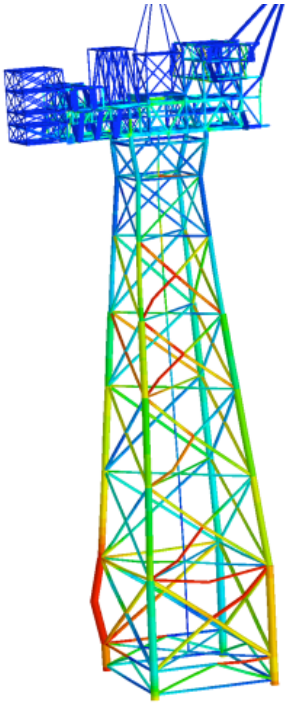
Vi undrer oss på:

Hvorfor er det viktig at et skip ikke har for store tanker? Har dette noe å si også for skipets stabilitet?

Statikk for fagverkskonstruksjoner



Fagverksplattform (Kvitebjørn), havdybde 190 m.



Datamodell av plattformen Kvitebjørn. Et av beina har blitt utsatt for knekkning.

Anvendelser av fagverk

Vi har sett at skipet må kunne motstå belastningene i form av skjærkrefter og bøyemoment på skrogbjelken. Som vist på side 5-20, er skroget formet som en „kasse" med sider, dekk, bunn og langskipsskott. Det er disse som må ta de globale belastningene.

I prinsippet kunne man tenke seg skrogbjelken bestående av et system av staver, som vist i figur til venstre. Et slikt system av staver kalles fagverk. For en skrogbjelke er imidlertid et fagverk ingen mulig skipskonstruksjon da skipet trenger tette sider og bunn for å motstå sjøtrykk og for å få oppdrift og dermed flyteevne.

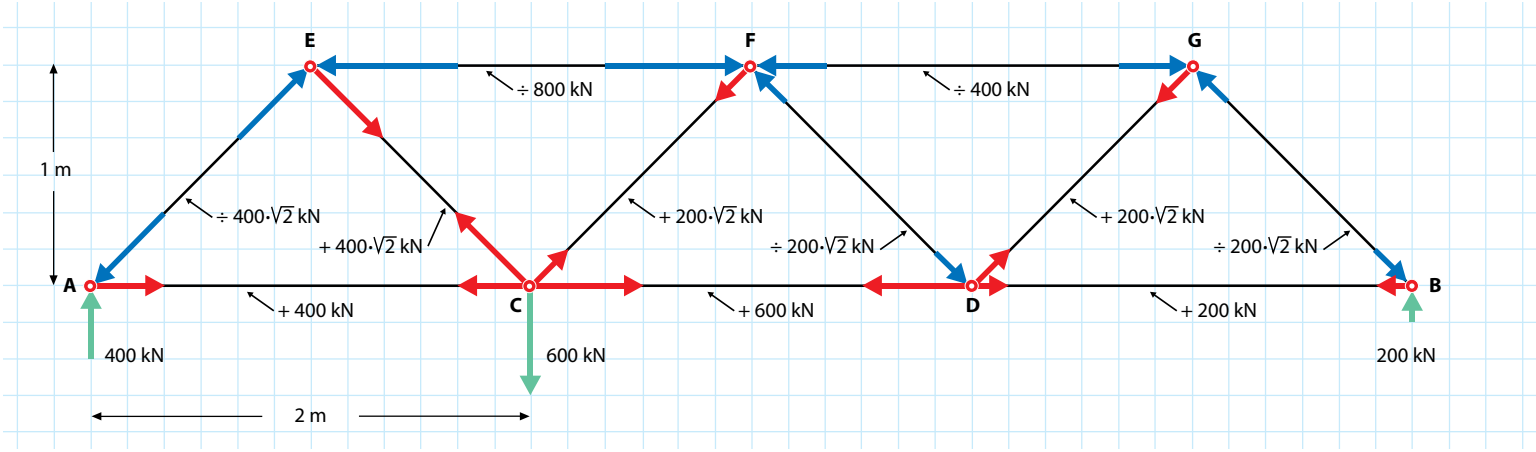
Hvis oppdrift ikke er nødvendig, er fagverk en meget effektiv måte å bygge bærende konstruksjoner på, og det benyttes mye i praksis. En velkjent fagverkskonstruksjon er Eiffeltårnet i Paris. Andre eksempler er vei-og jernbanebroer, samt offshore fagverksplattformer. Det siste er den desidert mest vanlige plattformtypen for utvinning av olje. Ekofisk, som er det første store feltet som ble utbygget på den norske kontinentalsokkelen (tidlig 1970-tallet), består for det meste av fagverksplattfomer. Figurene til venstre viser en datamodell av plattformen Kvitebjørn. Den nederste figuren viser en datasimulering av hvordan en stav i bunnen av plattformen kan knekke på grunn av trykkraft ved ekstremt store bølgebelastninger.

Hva er et fagverk?

Et fagverk er en konstruksjon hvor bærevirkningen i hovedsak skjer via strekk- og trykkrefter i de enkelte staver som utgjør konstruksjonen. Selv om fagverkskonstruksjoner kan bli svært store og tilsynelatende kompliserte, er det ofte enkelt å bestemme kreftene ved hjelp av likevektsbetraktninger i knutepunktene. Et knutepunkt er et sted hvor to eller flere staver møtes. Som et eksempel kan vi se på den enkle broplanken som gutten går på i eksempel 6, side 6-5. I stedet for å la broen være en planke kan den utformes som et fagverk. Dette fagverket vil nødvendigvis ha samme reaksjonskrefter som vist i eksempel 2.6 og vil også måtte bære de samme globale bøyemomenter og skjærkrefter som broplanken.

Styrkeberegning av fagverk

Kreftene i fagverket bestemmes ved å forutsette likevekt i alle knutepunkt. Kreftene beregnes suksessivt. Dette forklares best gjennom et eksempel, se neste side.



Eksempel 6.12. Beregning av stavkrefter i fagverk. Fagverket på figuren utsettes for en kraft lik 600 kN, plassert som vist. Denne belastningen gir opplagerkrefter på 400 og 200 kN. Beregn alle krefter som stavene gir på knutepunktene A og B.

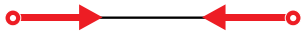
Løsning: Vi kan for eksempel starte med knutepunkt A. Likevekt i knutepunktet i vertikal retning tilsier at stav AE må ta en trykkraft på $400\sqrt{2}$ kN. Likevekt i horisontal retning betyr at stav AC må ha en strekkraft på 400 kN.

Vi ser så på knutepunkt E: Fra vertikal likevekt får vi at stav EC må ha en strekkraft på $400\sqrt{2}$ kN, mens horisontal likevekt gir en trykkraft i stav EF 800 kN.

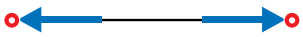
Slik kan vi fortsette gjennom alle knutepunktene. Dette forutsettes gjennomført i oppgave 6.14. Kreftene er vist i figur. Rød farge angir krefter som kommer fra staver som utsettes for strekk, mens blå farge angir krefter fra trykkstaver. Det er skråstavene som overfører skjærkreftene til opplagrene A og B. Vi ser at algebraisk sum av vertikalkomponentene av skråstavkraften er 400 kN til venstre for C og 200 til høyre for C, akkurat som det enkle skjærkraftdiagrammet på side 5-6 angir.

Det maksimale bøyemomentet kan vi finne ved å legge et vertikalsnitt gjennom C. Den eneste staven som gir moment om punkt C er staven EF. Armen er på 1 m, slik at momentet fra stavkraften på knutepunkt E blir 800 kN · 1 m = 800 kNm, akkurat som den enkle bjelkebetraktningen på side 6-6 gir.

I fagverket er det i hovedsak de øvre og nedre horisontale stavene (ofte benevnt som over- og undergurten) som bærer det globale momentet, mens skråstavene bærer den globale skjærkraften.



Strekkstav, utsetter knutepunktene for krefter med retning ut fra punktene. Like store i begge retninger. Størrelsen angis med positive tall.



Trykkstav, utsetter knutepunktene for krefter med retning inn mot punktene. Like store i begge retninger. Størrelsen angis med negative tall.

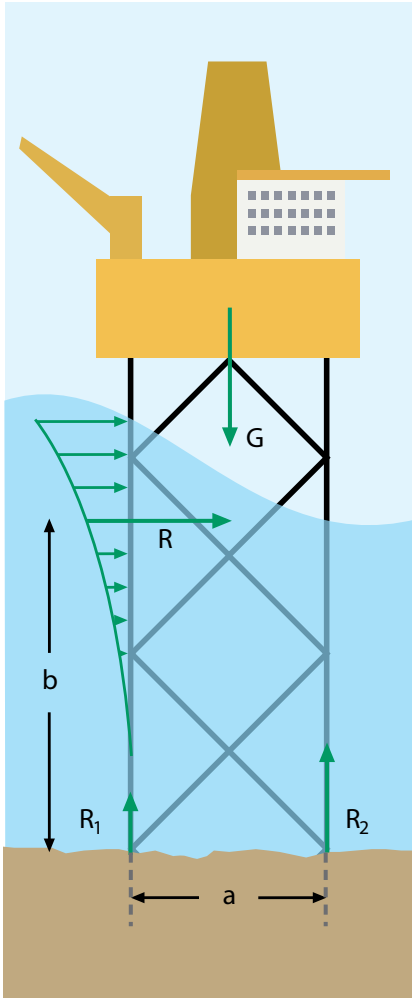
Ytre krefter

Fagverk, med beregning av stavkrefter.

Vi undrer oss på:

Hvordan kan rutenettet og dekomponering av kreftene i x- og y-retning brukes til å bekrefte størrelsen på de stavkrefter som virker på knutepunkt C?

Fagverksplattformer for petroleumsutvinning til havs



Med god tilnærming gjelder:
$R_1 = 0{,}5 \cdot G \div R \cdot b/a$
$R_2 = 0{,}5 \cdot G + R \cdot b/a$

Plattformene festes til sjøbunnen med peler (rørelementer) som drives typisk 40 - 80 m ned i grunnen, avhengig av dens beskaffenhet. Det er selvfølgelig viktig å kontrollere at pel og jord sammen kan motstå reaksjonskreftene ved sjøbunnen, som vist i fuguren over.

En side av en fagverksplattform for petroleumsutvinning til havs

Begrepet "havkonstruksjoner" omfatter egentlig alle typer innretninger som står på bunnen eller opererer flytende i havet. Ut fra en slik definisjon er også et skip en marin konstruksjon. Men i dagligtale benyttes gjerne begrepet "havkonstruksjoner" om innretninger som ikke er skip. Disse omfatter en vrimmel av ulike konstruksjoner, som for eksempel bunnplasserte fagverksplattformer eller halvt nedsenkede plattformer for petroleumsutvinningen til havs, faste eller flytende bølgekraftverk, faste eller flytende vindkraftverk, osv. Vi kommer tilbake til forskjellige plattformtyper i kapitlet om offshore petroleumsutvinning, men skal nedenfor nøye oss med å se litt mer på en fagverksplattform.

Fagverksplattform for offshore petroleumsutvinning

Hvis vi orienterer den foran viste fagverkskonstruksjonen vertikalt, har vi en fagverksplattform for utvinning av petroleum, se figur til venstre. Belastninger (R) fra bølger og strøm (og i noen grad vind) prøver å velte plattformen, som har en tyngde G

Bølgebelastningene er desidert størst i havoverflaten, men avtar raskt med dybden. De kan representeres ved deres resulterende kraft (R). Denne kraften må føres ned gjennom fagverket til havbunnen som global skjærkraft. I tillegg gir kraften et globalt moment som prøver å velte plattformen. Tyngden gir imidlertid et opprettende moment. Akkurat som for brofagverket på forrige side er det de ytre stavene – plattformens ben – som bærer momentene, mens skråstavene tar den globale skjærkraften.

Figuren viser et sideplan på en fagverksplattform. Sum av momenter om punkt C og sum av vertikalkrefter må være lik null, vi kan sette:

$$R_1 \cdot a/2 - R_2 \cdot a/2 + R \cdot b = 0$$
$$R_1 + R_2 - G = 0$$

Dette gir reaksjonskrefter $R_1 + R_2$ som vist på figuren

I motsetning til skipsskrog setter ikke myndighetenes regler for plattformer noen krav til global skjærkraft og moment. Det kritiske er her at plattformens ben eller skråstaver i trykk kan knekke ut under ekstreme bølgelaster. En slik knekning er illustrert i den datagenererte analysemodellen av Kvitebjørn på side 6-22. Regelverkene har formler for hvor mye en trykkstav kan tåle før den knekker, avhengig av dimensjonene på staven (lengde, diameter, godstykkelse) og materiale (flytespenning). En må dermed sørge for at det brukes stavdimensjoner som gjør at stavenes motstand mot knekking er større enn de beregnede stavkrefter.

Kollisjoner mellom skip og havkonstruksjoner

En plattform kan bli utsatt for ulykker, som for eksempel at et fartøy kolliderer med den eller at det oppstår brann eller eksplosjoner om bord. Myndighetene krever at sannsynligheten for ulykkeshendelser skal gjøres så liten som mulig. Det er imidlertid umulig å eliminere risikoen for ulykker fullstendig. Vi skal snart se på hvordan man prøver å redusere sannsynligheten for kollisjon når man dimensjonerer plattformer, men først skal vi ta for oss et par ulykker.

U-BÅT-DRAMAET

- TRODDE DET VAR ET JORDSKJELV

Produksjon i gang neste år

Ubåtkollisjon på Osebergplattformen. Osebergfeltet ligger omtrent rett vest for Bergen. Første trinn i utbyggingen besto av Oseberg A, en betongplattform for boligkvarter og prosessanlegg, og Oseberg B, en fagverksplattform for boring og produksjon. I 1988 ble fagverksplattformen truffet av en tysk ubåt under en marinemanøver. Ubåten ble ikke alvorlig skadet, men forvirringen var stor om bord da ubåten ble fanget inne i plattformens fagverkskonstruksjon. Ulykken førte ikke til utslipp eller brann på plattformen og heller ikke til skader på mennesker. Et av plattformens staver ble imidlertid så skadet at den måtte skiftes. Det er to poeng ved denne hendelsen som gjør at den trekkes fram her.

- **Plattformer skal dimensjoneres ut fra analyser av risiko for ulykker.**
  I moderne regelverk står det at en i prinsippet skal foreta risikoanalyser der en så godt som mulig kartlegger sannsynligheten for slike hendelser og dimensjonerer konstruksjonen mot krefter som kan forventes å opptre hyppigere enn et gitt nivå. Skipskollisjoner er en typisk ulykkeslast, og alle plattformer på norsk sokkel er derfor beregnet for å tåle kollisjoner med et visst energiinnhold.

- **Regelverk sikrer at plattformer skal tåle visse ulykker.**
  Myndighetenes regler er slik at lokal skade kan aksepteres, men at skaden skal være reparerbar og at den ikke skal føre til totalhavari. Konstruksjonen skal være så robust at den har en viss styrke til å motstå store stormer selv i skadet tilstand. Dette er regelformuleringer som kom etter erfaringene fra Alexander Kielland- forliset (se side 6-27). Oseberg-plattformen ble riktignok skadet ved kollisjonen, men plattformen var aldri truet av totalhavari, og skaden var reparerbar. Selv om plattformen ikke eksplisitt var dimensjonert mot kollisjoner med ubåter, var det generelle kravet om robusthet godt nok til å fange opp denne hendelsen.

Kollisjon mellom plattformen West Venture og forsyningsskipet Far Symphony i 2003. Skadene som oppsto, framgår av bilder til høyre. Vi ser at baugen på forsyningsskipet har fått en betydelig sammentrykking, mens plattformen har små skader (ca. 10 cm inntrykking av søylen ved den stiplede sirkelen):

Alexander Kielland-katastrofen (Nordsjøtragedien 1980)

Foto: Helge Sunde / Samfoto

Katastrofen er et faktum. Det "umulige" har skjedd, "Alexander Kielland" har kantret, og kun bunnen av de fire gjenværende pontongene minner om de 123 som døde i bølgene.

Torsdag den 27. mars 1980 inntraff den verste ulykken som har rammet norsk oljevirksomhet. Boligplattformen Alexander L. Kielland på Ekofiskfeltet havarerte og 123 mennesker omkom. Katastrofen var et sjokk for alle som hadde sin arbeidsplass i Nordsjøen, og ble en dramatisk vekker for fagmiljøet som hadde ansvaret for oljeinstallasjonenes sikkerhet.

Foto: Helge Sunde / Samfoto

Årsaksrekke (kort skissert)

1. På ett av de horisontale stavene i undervannskonstruksjonen var det en svakhet som førte til at en utmattingssprekk startet.
2. Denne utmattingssprekken vokste uten at den ble oppdaget.
3. Sprekken ble så stor at stavens tverrsnitt ble vesentlig svekket og til slutt ble revet av som følge av belastningene.
4. Da denne staven røyk, hadde resten av konstruksjonen som holdt beinet, så liten styrke at bølgekreftene rev av dette beinet.
5. Da plattformen mistet et bein, tapte den stabilitet og fikk kraftig slagside.
6. I denne tilstanden kom deler av dekket under vann. Rask vannfylling av store volumer førte til at plattformen kantret helt.
7. Den hurtige kantringen gjorde normal evakuering umulig. Bare et fåtall av mannskapet rakk å gå i livbåtene. De fleste havnet i sjøen uten flytevest eller overlevelsesdrakt, eller kom seg ikke ut av boligkvarteret. 123 mennesker omkom.

Svakhet på staget. "Liten tue kan velte stort lass"
Utgangspunket for utmattingssprekken i stav D-6 (se figur) var en hydrofon som var festet under denne staven. Denne figuren viser også et ekstra hull like ved hydrofonen. Hensikten med det ekstra hullet er å sørge for at staget er vannfylt når plattformen har operasjonsdypgang, men tømmes når plattformen heves og staget kommer over vann.

Hydrofonen benyttes i forbindelse med riggens posisjoneringssystem. Den er festet til en kraftig rørstubb som er sveiset fast gjennom et hull i staven. Rent styrkemessig har dette to vesentlige virkninger. For det første vil spenningene i staven rundt hullet øke kraftig i forhold til det normale, og dessuten vil materialet i det samme området få en forringet kvalitet som følge av sveisingen. Kombinasjonen av økte spenninger og redusert materialkvalitet fører til økt fare for at utmattingssprekker skal oppstå.

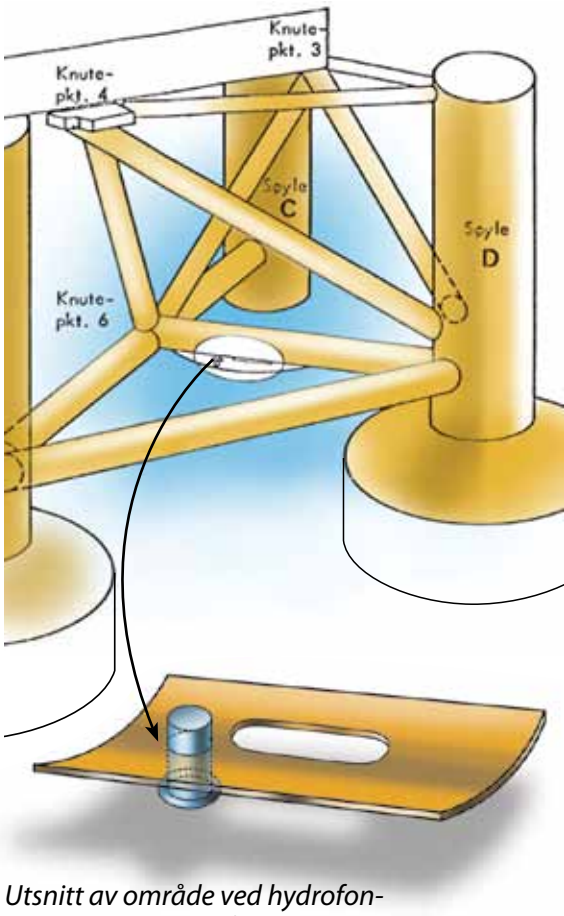
Sprekken som vokste
Utmatting blir ofte kalt materialtretthet. Dette er en noe misvisende betegnelse da utmatting arter seg som en sprekk som vokser i materialet som følge av vekslende belastninger. Sprekken vokser så lenge en har vekslende last fra f.eks. bølger, men vil stoppe å vokse når belastningsvekslingene opphører (i stille vær).

Ettersom det knytter seg en del usikkerhet til utmatting, sikrer en seg mot skader ved å inspisere konstruksjonene. Det er et faktum at det aktuelle stedet aldri ble inspisert fordi de som var ansvarlige for inspeksjonsplanleggingen, ikke visste at det stod en hydrofon der. Det er stavenes innfesting i søylene og knutepunkt mellom stav som først og fremst inspiseres. Sprekken fikk dermed vokse uten å bli oppdaget.

Staget som brast
Når utmattingssprekken i staget begynte å vokse, forsatte den med det så lenge konstruksjonen ble utsatt for vekslende belastning. I en slik situasjon vil brudd inntreffe første gang belastningene fra bølger gir påkjenninger i staget som overskrider styrken til den delen av stagets tverrsnitt som ikke er sprukket opp.

Nye regler
Både DNV, Oljedirektoratet og Sjøfartsdirektoratet reviderte sine regler etter erfaringene fra Alexander L. Kielland-havariet. De viktigste regelendringene var

1. Krav til styrke av skadet konstruksjon. Ethvert konstruksjonselement skal kunne svikte uten at det fører til totalhavari.
2. Utmattingsberegninger utføres som en selvsagt del av designarbeid.
3. Alle stag skal være luftfylte, og de skal kunne inspiseres fra innsiden.
4. Krav til flyteevne ved store skader. Oftest tilfredsstilt ved reserveoppdrift i dekkskonstruksjonen.
5. Antall personer som kan bo på en flytende hotellplattform (flotell), er begrenset.
6. Alle personer om bord skal ha personlige overlevelsesdrakter.

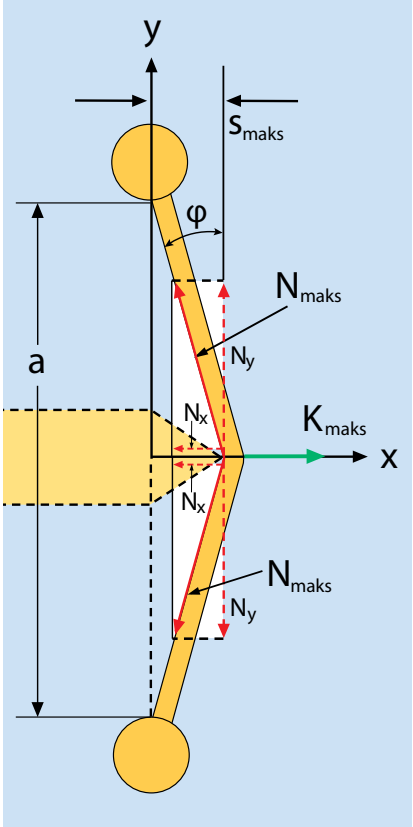


Utsnitt av område ved hydrofonholder og letthull på stag D6.

"Alexander L. Kielland" var en Pentagonplattform bygd i Frankrike. Normalt var den senket så dypt at det meste av stagkonstruksjonen var under vann. Figuren viser det stedet utmattingsbruddet inntraff. Etter at denne staven gikk av, hadde ikke de øvrige tre stavene tilstrekkelig styrke til å holde på beinet helt til høyre. Bølgekreftene gjorde at også disse stavene røyk, beinet løsnet først nede før det ble helt revet av, og plattformen fikk kraftig slagside. Etter få minutter tippet den helt rundt.

Alexander Kielland-plattformen og konstruksjonsdetaljer som var årsak til katastrofen. Du kan lese mer om utmatting på sidene 4-14/15.

Sammenstøt mellom skip og plattform



K_{maks} = *maks. kraft som skipet virker på staven med*
N_{maks} = *maks. strekkraft i staven, opptrer når materialet når flytegrensen*
N_y = *vertikal komponent av N_{maks} de to komponentene opphever hverandre*
N_x = *horisontal komponent av N_{maks} Iflg. Newtons 3. lov må gjelde at $2 \cdot N_x = K_{maks}$*
s_{maks} = *maks. deformasjon av staven i x-retning*
a = *stavens lengde*
φ = *deformasjonsvinkel*

Krefter og deformasjoner mot slutten av et sammenstøt mellom et skip og en plattform.

For det temaet som tas opp i dette kapitlet vil det være fordelaktig, men ikke nødvendig, å ha kjennskap til det stoff om potensiell energi i en elastisk fjær og bevegelsesmengde som er behandlet i Fysikk 2.

Deformasjoner og deformasjonsarbeid

Når det gjelder skipskollisjoner, er en typisk, dimensjonerende hendelse for plattformer på den norske kontinentalsokkelen en påkjørsel av et forsyningsskip på 5000 tonn med hastighet 2 m/s (ca. 4 knop). Skipet har da en kinetisk energi på 10 MJ. Som en følge av flere store kollisjoner og økt størrelse på skipene som opptrer ved plattformene, er myndighetenes forskrifter skjerpet. Nå skal fagverkene dimensjoneres etter en skipsstørrelse på 10 000 tonn og en hastighet på 3 m/s.

Ved kollisjon mot faste plattformer, må skipet stoppes helt. Det betyr at skipets kinetiske energi må absorberes som deformasjonsarbeid i plattformen og/eller i skipet. I tilfellet West Venture var det skipsbaugen som fikk omtrent hele deformasjonsarbeidet, se side 6-25. Dette var fordi skipet traff de meget solide plattformbeina.

For påkjørsel med baug mot stavene i fagverksplattformer er det vanlig å regne med at det er plattformen som får deformasjonsarbeidet, mens baugen ikke deformeres. Dersom skipet treffer en horisontalstav, vil staven først bøyes som en bjelke. Staven vil deretter ved store deformasjoner virke omtrent som en gummistrikk. Vi regner med at staven kan få en maksimal strekkspenning som er lik materialets flytespenning, σ_Y. Staven er formet som et rør, og den maksimale kraften i staven vil i så fall bli

$$N_{maks} = \sigma_Y \cdot A = \sigma_Y \cdot \pi \cdot D \cdot t$$

hvor D = stavens diameter og t = godstykkelsen.

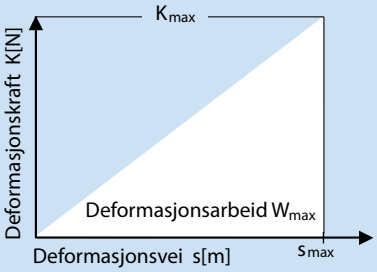
Vi forutsetter at skipet treffer staven på midten og etter hvert deformerer denne en distanse s_{maks}, som vist på figur. Summen av komponentene av kreftene N i x-retningen vil balansere med kraften K_{maks} fra skipet, og vi kan for små deformasjonsvinkler ($\sin\varphi \sim \tan\varphi$) skrive

$$K_{maks} = 2 \cdot N_x \approx 2 \cdot N_{maks} \cdot \tan\varphi = \frac{2 \cdot N_{maks} \cdot s_{maks}}{a/2} = \frac{4 \cdot N_{maks} \cdot s_{maks}}{a}$$

Kraften K er ikke konstant, men øker med økende deformasjon av staven. Tilnærmet kan vi regne at kraften K varierer lineært, som vist på den øverste figuren i høyre marg. Jevnfør også figur 4-12. Middelverdien vil dermed bli $0{,}5 \cdot K_{maks}$. Dette gir følgende deformasjonsarbeid inntil flyting av materialet inntreffer:

$$W_{maks} = \text{kraft x vei} = 0{,}5 \cdot K_{maks} \cdot s_{maks}$$

Maksimalt deformasjonarbeid på den staven som skipet treffer, kan dermed bestemmes ved hjelp av ligningene for K_{maks} og N_{maks}. Nødvendig energi til å utføre dette arbeidet må hentes fra skipets kinetiske energi. Dersom denne energien er mindre enn arbeidet som gir seg av ligning for W_{maks}, vil skipet ha stoppet fullstendig allerede ved mindre deformasjon enn den som resulterer i brudd i staven. Hvis den kinetiske energien er større, vil staven briste og skipet fortsette med redusert fart inntil det treffer en annen del av plattformen.



Illustrasjon av deformasjonskraft som funksjon av deformasjonsvei. Deformasjonsarbeidet framkommer som arealet av den hvite flaten.

Eksempel 6.13
Figuren viser øverste del av en datamodell av en tidligere boligplattform på Friggfeltet i Nordsjøen. Ved havnivå er plattformen utsatt for påkjørsel av forsyningsskip, som indikert med pil på figuren. Spørsmålet er om staven kan utføre et tilstrekkelig stort deformasjonsarbeid til at skipet, som har kinetisk energi på 10 MJ, stoppes helt.

Datamodell av understell for boligplattform på Frigg feltet.

Løsning. Lengden av staven mellom knutepunktene 508 og 628 er 23,3 m, og den har diameter 0,762 m og godstykkelse 28,6 mm. Flytespenningen er $\sigma_Y = 355$ MPa.

Den maksimale kraften i staven er gitt ved

$$N_{maks} = 355 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} \cdot \pi \cdot 0{,}762 \text{ m} \cdot 0{,}0286 \text{ m} = 24{,}3 \text{ MN}$$

Ved bruk av formler gitt i regelverk for plattformer på norsk sokkel (NORSOK N-004), vil vi finne at staven kan deformeres maksimalt $s_{maks} = 2{,}2$ m, eller ca. 3 ganger dens diameter, før den brister på grunn av for store tøyinger inn mot knutepunktene. Den maksimale kollisjonskraften blir derfor:

$$K_{maks} \frac{4 \cdot 24{,}3 \text{ MN} \cdot 2{,}2 \text{ m}}{23{,}3 \text{ m}} = 9{,}2 \text{ MN}$$

og det maksimale deformasjonsarbeidet blir

$$W_{maks} = 0{,}5 \cdot 9{,}2 \text{ MN} \cdot 2{,}2\text{m} = 10{,}1 \text{ MS}$$

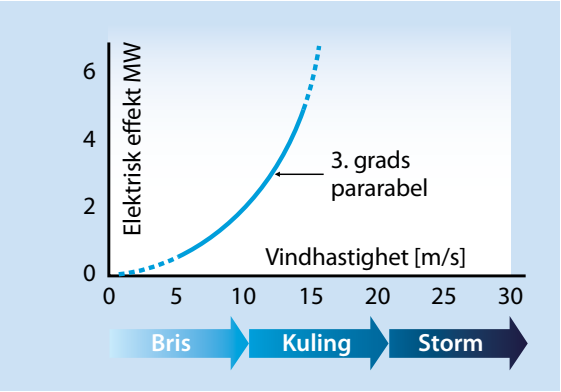
Denne forenklede beregningen viser at staven akkurat klarer å absorbere skipets kinetiske energi uten å ryke.

Dette bildet viser skadene på forskipet til brønnfartøyet Big Orange etter at det kolliderte med vanninnjeksjonsplattformen 2/4W på Ekofisk-feltet 8. juni 2009. Det går fram at også plattformen har store skader; hovedsøylene er bøyd, og flere staver er revet av. Som en konsekvens av ulykken ble plattformen stengt ned, og den ble fjernet. Det er interessant å merke seg at baugen også i dette tilfellet utførte et betydelig deformasjonsarbeid. Kollisjonsenergien var videre ca. seks ganger større enn det som plattformen opprinnelig var dimensjonert for, se øverst på venstre side.

Vi undrer oss på:

Kan vi definere det sammenstøtet som er behandlet i eksemplet ovenfor som et elastisk støt? Begrunn svaret.

Tårnkonstruksjoner for vindkraftverk til havs



Vindturbinen settes i drift ved en vindhastighet på ca. 5 m/s og stenges ved 25-30 m/s. Effektregu-leringen skjer ved at turbinbladene vris slik at vinkelen φ i figur side 6-41 varieres.

Typisk driftsområde for et 5MW vindkraftverk

Dette vindkraftverket er tenkt for-ankret med et såkalt strekkstag (a) mellom den flytende konstruksjonen og havbunnen. Flere detaljer er vist på www.sway.no

Planlagt "Sway" 5 MW flytende vindkraftverk

Vindkraft – en viktig fornybar energikilde i framtiden. Verdens energibehov synes "umettelig". Tilgangen til fossilt brensel som olje og gass er begrenset, og opphopning av CO_2 i atmosfæren fra for-brenningen utgjør en trussel med hensyn til drivhuseffekt og global oppvarming. På sikt må derfor andre energiformer som ikke er basert på fossilt brensel, få større plass. Kjernekraftverk ser ut til å få en ren-nessanse i mange land, men her representerer lagring av radioaktivt avfall en stor utfordring. Vindkraft framstår derimot som en av de mest miljøvennlige metodene for utvinning av elektrisk energi sammen-lignet med mange andre alternativ.

Vindkraftverk til havs gjør norsk kompetanse fra offshore petroleumsutvinning ekstra verdifull. Fram til nå har vindkraftverk primært blitt installert på land. Spesielt Danmark og Tyskland har vært ledende på dette området. I Norge er det bygget relativt få vindkraft-verk. Mange kraftverk er planlagt, men det er som regel stor mot-stand mot slike planer på grunn av de store konsekvensene de har med hensyn til inngrep i vakker og sårbar kyst- og fjellnatur og visuell "forurensing". Det naturlige svaret på disse utfordringene synes å være å installere dem til havs ute av syne, hvor konfliktene med andre interesser vil være mye mindre. Plassering til havs vil dessuten være gunstig med hensyn til gode vindforhold, men det at disse instal-lasjonene også må motstå enorme påkjenninger fra bølger og strøm, i tillegg til vind, gir nye utfordringer. Her vil norske ingeniører– og ikke minst mariningeniører – med sin store kompetanse fra offshore petroleumsvirksomhet, ha alle muligheter til å innta en ledende rolle internasjonalt.

Store påkjenninger

Selve energiomformingen fra vindens kinetiske energi til elektrisk energi er nærmere behandlet på sidene 13-4/5. Her påvises at utviklet effekt i en vindturbin er proporsjonal med vindhastigheten i 3. potens, se figur øverst til venstre. For ikke å overbelaste de mekaniske kom-ponenter kan en imidlertid ikke ta ut mer energi enn det som oppnås ved vindhastigheter opptil 12—15 m/s. Ved store vindhastigheter, typisk større enn 25—30 m/s, tilsvarende storm, må kraftverket stenge ned ved at bladene vris til nøytral posisjon. For ekstreme bølge- og sjøtilstander, som i Nordsjøen kan gi vindhastigheter i størrelsesorden 45 m/s og bølgehøyder på opptil 30 m, blir det da rett og slett snakk om å "overleve".

Store dimensjoner. Moderne vindkraftverk er enorme installasjoner. Selve tårnet vil være 70—100 m høyt. Et kraftverk på 5 MW har rotor-blader med diameter på ca. 100 m, mens planlagte 10 MW kraftverk har en diameter på ca. 145 m. Styrken til rotorbladene begrenser hvor lange man kan lage disse. Nye materialer og alternative rotorløsninger vil sikkert se dagens lys i årene som kommer.

Fagverkskonstruksjoner er godt egnet til bunnfaste anlegg. På land vil generatorhuset typisk bli satt på en sylindrisk søyle med en diameter på ca. 5 m. På små vanndyp kan slike søyler fortsatt benyttes, men når

vanndybden blir større, må et alternativt fundament lages. Her er det sannsynlig at fagverksplattformer av samme type som benyttet for oljeplattformer vil være en effektiv måte å bære vindkrafttverket på. Fagverk er nemlig en "transparent" konstruksjon som drar på seg relativt små bølgekrefter samtidig som den aksielt har en effektiv bærevirkning. En slik konstruksjon er vist øverst på side 13-4. Det er mulig at fagverket også kan erstatte den sylindriske søylen helt eller delvis. For store havdyp vil bunnfaste konstruksjoner bli kostbare, og flytende konstruksjoner må brukes. Eksempler på slike kraftverk er Sway og Hywind, se figurer på begge sider. Bygging av vindkraftverk har potensial til å gi betydelig virksomhet ved norske offshore- og skipsverft.

Krav til omfattende styrkeberegninger

Både rotorblad og søyler/understell må kontrolleres. Det er nødvendig å foreta en rekke analyser for å kontrollere at vindkraftverkene tåler påkjenningene de utsettes for. Analysene er svært kompliserte og må ta hensyn til samspillet mellom styringskontrollen og de mekaniske, aerodynamiske og hydrodynamiske systemene. Rotorbladenes vinkel mot vinden må for eksempel kontinuerlig justeres av hensyn til både ønsket generatoreffekt og kontroll av rotorbladenes bøyespenninger. Bøye- og aksialspenningene i den sylindriske søylen og eventuelt i en fagverkskonstruksjon som understell, må på ethvert sted kontinuerlig registreres i simuleringer og kontrolleres med hensyn til faren for utmatting, flytning og knekking. Det foregår her en rivende utvikling av beregningsverktøy, hvor norsk erfaring fra offshorevirksomheten er uvurderlig.

Enorme datamengder fra mange forskjellige driftssituasjoner. En viktig del av kontrollen er normal operasjon av vindkraftverket og overlevelse ved ekstreme stormer. Videre må det også kontrolleres for en rekke tilfeller av ekstreme endringer i vindhastigheter og vindretninger, nødnedstengninger ved feil på blader, brudd i turbinaksel, for stor rotorhastighet, tap av elektrisitetsnett osv. For hver av disse hendelsene må mange sjø- og vindtilstander simuleres, slik at kanskje flere tusen analyser må foretas. Å gjennomføre disse analysene og håndtere de enorme datamengdene stiller store krav til dataprogram, datamaskiner og ingeniører.

Transport til installasjonsstedet

Det er ikke bare operasjonsfasen som må kontrolleres. Transporten av flytende vindkraftverk fra fabrikasjonssted til installasjonsstedet vil også kunne medføre utfordringer. Mens vi i Norge har dypt vann, og dermed kan slepe installasjonen i opprett stilling, vil det mange steder være grunne forhold ved kysten. Dette medfører i så fall sleping i horisontal tilstand. Konstruksjonen må være hydrostatisk stabil også i denne tilstanden. En annen løsning er bygging av spesialskip for transporten. Her har marinstudenter ved NTNU utviklet og tatt patent på en spennende løsning, se side 0-17.

Sleping av Hywind til Utsira. *Photo: Øyvind Hagen / StatoiL*

Bruk Internett

Lag lysark til et 20 minutters foredrag om vindkraftverk.
Bruk illustrasjoner og data fra sidene 6-30/31 og 13- 4/5, samt fra internett (adr. se figurer)

Oppgaver

Oppgave 6.1

Figur til høyre viser skjematisk en kasseformet pram som slepes i ferskvann.

a) Det er alltid viktig å skille mellom de ytre kreftene som virker på et legeme, og de indre påkjenninger som disse gir. Hvilke 3 ytre krefter virker på prammen?

b) Beregn skrogtyngden (lettskipstyngden)

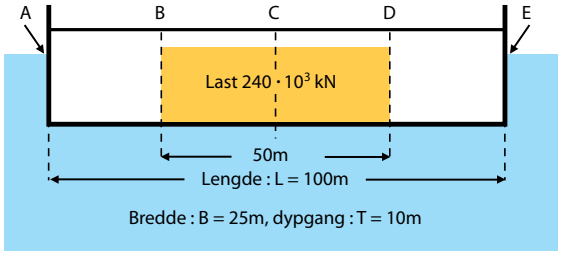
c) Beregn momentet som disse ytre kreftene har om en horisontal akse gjennom punkt E. Bruk fortegn. Hva kan du altså si om summen av de ytre kreftene og summen av de ytre momenter når prammen ligger i ro?

d) Lasttyngde, skrogtyngde og oppdrift antas jevnt fordelt over oppgitte lengder. Beregn de fordelte krefter i kN/m. Skisser disse på samme måte som vist i figur a på side 6-19.

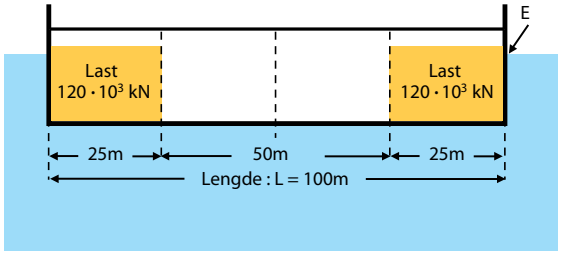
e) Vi går så over til å studere de indre påkjenningene. Disse beskrives best ved hjelp av en bøymomentkurve og skjærkraftkurve for prammen. Kurvene framkommer ved å kartlegge forholdene i ulike tverrsnitt av prammen, på samme måte som vist i eksempel 6.11, side 6-19. Beregn og tegn opp en bøyemomentkurve for prammen. For å spare tid nøyer vi oss med å dele opp i 4 like deler. Vis at $\Sigma M_b=0$ i "snitt" E.

f) Beregn og tegn opp skjærkraftkurven, se eksempel 6.11.

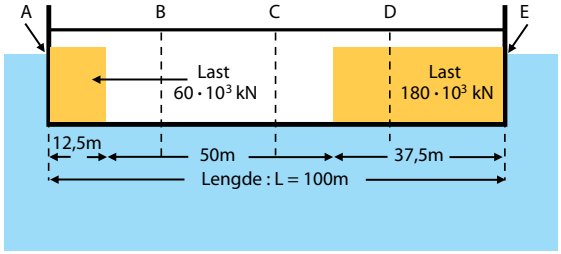
g) Hva kaller vi en slik belastningstilstand som prammen er utsatt for?



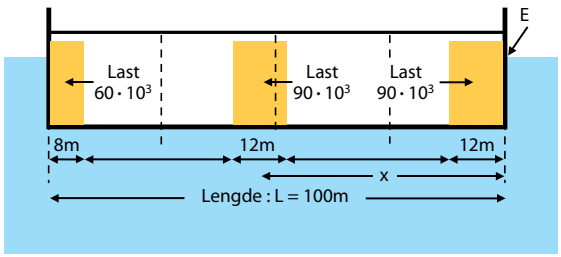
Figur til oppgave 6.1



Figur til oppgave 6.2



Figur til oppgave 6.3



Figur til oppgave 4.4

Oppgave 6.2

Figur nr. 2 til høyre viser den samme prammen som ble beregnet i oppgave 5.1, men nå har den en annen plassering av lasten.

a-e) Gjennomfør de samme beregningene og opptegningene som ovenfor.

f) Hva kalles den belastningstilstand som prammen nå er utsatt for?

Oppgave 6.3

Vi fortsetter med beregninger av den samme prammen som ovenfor, men med 25 % av lasten plassert akterut, mens resten av lasten ønskes plassert lengst framme, se figur.

a) Beregn det ytre momentet om punkt E med den ønskede plassering av lasten. Beregningen baseres på at skipet skal flyte horisontalt slik at de oppgitte lengder kan brukes som momentarmer for kraftretningene. Hvordan forklarer du at det ytre momentet ikke blir lik 0 om punkt E, slik som det har blitt i begge oppgavene foran?

b) Hvordan må den store lasten plasseres for at det ytre momentet om punkt E skal bli lik 0? Uttrykk plasseringen ved hjelp av den horisontale avstanden mellom denne lastens tyngdepunkt og "snitt" E.

c) Beregn og tegn opp resulterende, fordelt belastning (kN/m) med den nye plassering av den fremste lasten

d) Beregn og tegn opp en bøyemomentkurve med den nye plasseringen av den forreste lasten

e) Beregn og tegn opp skjærkraftkurven

f) Hvordan vil du etter dette formulere den betingelse som de ytre momentene må tilfredsstille for at et skip skal flyte horisontalt i vannet.

Oppgave 6.4

Det vises til figur nr. 4 av samme pram som tidligere. Denne har samme totallast som før, men av en type som gir større fordelte belastninger i kN/m. Dessuten er lasten delt opp i 3 enheter. To av disse er plassert som vist, og den tredje skal plasseres slik at prammen flyter horisontalt.

a) Beregn hvordan denne da må plasseres, uttrykt ved hjelp av den horisontale avstanden mellom dens tyngdepunkt og "snitt"E.

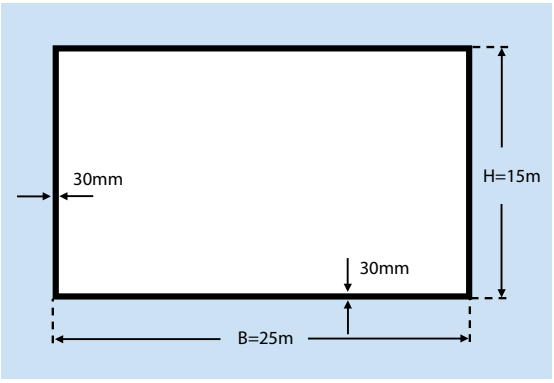
Oppgave 6.5

Vi skal beregne hvor stor strekkspenning det blir på undersiden av prammen ved den belastning som var gitt i oppg. 5.1.

a) For enkelhets skyld forutsetter vi at prammen er sveiset sammen av 30 mm stålplater. Dette gir et tverrsnitt som vist i figur nedenfor. Beregn arealtreghetsmomentet (I) for et slikt tverrsnitt.
Dette gjøres som forklart for tverrsnitt B på side 5-11.

b) Beregn maksimal spenning på undersiden av bunnen. Oppgi spenningen både i N/mm^2 og MPa.

c) Hvor stor er sikkerheten mot flyting hvis det benyttes stål med flytegrense 200 MPa.
I virkeligheten er sikkerheten større fordi bunnen vil bli utført med stivere som vist på side 6-20.



Figur til oppgave 6.5

Oppgave 6.6

Det vises til eksempel 6.4, side 6-6.

a) Vis at bøyemomentdiagrammet blir som illustrert på tilhørende figur

b) Vis at skjærkraftdiagrammet blir som illustrert på figuren

c) Broplanken er 15 cm bred og 3 cm tykk. Den er utført av furu, som har en trykkfasthet på 40 MPa. Vil den tåle belastningen?

Oppgaver

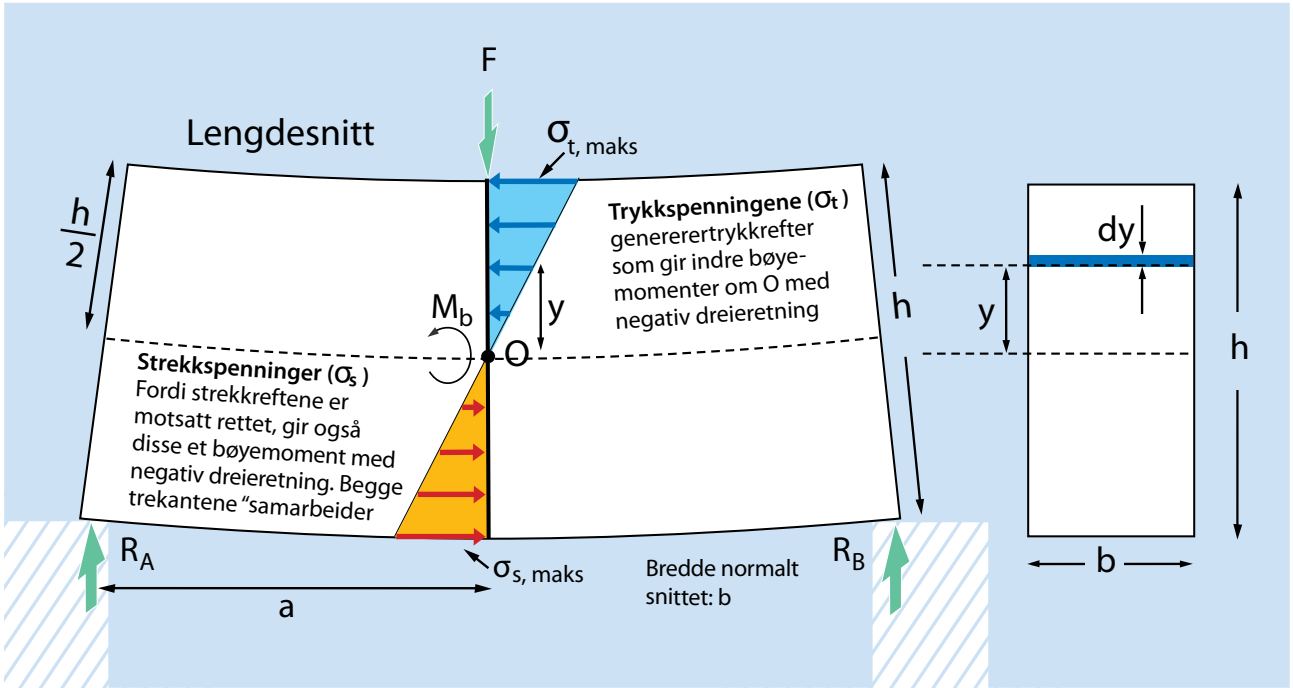
Oppgave 6.7
Det vises til eksempel 6.5, side 6-7.
a) Kontroller at indre bøyemomenter i snittene D og E er som oppgitt.

Oppgave 6.8
Det vises til eksempel 6.5, side 6-7og figur side 2-15. Geirs flåte er laget av hard isopor med strekkfasthet 200 kPa og skjærspenningsfasthet 200 kPa.
a) Beregn maksimal strekkspenning
b) Beregn maksimal skjærspenning
c) Hvorfor vil spenningene i virkeligheten være mindre enn de som er beregnet?
d) Bestem den minste tykkelsen som flåten kan lages med uten at den bryter sammen når Geir setter seg på den

Oppgave 6.9
Det vises til eksempel 6 på side 6-7.
a) Legg inn 6 snitt med like store avstander, og vis at bøyemomentdiagrammet blir som framstilt i tilhørende figur
b) Vis at skjærkraftdiagrammet blir som lagt inn i den samme figuren

Oppgave 6.10 (vanskelig, krever kjennskap til integralregning)
Vi skal i denne oppgaven utlede at arealtregheitsmomentet for et rektangulært tverrsnitt er $I = b \cdot h^3/12$. Det vises i den forbindelse til figur på side 6-9 av en bjelke som utsettes for et bøyemoment. Bjelken er beskrevet mer detaljert nedenfor.

a) Strekk- og trykkspenningene i tverrsnittet gir indre krefter. Disse genererer indre bøyemomenter om punkt O. Disse må balansere med de ytre bøyemomenter som påvirker den frilagte bjelkedelen. Sett først opp et uttrykk for den kraften som arealet $b \cdot dy$ utsettes for, og deretter et uttrykk for det momentet som kraften gir om punkt O.
b) Lag et integral over høyden h/2. Når dette så multipliseres med 2, framkommer det totale indre momentet som strekk- og trykkspenningene til sammen gir om punkt O.
c) Løs integralet.
d) Utled ligningen for bestemmelse av maksimalt bøyemoment som er gitt på side 6-9.



Oppgave 6.11

I denne oppgaven skal vi bekrefte de beregnede verdier på bøyemomentene og skjærkreftene i figurene på side 6-18.

a) Vis at et volumdeplasement V= 97600 m^3 svarer til et tyngdedeplasement $\Delta = 980 \cdot 10^3$ kN

b) Ta en utskrift av side 6-18 i relativt stor skala. Mål arealet av oppdriftstrapeset, og beregn skalaen i kN pr. mm^2, som også må gjelde for tyngdearealene.

c) Fordelingen av både tyngde- og oppdriftsbelastninger er markert med sorte linjer og middelverdien pr. seksjon med grønne linjer. Kontroller for seksjon DE at differensen mellom arealene under middellinjene for oppdrift og tyngder gir en resulterende belastning på denne seksjonen omtrent lik $52 \cdot 10^3$ kN. Dette er en verdi som er bestemt fra et dataprogram, og vi kan ikke vente full overensstemmelse.

d) Kontroller at fordelt, resulterende belastning pr. m skipslengde som ført opp i figur c, er riktig.

e) Kontroller at opptegnet bøyemomentkurve er korrekt ved å beregne verdien i snitt D som er stikkprøve.

f) Kontroller at opptegnet skjærkraftkurve er korrekt ved å beregne verdien i snitt D som er stikkprøve.

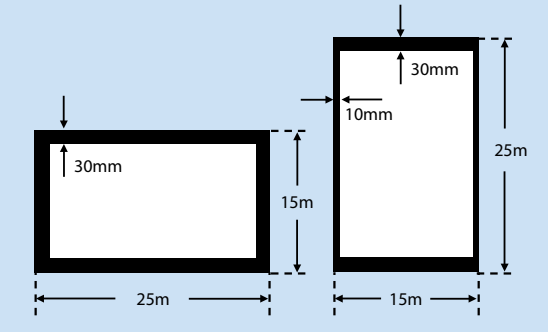
Oppgave 6.12

Vi skal bekrefte beregnede verdier på bøyemomenter og skjærkrefter for skip utsatt for saggingbelastning som vist i figurene på side 6-19.

a)-f) Dette gjøres som beskrevet under oppgave 6.11

Oppgave 6.13

Oppgaven gir eksempler på utforming av to tverrsnitt av skrogbjelken som gir omtrent samme bøyespenning, men svært ulik skjærspenning, ved en gitt last. De to utformingene har samme innvendige tverrsnitt og dermed samme innvendige lastevolum ved en gitt skipslengde. Målsatte dimensjoner framgår av figur. Begge skrogbjelkene utsettes for sagging med et maksimalt bøyemoment lik $3{,}0 \cdot 10^6$ kNm og en maksimal skjærkraft lik $60 \cdot 10^3$ kN.



Figur til oppgave 6.13

a) Beregn motstandsmomentet (I) for begge tverrsnittene

b) Beregn maksimal strekkspenning i N/mm^2 for begge tverrsnittene

c) Beregn maksimal skjærspenning i N/mm^2 for begge tverrsnittene.
Det forutsettes at skjærkreftene tas opp av sideflatene

d) Beregn hvor mange tonn stål som går med til en 100 m lang pram som utformes med hvert av tverrsnittene. Endefaltene gjøres rektangulære og med 30 mm platetykkelse i begge tilfeller. Regn med at stålets tetthet er 7,85 tonn/m^3

e) Hva kan vi lære av denne oppgaven?

Oppgave 6.14

a) Løs "Vi undrer oss på"- oppgaven på side 6-23

b) Vis at kreftene som virker i stavene FD, DG og GB, er som oppført (inklusiv fortegnene).

Oppgave 6.15

a) Vis at et skip med massedeplasement 5000 tonn og hastighet 4 knop har en kinetisk energi på ca. 10 MJ

b) Skipet kolliderer med en fast fagverksplattform og stopper etter at det har beveget seg 1,5 m. Hvor lang tid varer sammenstøtet? Regn med konstant akselerasjon.

c) Hvor stor er akselerasjonen under sammenstøtet?

Oppgaver

Oppgave 6.16
Et offshore serviceskip har et massedeplasement på 6000 tonn og en hastighet på 6 knop. Det kolliderer med en flytende plattform med massedeplasement på 35000 tonn. Etter sammenstøtet beveger skipet og plattformen seg som ett legeme. Vi regner med at ankersystemet ikke påvirker plattformens bevegelse under støtet. Det virker heller ingen andre ytre krefter på systemet skip/plattform under kollisjonen. Da kan vi bruke loven om bevaring av bevegelsesmengde for sammensatte systemer, se for eksempel Ergo, Fysikk 2.

a) Hvor stor hastighet har felleslegemet mot slutten av støtet?
b) Hvor stor andel av sin kinetiske energi mistet skipet under sammenstøtet?
c) Hva ble den tapte energien brukt til?

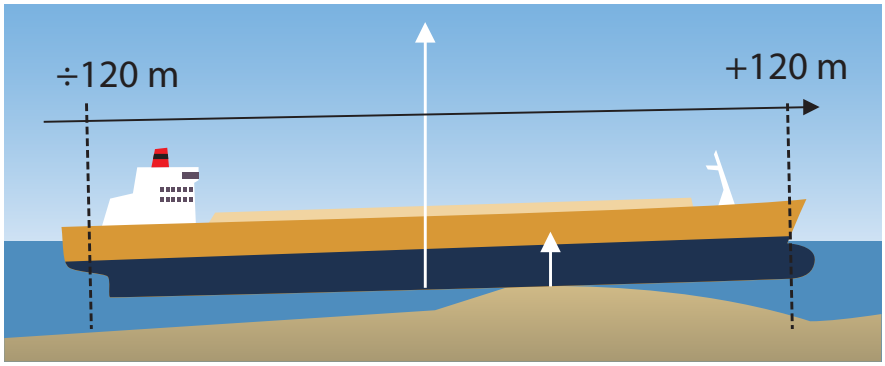
Oppgave 6-17
Et skip med massedeplasement 5000 tonn kolliderer med en fast plattform.
Under sammenstøtet deformeres en stav uten å ryke. Staven har en diameter på 0,7 m og en godstykkelse på 30 mm. Lengden er 21 m og ifølge regelverket kan en slik stav maksimalt deformeres 2,1 m uten at brudd oppstår. Materialets flytespenning er 340 MPa.

a) I ettertid er det uenighet om hvor stor fart skipet egentlig hadde før sammenstøtet. Beregn hvor stor farten maksimalt kan ha vært, forutsatt at det er staven alene som har absorbert skipets kinetiske energi.
b) Skipet selv fikk noen deformasjoner i baugen. Tilhørende deformasjonsarbeid vurderes til å utgjøre 20 % av det deformasjonsarebid som staven maksimalt kunne absorbere. Hvor stor fart kan skipet maksimalt ha hatt hvis vi tar hensyn til dette i beregningene?

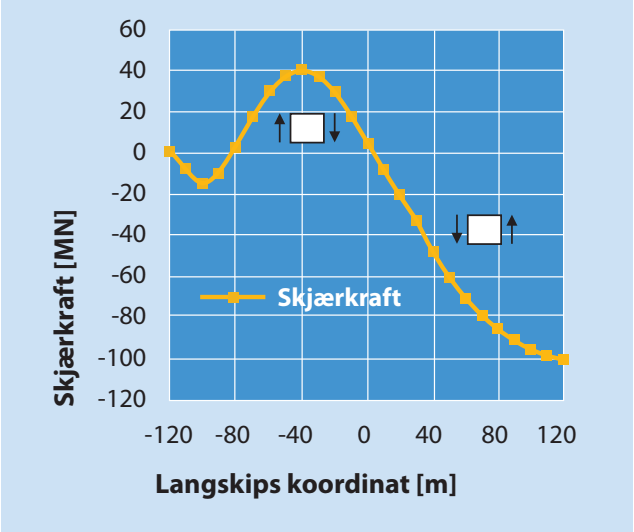
Oppgave 6.18 (vanskelig)
Et skip har grunnstøtt og står fast på et kontaktpunkt med sjøbunnen. Målinger av dypgang ved forre og aktre perpendikulær viser betydelige endringer. Ved hjelp av skipets lastkalkulator har kapteinen kunnet beregne langskips skjærkraft og bøyemoment i skrogbjelken på grunnlag av de målte dypganger og de kjente fordelinger av lettskipsvekt og dødvekt. Kontaktkraften mot sjøbunnen er i denne beregningen ukjent og brukes ikke. Resultatet av beregningene er vist i figur, hvor skjækraftens retning også er indikert.

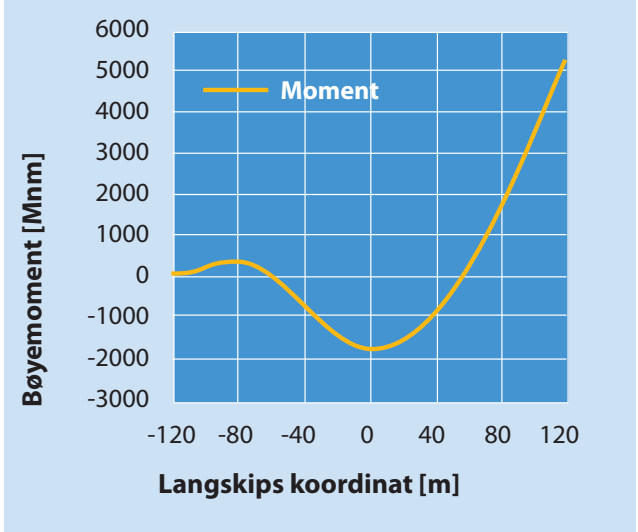
Skipets lengde mellom perpendikulærene er 240 m. Vi kan regne med at skipets motstandsmoment er 35 m^3, at nøytralaksen ligger midt mellom dekk og bunn og at motstandsmomentet er konstant over skipets lengde. Skipet er bygget i normalstål med flytespenning 235 MPa

a) Kapteinen er blitt fortalt at du har sommerjobb om bord og at du med stor interesse studerte kapitlet om konstruksjoners styrke i boka Havromsteknologi da du fulgte faget Teknologi og forskningslære i vgs. Kapteinen ber deg derfor bruke de beregnede skjærkrefter og bøyemomenter til å bestemme størrelsen på grunnstøtingskraften og langskips posisjon til kontaktpunktet
b) På grunnlag av grunnstøtingskraftens størrelse og posisjon, beregnet i a), ber han deg prinsipielt skissere skjærkraftdiagram og bøyemomentdiagram hvor grunnstøtingskraften er tatt hensyn til.
c) Kapteinen er bekymret for at skroget ikke skal tåle påkjenningene det utsettes for i grunnstøtingssituasjonen, og brekke i to. Han ber deg komme med en vurdering av risikoen for dette, helst ved å beregne sikkerheten mot flyting.



Figur til oppg. 6.19
Grunnstøtt skip



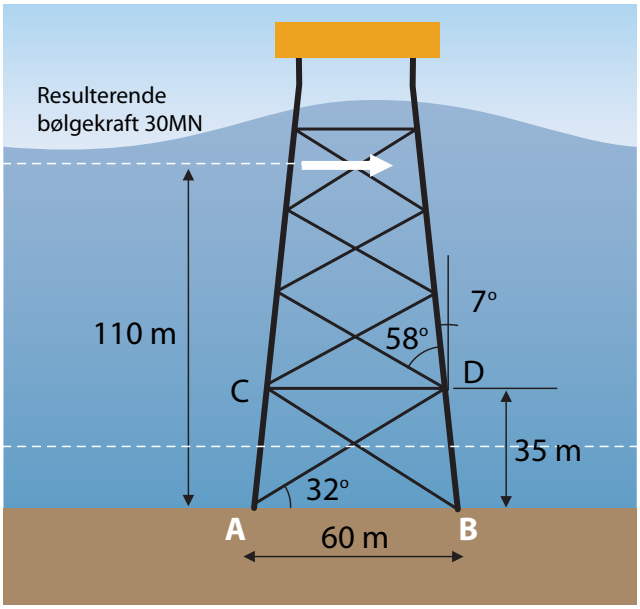


Figurer til oppgave 6.19. Langskips skjærkraft og bøyemoment i skrogbjelken når grunnstøtingskraften ikke er tatt med.

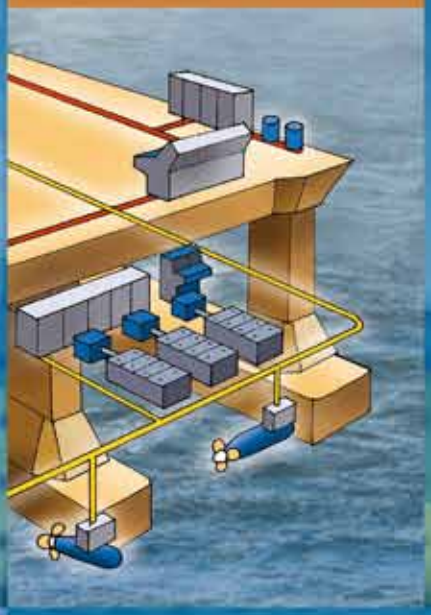
Oppgave 6.19 (vanskelig)
Figur viser et plant fagverk i en jacket. Plattformen er utsatt for bølgekrefter som antas å ha en resultant på 30 MN, se figuren.

a) Bestem aksialkreftene i beina og i skråstavene i etasjen nærmest bunnen.

b) Avmerk med farger hvor det opptrer trykkstaver (blått) og strekkstaver (rødt) i hele fagverket.



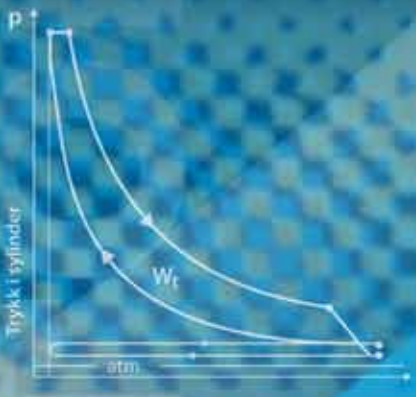
Figur til oppg. 6.20. Plant fagverk i en fagverksplattform.



Forfattere: Leif Lundby og Vilmar Æsøy

Produksjon av mekanisk og elektrisk energi til havs

Havromsteknologi



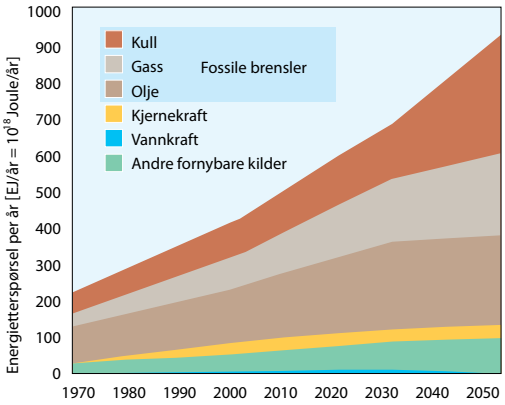
Innhold

Innledning....2
Grunnleggende energifysikk....4
Grunnleggende termofysikk....6
Produksjon av mekanisk og elektrisk energi til havs, oversikt over metoder....8
Varmemotorer. Definisjoner og oversikt....10
Stempelmotorer med indre forbrenning: otto- eller dieselmotor, totakts- eller firetaktsmotor?....12
Dieselmotrers arbeidsmåte....14
Dieselmotorers arbeidsevne og effekt....16
Valg av dieselmotor ved et gitt effektbehov....18
Dieselmotorers brenselsforbruk....20
Dieselmotorers mekaniske påkjenning....22
Dieselmotorers plassbehov. Gir og clutch....24
Brensler for diesel-, gass- og bensinmotorer. Forbrenningslære....26
Forbrenning i diesel-, gass- og bensinmotorer....28
Gassturbiner....30
Gassturbin og dampturbin – kombianlegg....33
Produksjon av elektrisk energi ved hjelp av brenselsceller....34
Energioverføring om bord i skip....36
Mekanisk energioverføring....36
Elektrisk energioverføring....38
Hydraulisk energioverføring....40
Sammenligning mellom ulike systemer....42
Oppgaver....44
Referanser....48

NTNU
Institutt for marin teknikk

7

Kapitlet handler om hvordan skip og andre marine konstruksjoner til havs kan skaffe seg energi i former som kan utnyttes til skipets framdrift og andre formål om bord. Dette betyr at det må skaffes tilgang til mekanisk og elektrisk energi, noe som hittil har vært forbundet med store utslipp av den miljøskadelige gassen CO_2. I kapitlet brukes betydelig plass på vurdering av Hvordan slike utslipp kan reduseres også ved forbrenning av fossile brensler. For øvrig vises til eget kapittel 13 om hvordan havets fornybare ressurser kan utnyttes.



Verdens energiforbruk siste 40 år og prognose for energibehovet i de neste 40 år, fordelt på energikilder.

Fra IEA Reference scenario

Energiforbruk på verdensbasis. Globale miljø/klima-problemer

All øking i levestandard og alle viktige framskritt i menneskehetens historie har blitt fulgt av en øking i energiforbruket. Sammen med at det har blitt stadig flere mennesker på jorda, har dette resultert i en stadig økende etterspørsel etter energi. Utviklingen av energiforbruket i verden siden 1970 er vist nedenfor. Figuren viser også hvordan man antar at forbruket vil fortsette å stige i de nærmeste tiårene.

Som det framgår, er det forbruket av de fossile brenslene (kull, olje og gass) som hele tiden har stått for det aller meste av energiforbruket. I dag er denne andelen i overkant av 80 % , og det synes som om bruken av disse brenslene både absolutt og relativt sett vil fortsette i de nærmeste tiårene, selv om alternative energiformer også vil bli brukt i stadig økende grad. Dette er uhyre bekymringsfullt. Det er få som i dag tviler på at utslippet av klimagassen CO_2 fra de fossile brenslene etter hvert vil gi enorme miljø/klima-problemer på grunn av oppvarming av jorda. Det må derfor være en forutsetning for den utvikling som er skissert i figuren, at det utvikles metoder til å kontrollere disse CO_2-utslippene

Det er altså av avgjørende viktighet at det gjøres noe på global basis for å stoppe økingen av CO_2-utslippene. EU har derfor satt seg følgende mål, som skal gjennomføres i disse landene innen år 2020, og som også Norge vil slutte seg til:

- Produksjonen av fornybar energi (vindkraft, vannkraft og bioenergi) skal økes med 20 %
- Utslippene av klimagassen CO_2 skal reduseres med 20 %
- Energiforbruket skal reduseres med 20 %

Energiforbruk i Norge, innenriks og utenriks. Havet som energikilde.

Figuren på høyre side viser hvor mye landet vårt bruker av energi årlig, både innenriks og utenriks. Figuren er selvforklarende. Den er interessant fordi den viser at energiforbruket til norske aktiviteter knyttet til havromsteknologier (innenriks og utenriks, farget med blått), i dag utgjør mer enn det samlede industrielle og private forbruket i fastlands-Norge. Dette har to viktige konsekvenser, som beskrevet i de to første kulepunktene nedenfor. Det tredje kulepunktet peker på hvordan havromsteknologier i framtida også kan bidra til å løse de miljø/klima-problemer som i dag bekymrer hele verden.

- Havromsteknologiene er av kolossal positiv betydning for det norske samfunnet. Det er nemlig stort sett slik at et stort energiforbruk innenfor en virksomhet, normalt gir tilsvarende store nærings- /industrimessige aktiviteter.

Produksjon av mekanisk og elektrisk energi til havs

- Det følger meget store miljømessige utfordringer med disse teknologiene. Det er nemlig også slik at praktisk talt alt energiforbruk knyttet til aktivitene til havs i dag kommer fra forbrenning av fossile brensler. Som vi skal se senere, er det tilnærmet proporsjonalitet mellom fossilt energiforbruk og CO_2-utslippet. Derfor er det mulig å etablere en skala for CO_2-utslipp ved siden av skalaen for energiforbruket, som vist i figuren.
- Havet omfatter enorme fornybare energikilder (vind-, bølge- og havstrøm-kraft) som i framtida kan utnyttes til å redusere miljøproblemene, se kapittel 13.

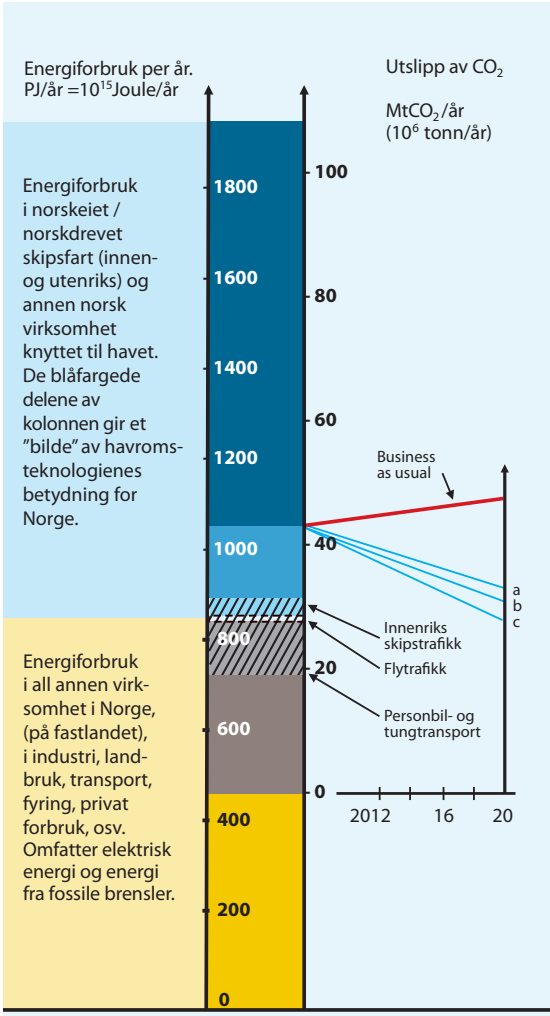
Det er disse tre punktene som er hovedgrunnene til at det har blitt laget en egen lærebok som gir smakebiter av havromsteknologiene og som viser hvordan disse teknologiene bygger på anvendelser av den viktige fysikken og matematikken som undervises i videregående skoler. Det er nemlig allerede her at utdanningen av de som skal arbeide med løsninger av miljøproblemene i framtida, egentlig starter.

MÅL

Etter å ha studert dette kapitlet skal du:

- Ha blitt godt kjent med de viktigste temaene innen begrepet energi, som er et av de mest sentrale begreper innen naturvitenskap og teknologi.
- Ha blitt kjent med grunnleggende temaer innen termodynamikken.
- Ha blitt godt kjent med virkemåten til dieselmotorer, ottomotorer (gass og bensin) og gassturbiner. Kunne beregne disses brenselsforbruk og CO_2-utslipp.
- Kjenne til kjemisk oppbygning av fossile brensler, kjemiske reaksjoner ved forbrenning av disse og beregning av CO_2-dannelse per kg brensel. Vite hvorfor CO_2-utslippene er så skadelige for jordas framtidige klima.
- Ha fått god oversikt over alternative brensler, for eksempel biobrensler.

Illustrasjon av energiforbruk og utslipp av CO_2 fra norskeide/norskdrevne virksomheter.



Energiforbruk og CO_2 utslipp fra norskeiet/norskdrevet utenriks skipsfart

Energiforbruk og CO_2 fra offshore olje/gass-virksomhet

Energiforbruk og CO_2 fra innenriks transport

Energiforbruk og CO_2 fra industri, landbruk og privat

Bruk av elektrisk energi i industri, landbruk og til private formål

Utslippene slik de skal reduseres:

a. iflg. Klimaforliket i Stortinget jan. 08.
b. iflg. EU krav
c. iflg. Regjeringens mål når kvotehandel inkluderes

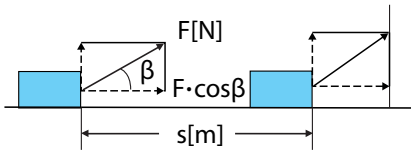
Grunnleggende energifysikk

1. Forskyvingarbeid (translasjonsarbeid eller skyvekraftarbeid)

En kraft F utfører et arbeid W når den forskyves en strekning s, men det er bare komponenten F · cos β som bidrar

$W = F \cdot s \cdot \cos\beta$

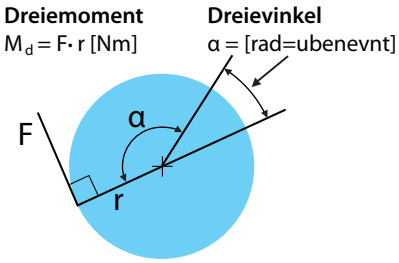
Måleenheten for arbeid er J=N · m (Joule= Newton · meter)



2. Rotasjonsarbeid.

Dersom kraften utfører en sirkelbevegelse, gir den et rotasjonsarbeid, se side 3-24

$W = M_d \cdot \alpha = F \cdot r \cdot \alpha$

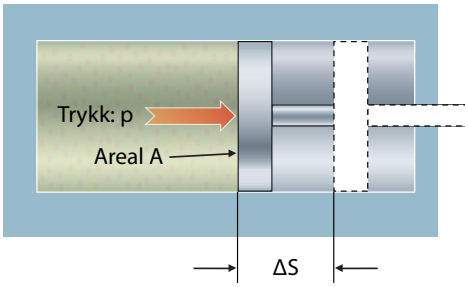


3. Volumendringsarbeid

Gasstrykket forskyver stemplet en strekning ΔS. Hvis trykket er konstant, blir:

$W = \text{kraft} \times \text{vei} = p \cdot A \cdot \Delta S = p \cdot \Delta V$

Dersom trykket varierer, se side 7- 6)



Tre definisjoner av begrepet arbeid, basert på bruk av mekaniske krefter. Også elektriske krefter kan lage arbeid, se side 7-38. Videre kan arbeid alltid defineres med utgangspunkt i effekt: W=P · t , hvor P er effekt og t er tid [J=W · s]

Grunnleggende stoff om energi, delvis repetisjon

- **Hva er egentlig energi?** Det er ikke lett å forklare dette. Mange forsøker å ta utgangspunkt i at energi er *noe som kan påvirke omgivelsene.* Mer presist kan vi si at *energi er noe som gir et legeme eller et system evne til å utføre arbeid.*

- **Hva er arbeid? Hvilken måleenhet har arbeid og dermed også energi?** Arbeid defineres og måles primært som vist i punkt 1 til venstre. Også energi må måles i Joule (J). Det vises til side 3-24 når det gjelder arbeid ved roterende bevegelse. Punkt 3 viser en tredje variant av arbeid, som er viktig i motorteknologien, se side 7-6.
- **Hva sier energiloven?** Energi kan verken skapes eller forsvinne, men den kan overføres mellom legemer eller omformes. Loven kalles også for energiprinsippet.

- **Hvilke former kan energi eksistere i?** Energi har to hovedformer: potensiell energi (stillingsenergi) og kinetisk energi (bevegelsesenergi). Den kan videreinndeles i seks energiformer:
  1) Mekanisk energi: Potensiell eller kinetisk energi knyttet til legemer eller partikler
  2) Kjemisk energi: Potensiell energi knyttet til molekylenes struktur
  3) Indre energi: Hovedsakelig kinetisk energi knyttet til temp. bevegelser hos atomer og molekyler i en gass, væske eller et fast stoff
  4) Elektrisk energi: Potensiell energi i et elektrisk felt, som setter elektroner i en leder i bevegelse
  5) Strålingsenergi: Elektromagnetisk stråling fra sola
  6) Kjerneenergi: Potensiell energi knyttet til atom*kjerners* struktur

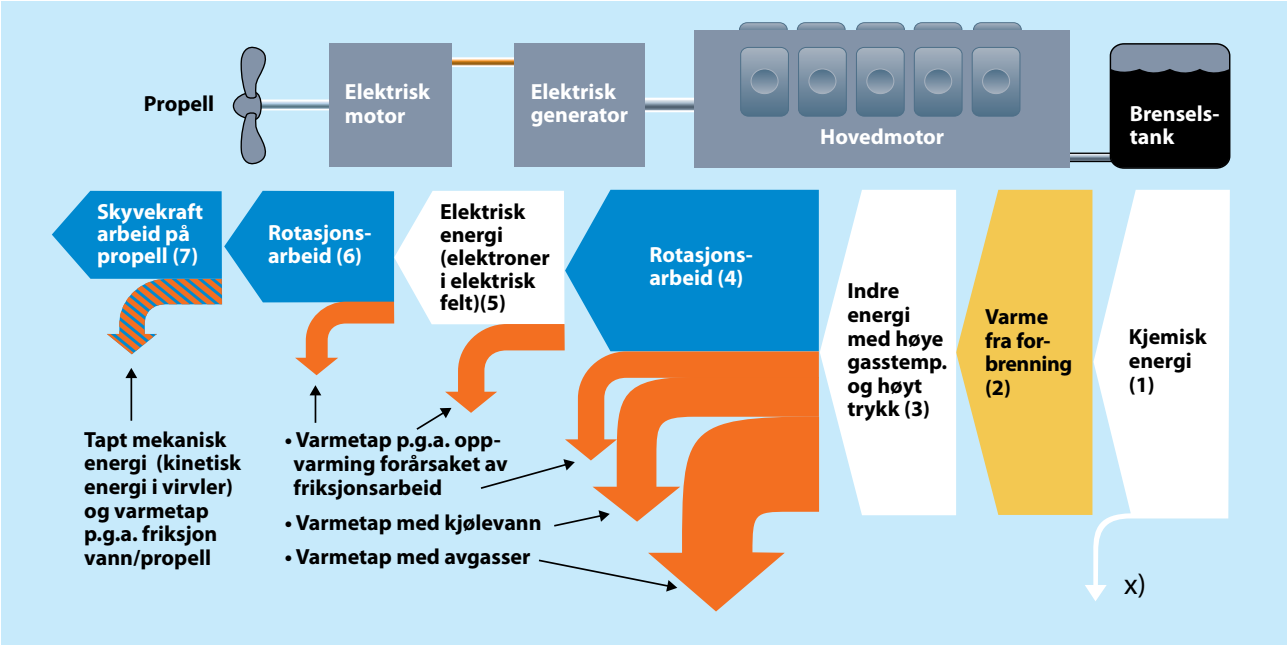
- **Hvordan kan energi overføres eller omformes? Hva er varme?** Energioverføring og energiomforming kan skje på to måter:
  1) Ved hjelp av *arbeid*. Når krefter eller dreiemomenter gjør et arbeid, overføres det alltid energi fra ett legeme til et annet. Samtidig kan energien omformes.
  2) Ved hjelp av *varme*. Mellom to systemer med forskjellig temperatur vil det overføres energi fra systemet med høy temperatur til systemet med lavere temperatur gjennom stråling eller direkte kontakt. Varme er overført energi hvor det er en temperaturforskjell som er "drivkraften" for transporten.

- **Hva er en energikjede?** Denne viser hvordan energi overføres fra et legeme eller system til et annet eller fra en form til en annen form.
- **Hva mener vi med en energikilde og en energibærer?** Kilden er den ressursen som vi henter energien fra, og bæreren er det som frakter energien.
- **Hva mener vi med fornybar energikilde og fossil energikilde?** En fornybar kilde går ikke tom, men fylles stadig opp igjen med energi som kommer direkte eller indirekte fra solas stråling. Fossile kilder er brensler som er dannet av organismer som levde for millioner av år siden og er altså *ikke fornybare*.

Energikjede ved dieselelektrisk framdrift av et skip

Eksempel 7.1. I et dieselektrisk skip drives propellen av en elektromotor. Denne forsynes med elektrisk strøm fra en elektrisk generator som er koblet til en dieselmotor som går på en marin dieselolje. Lag en figur hvor framdriftssystemet framstilles som en energikjede. Forklar hva som foregår i kjeden ved å bruke mest mulig av terminologien fra forrige side. Løsning er gitt i figur og nedenfor.

Energikjede som viser hvordan arbeid og varme overfører energi i et dieselelektrisk framdriftsanlegg



1. Energikilden er framstilt av en fossil råolje (se sidene 7-26 og 10-9) og er altså ikke fornybar. Energien er lagret i oljen som *kjemisk energi*. Dette er en potensiell energi.
2. Dieseloljen sprøytes inn i motorens sylindre hvor den forbrenner. Forbrenningsproduktene (primært CO_2- og H_2O-molekyler) får temperaturer på mer enn 3000 grader C og varmer opp øvrige gasser i sylindrene slik at temperaturen jevner seg ut. Den kjemiske energien resulterer altså i *varme*. En meget liten del (x, se figur) forbrenner dårlig/ikke i det hele tatt.
3. Etter forbrenningen eksisterer energien som *indre energi* i sylinderladningene, som nå holder ca. 2000 grader C. En dieselmotor er en stempelmotor, det vil si at sylinderladningene er fullstendig innestengt. Trykket på gassen stiger derfor til ca. 200 bar på grunn av oppvarmingen etter forbrenningen.
4. Pga. det høye trykket skyves stemplene nedover i sylindrene. Dermed utfører stemplene *forskyvningsarbeid* som omformes til *rotasjonsarbeid* vha. et veivsystem. Det opptrer tre tapsposter under prosessen.
5. Hovedmotoren er direkte koblet til en generator som produserer *elektrisk energi* i form av elektrisk felt og strøm. Det er det tilførte arbeid som muliggjør omformingen til elektrisk energi.
6. Den elektriske strømmen tilføres elektromotoren som utfører et elektrisk *arbeid*. Som i hovedmotoren, er arbeidet knyttet til et dreiemoment, altså en rotasjon
7. Rotasjonsarbeidet tilføres propellen. Her omformes dette til et *forskyvningsarbeid* slik at skipet får den nødvendige skyvekraft. Noe av det tilførte arbeidet tapes gjennom kinetisk energi i virvler.
8. *Tapsposter*. Gjennom hele kjeden opptrer diverse tap av energi, som framgår av figuren. Disse gir til slutt varmeutveksling med omgivelsene.

Diverse former for lagret energi

Energi omformet fra en form til en annen vha. varme (2)

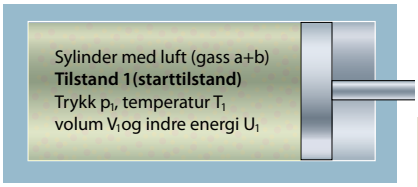
Energi omformet fra en form til en annen v.hj.a. forskyvnings/rotasjonsarbeid (4) og elektrisk arbeid (6)

Tapt energi, til slutt som varme

Vi undrer oss på:

Ordet hybrid brukes bl.a. om noe som er en krysning av to arter. F.eks. kan en ekte hybridbil bli drevet av både en forbrenningsmotor og en elektrisk motor samtidig. Kan vi kalle et dieselelektrisk skip for et hybridskip?

Grunnleggende termofysikk



Gjennomsnittlig kinetisk energi pr. molekyl for toatomige molekyler:

$$E_K = \frac{5}{2} \cdot k \cdot T_1$$

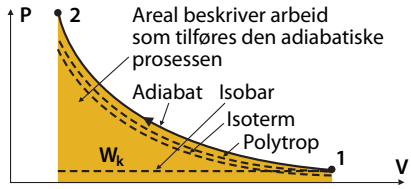
Indre energi for gass i sylinder:

$$U_1 = \frac{5}{2} \cdot k \cdot T_1 \cdot N_{tot} \ [J]$$

Mengder av gassene a og b:

$$m_L = m_a \cdot N_a + m_b \cdot N_b \ [kg]$$

Her er: $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ *[J/K] (Bolzmanns konstant, felles for alle gasser)*
T = abs. temp [K]= 273 + cel.temp
m_a *og* m_b *= molekylmasser [kg]*
N_{tot} *=antall molekyler=*N_a*+*N_b*, kan finnes av tilstandslign.*



Tilstandsligningen:

$$\frac{p_i \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} = \text{konstant}$$

Konstanten i denne ligningen kan uttrykkes v.hj.a Bolzmanns konst:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = k \cdot N_{tot}$$

Adiabatisk tilstandsforandring:

$$p_1 V_1^{\kappa} = p_2 V_2^{\kappa} = konst.$$

κ *= adiabteksp. = 1,4 for luft (avtar med temp.)*

Begreper og ligninger for tilstandsforandringer ved kompresjon av en blanding av to toatomige gasser (a + b), f. eks. luft (N_2+O_2***)***

Termofysikken er av spesiell betydning i motorteknikken, og vi må starte med en repetisjon og supplering av sentralt stoff fra dette fagområdet.

Temperatur og indre energi

Stoffer er bygget opp av atomer og molekyler. Disse er alltid i bevegelse, enten stoffet er fast, flytende eller i gassform. I faste stoffer utsettes molekylene for vibrasjoner, mens de i væsker og gasser får både translasjoner (forflytninger) og rotasjoner. Disse bevegelsene kaller vi **temperaturbevegelser. Temperatur er et mål for hvor stor molekylenes gjennomsnittlige kinetiske energi er.** Sammenhengen mellom denne energien og temperaturen framgår som vist til venstre.

Stoffer har også en indre *potensiell* energi fordi det virker krefter mellom molekylene. *Den indre energien til en stoffmengde er summen av de indre kinetiske energiene (termiske energier) og den indre potensielle energien.* I gasser er den sistnevnte av liten betydning fordi det er relativt stor avstand mellom molekylene. I væsker og faste stoffer spiller derimot de indre potensielle energiene stor rolle.
Som oftest er det *forandringer* av de indre energiene som er mest aktuelle i beregninger. Figurene til venstre viser tilstandene før og etter kompresjonen av lufta i sylinderen til en forbrenningsmotor. Forandringen i indre energi under kompresjonen blir: $\Delta U = U_2 - U_1$.

Gasstrykk. Tilstandsligningen for gasser. Adiabatisk tilstandsforandring

Når gassmolekylene støter mot veggene i sylinderen, oppstår det krefter mot veggene. Med gasstrykk mener vi, som tidligere definert, kraft per flateenhet. Oftest er det mest praktisk å bruke bar som måleenhet for trykk, 1 bar = 10^5 Pa. *Gasstrykket bestemmes av antall molekyler som treffer hver flateenhet og hastigheten til disse, altså temperaturen.* Trykket i tilstand 2 i figuren til venstre er derfor større enn i tilstand 1.

For trykk p, volum V og temperatur T i en avstengt gass gjelder at p·V/T=konstant. Konstantens størrelse er avhengig av hvor stor gassmengde som er blitt avstengt. Den er proporsjonal med antall molekyler (N_{tot}) og kan uttrykkes som k·N_{tot}, hvor k er Bolzmanns konstant, som er felles for alle gasser. Dermed kan vi altså skrive:

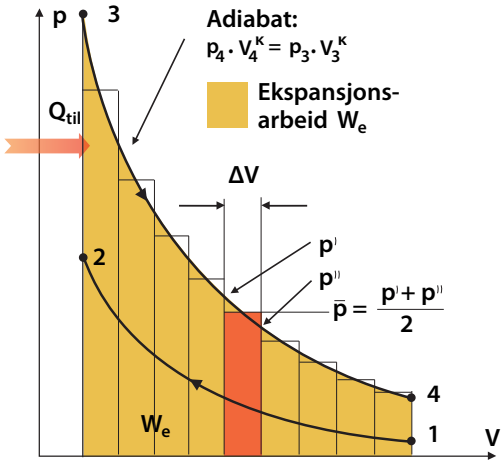
$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = k \cdot N_{tot} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}$$

Tilstandsforandringen 1-2 kan foregå på forskjellige måter. Noen av disse kan for en kompresjonsprosess i en sylinder beskrives og illustreres i et p-V-diagram slik:

- **Isobar.** Tilstandsforandring med så sterk varmebortførsel at p=konstant. Dette gir en horisontal graf i p-V-diagrammet, med ligning: $V_1/T_1 = V_2/T_2$
- **Isoterm.** Tilstandsforandring med en varmebortførsel som medfører at T=konst. Grafen blir en hyperbel med lign. $p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$
- **Adiabat.** Tilstandsforandring som er så rask at det ikke blir tid til varmebortførsel til omgivelsene i det hele tatt. Da gjelder ligningen $p_1 \cdot V_1^{\kappa} = p_2 \cdot V_2^{\kappa}$ hvor κ er såkalt adiabateksponent, se fig. til venstre
- **Polytrop.** Tilstandfsorandring som skjer raskt, men likevel med noe varmebortførsel. Ligning: $P_1 V_1^{n} = P_2 V_2^{n}$ hvor $1 < n < \kappa$

Volumendringsarbeid

Arbeid som utføres av en gass i en sylinder med bevegelig stempel, kan ifølge side 7-4 beregnes av ligningen $W=p \cdot \Delta V$, hvor p er et konstant trykk og ΔV er volumøkingen under stempelbevegelsen. Imidlertid varierer trykket som regel, f.eks. fra verdien p_3 til p_4 under ekspansjonen, som vist på figur til høyre. Vi kan da gå fram som beskrevet i figurteksten. Tilsvarende kan kompresjonsarbeidet W_k illustreres som fargelagt areal i nederste figur til venstre. Under ekspansjonen utføres arbeidet ***av*** gassen i motsetning til kompresjonarbeidet, som gjøres ***på*** gassen.



Varmetilførsel og ekspansjonsarbeid i en stempelmotor
Mellom 2 og 3 foregår en varmetilførsel Q_{til} som er så rask at stemplet ikke får tid til å bevege seg. Her utføres ikke noe arbeid. Mellom 3 og 4 ekspanderer gassen. For den viste kolonnen med middeltrykk p kan vi tilnærmet bruke ligningen for volumendringsarbeid med konstant trykk fra side 7-4. Totalt ekspansjonsarbeid blir dermed:

$W_e = \Sigma (p \cdot \Delta V)$

Arbeidet framkommer som det fargelagte arealet under ekspansjonslinjen.

Termofysikkens to lover (hovedsetninger). Energikvalitet

Mens energiloven sier noe om energi generelt (se side 7-4), handler termofysikkens to lover om indre energi, varme og arbeid. Du skal ha lært om disse lovene tidligere i fysikken, men siden de er så viktige, ser vi på dem en gang til.

Termofysikkens første lov. Ved alle prosesser som foregår i et system, blir forandringen av systemets indre energi (ΔU) mellom to tilstander lik summen av arbeidet som gjøres på gassen (W) og varmen som tilføres gassen (Q), $\Delta U = W + Q$. Det må regnes med fortegn. ΔU er positiv når den indre energien øker, W er positiv for arbeid som gjøres på systemet og Q er positiv for varme som tilføres. F.eks. får vi:

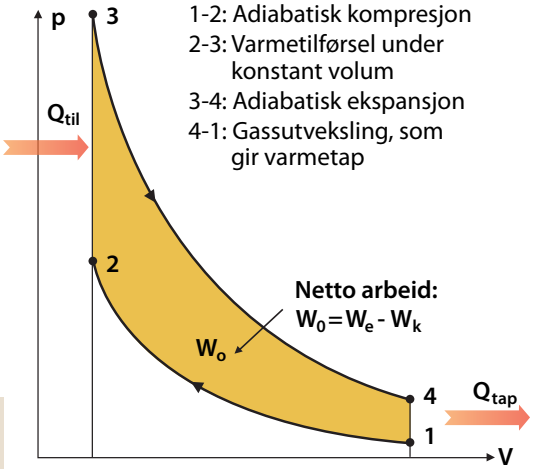
$\Delta U_{1\text{-}2} = W_k$ $\quad$ $\Delta U_{1\text{-}3} = Wk + Q_{til}$ $\quad$ $\Delta U_{1\text{-}4} = W_k + Q_{til} - W_e$

Av det første eksemplet ser vi at **det tilførte arbeidet under kompresjonen må resultere i økt indre energi, altså økt temperatur på gassen.** Dette er et viktig poeng for dieselmotorer.

Energikvalitet. Generelt er det som oftest energiens *evne til å gjøre et arbeid* (drive fram f.eks. skip) som interesserer mest når vi vurderer energi. Hvis en stor del av energien kan utnyttes til nyttig arbeid i en prosess, kaller vi energien for *høyverdig*. Prosessens virkningsgrad er da høy. Dette er f.eks. tilfelle for mekanisk og elektrisk energi, som noen ganger kan omdannes til arbeid i sin helhet. I *lavverdig* energi er det bare en begrenset del som kan gjøres om til arbeid. Indre energi er eksempel på dette.

Termofysikkens andre lov. Denne handler om betingelsene for at indre energi kan omdannes til arbeid. Loven kan formuleres på mange ulike måter, men i forbindelse med forbrenningsmotorer er følgende formuleringer mest interessante:

- En maskin kan aldri omforme **all** tilført indre energi til mekanisk arbeid. Noe varme vil alltid gå tapt til omgivelsene. Virkningsgraden kan aldri bli 1,0
- For å oppnå høy virkningsgrad må varmetilførselen (forbrenningen) foregå ved en temperatur som på forhånd er høy. Med andre ord er den indre energien i en gass av høyere kvalitet jo høyere temperatur gassen har.



Komplett arbeidsprosess under idealiserte forhold for en forbrenningsmotor av stempelmotortype
Prosessen kalles ottoprosess og blir nærmere beregnet på side 7-12

Vi undrer oss på:

Hvordan kan vi forklare på en grei måte forskjellen mellom varme og temperatur?

Produsjon av mekanisk og elektrisk e

Utgangs-punkt	**Hovedformål**	**Framdrift av fartøy** (mobile anlegg)					
	Hovedkilde	**Ikke fornybar energi** (kjerneenergi og fossile brensler)					
	Energiform	**Kjerneenergi**	**Kjemisk**				
	Energikilde	**Uran**	**Olje**	**Olje**	**Olje**	**Olje**	**Naturgass Bensin**
		1. Dampturbindrift med kjernekraft-produsert damp	**2. Dampturbin-drift med olje-fyrt dampkjel**	**3, 4 Gassturbin-drift m. propell eller vannjet**	**5,6 Vanlig dieselmotordrift med/uten gir**	**7,8 Dieselelek-trisk drift med/ uten batteri**	**9,10. Ottomotor med naturgass/ bensin-drift**
Slutt-produkt	**Energiform**	**Mekanisk energi** (skyvekraftarbeid fra propell, vannjet eller seil)					
	Klimagasser	**CO2-fritt**	**CO2-utslipp**				

Systembeskrivelser

Fysiske enheter som systemene er bygget opp av, er ført opp med fete typer. Virkemåtene er meget kort forklart slik at tabellen kan brukes uavhengig av øvrig tekst i kapitlet. Energi, eventuelt arbeid, som tilføres de fysiske enhetene, er markert med piler.

1. Dampturbindrift med kjernekraft-produsert damp

Fisjonsreaktor
Kjerneenergi om-formes til termisk energi i "brensel"-elementer som varmer opp kjøle-vann rundt disse

↓ Indre energi (varmt vann)

Varmeveksler for dampproduksjon

↓ Indre energi (damp)

Dampturbin

↓ Rotasjonsarbeid

Gir

↓ Rotasjonsarbeid

Propell

2. Dampturbin-drift med olje-fyrt dampkjel

Dampkjel
Kjemisk energi i brensel omformes ved kontinuerlig forbrenning til indre energi i forbr.gasser, som omdanner vann til damp (arbeids-medium). Forbr.-gasser og arbeids-medium er atskilt.

↓ Indre energi (damp)

Dampturbin

↓ Rotasjonsarbeid

Gir

↓ Rotasjonsarbeid

Propell

3, 4 Gassturbin-drift m. propell eller vannjet

Gassturbin.
Strømningsmotor med kontinuerlig, indre forbrenning som gir forbr.gasser med indre energi og stor kinetisk energi. Gassene strømmer gjennom et turbinhjul og utfører dermed et arbeid

↓ Rotasjonsarbeid

Gir

↓ Rotasjonsarbeid

Propell ***Pumpe for vannjet***

5,6 Vanlig dieselmotordrift med/uten gir

Dieselmotor.
Stempelmotor med gasstett syklisk, indre forbrenning (selvtenning) som gir gasser med stor indre energi og trykkenergi. Gassene forskyver et stempel som via et veivsystem omdannes til rotasjonsarbeid

↓ Rotasjonsarbeid

Gir

↓ Rotasjonsarbeid

Propell ***Pumpe for vannjet***

7,8 Dieselelek-trisk drift med/ uten batteri

Dieselmotor

↓ Rotasjonsarbeid

Elektrisk generator

Elektrisk energi

Batteri (kjemisk energi lagring)

Elektrisk energi (strøm)

Elektrisk motor

↓ Rotasjonsarbeid

Propell

9,10. Ottomotor med naturgass/ bensin-drift

Ottomotor
Stempelmotor som beskrevet til venstre, men med fremmedtenning i stedet for selv-tenning av brenslet)

↓ Rotasjonsarbeid

Gir

↓ Rotasjonsarbeid

Propell

Kommentarer

1. Anvendes kun i utenlandske militære fartøy, bl.a. pga. risiko ved kollisjoner.
2. Anvendes lite fordi forbrenning i en separat enhet utenfor arbeidsmaskinen gir dårligere virkningsgrad enn det som oppnås i en dieselmotor. Krever dessuten stor plass.
3. Krever liten plass. Anvendes derfor særlig i fartøy som må gjøres lettbygde (hurtigbåter)
4. Spesielt fordelaktig i ekstra hurtiggående fartøy som drives med vannjet.
5. Mellomhurtig dieselmotor med gir er klart det vanligste framdriftssystem for skip.
6. Langsomtgående dieselmotor koblet direkte til propellen er også svært mye brukt, særlig i store skip. Dette er *det framdriftssystem som gir best total virkningsgrad av alle*.
7. Brukes i undervannsbåter. Batteriene lades når båten går i overflatestilling. I undervannsdrift tar elektromotoren all energi fra batteriene.
8. Brukes mye i cruiseskip og store ferger. Hovedmotoren med generator kan plasseres uavhengig av elektromotoren/propellen, altså på et sted som gir lite støy og vibrasjoner om bord.
9. Bruk av naturgass reduserer CO2-utslipp. Anvendes en del i ferger.

10 Bensindrevet ottomotor er lettbygd og derfor typisk for hurtige båter m/ utenbordsmotor.

energi til havs, oversikt over metoder

Produksjon av elektrisk energi (stasjonære anlegg til havs)

Fornybar energi (biobrensler, solstråling, havenergi

		Elektromagn.	Mekanisk				Kjemisk
Hydrogen Naturgass	**Biobrensel**	**Solstråling**	**Vind**	**Vind**	**Havstrøm Tidevann**	**Bølger**	**Naturgass Olje**
11. Brenselscelledrift	**12. Dieselmotor/ ottomotor med biobrenseldrift**	**13. Solcelledrift**	**14. Seildrift**	**15. Vindkraftverk**	**16, 17. Hav-strøm/tidevann-kraftverk**	**18. Bølgekraft-verk m/ svingende vannsøyle**	**19,20. Kraftverk på plattformer for petr. utvinning**
Brenselscelle Brenselcelle Hydrogen, ev. hydro-karboner og oksygen (i form av luft), til-føres cellen. I en kjemisk prosess produseres elektrisk strøm direkte. Se for øvrig sidene 7-34/35	***Dieselmotor Ottomotor*** Biobrensler kan brukes i stedet for fossile i alle systemene 2 -10 foran. De kan være gass- eller væskeformige og blir behandlet på side 7.26	***Solcelle*** Solcellens virke-måte er forklart i fysikken. Når lys treffer solcellen, omformes den elektromagnetiske energien direkte til elektrisk energi	***Seil*** Luftas kinetiske energi utnyttes ved hjelp av seil til å gi skyvekraft-arbeid direkte	***Vindturbin*** Luftas kinetiske energi utnyttes direkte i en vindturbin til å gi rota-sjonsarbeid	***Vannturbin*** Vannets kinetiske energi utnyttes i en vannturbin til å gi mekanisk rotasjonsarbeid	***Luftturbin*** Havbølgenes energi (potensiell og kinetisk) fører til at den fri over-flata svinger i et kammer som vist i figur. Det lagres da trykkenergi i kammeret, som utnyttes i luft-turbinen til å gi rotasjonsarbeid	***Dieselmotor Gassturbin***
↓ Elektrisk energi	↓ Rotasjonsarbeid	↓ Elektrisk energi		↓ Rotasjonsarbeid	↓ Rotasjonsarbeid	↓ Rotasjonsarbeid	↓ Rotasjonsarbeid
Elektrisk motor	***Gir***	***Elektrisk motor***		***Gir***	***Gir***	***Elektrisk generator***	***Elektrisk generator***
↓ Rotasjonsarbeid	↓ Rotasjonsarbeid	↓ Rotasjonsarbeid		↓ Rotasjonsarbeid	↓ Rotasjonsarbeid		
Propell	***Propell***	***Propell***		***Elektrisk generator***	***Elektrisk generator***		

Elektrisk energi (ilandføres eller utnyttes på plattformen)

CO_2 -fritt | **CO_2 -utslipp**

11, 21 Hittil lite/ikke aktuelt, men miljøvennligheten gjør prinsippet interessant på sikt. Grupperes imidlertid som fornybar energi og CO2-fritt bare dersom cellen drives med hydrogen som er pro-dusert med fornybar energi. Kan prinsipielt også plasseres som nr.21, men produksjon av hydrogen fra olje/gass vil medføre CO2-utslipp

12 Blir mer og mer aktuelt i mange sammenhenger, se side 7-34)

13 Foreløpig for dårlig virkningsgrad på cellene, se s. 7-38. Skip er prosjektert, men ikke bygget

14 Det vises til side 3-34 når det gjelder virkemåte

15 Stadig økende interesse, se kap.13. Nyere el-generatorer for vindmøller har gjerne en utforming som gjør mekanisk gir overflødig

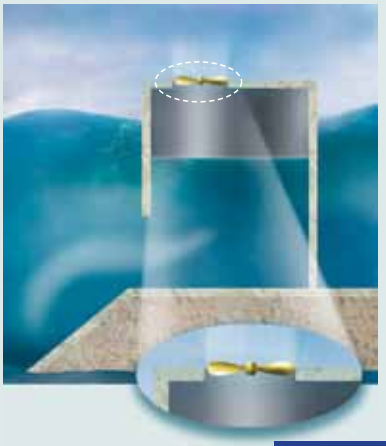
16 Foreløpig lite aktuelt pga. høye investeringskostnader

17 Som kommentar 16

18 Se kap.13

19 Svært mye anvendt i tidligere utbygginger, men erstattes i framtida i betydelig grad av forsyning av elektrisk energi fra fastlandet (i følge klimamål a på side 7-3).

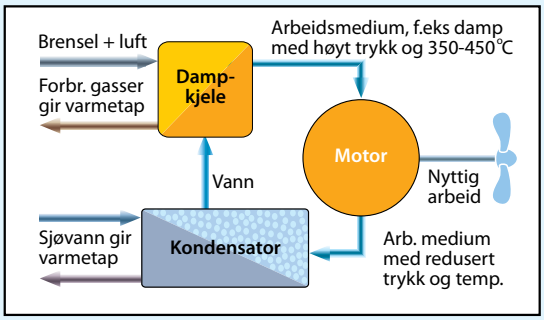
20 Som kommentar 19

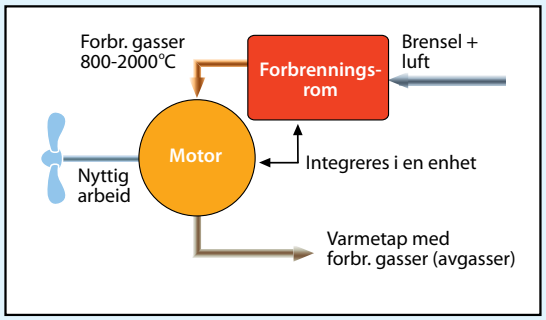


Varmemotorer. Definisjoner og oversikt

I oversikten på sidene 7 - 8/9 er det de såkalte varmemotorene som praktisk talt er enerådende når det gjelder framdrift av fartøy. Disse motorene utnytter altså varme til å skaffe den nødvendige mekaniske energien. Varmen kommer fra forbrenningsgasser som dannes ved forbrenning av et brensel. Vi skal i det følgende analysere varmemotorene nærmere, særlig med tanke på hvilke som bruker minst brensel.

Varmemotorer kan deles inn i to hovedgrupper





Varmemotor med ytre forbrenning
(engelsk betegnelse: External combustion engine)

Varmen overføres fra forbrenningsgassene til et annet medium (oftest vanndamp) som utfører arbeidet. Forbrenningsgassene og arbeidsmediet er altså atskilt. Forbrenningen kan dermed skje kontinuerlig, også når arbeidsprosessen foregår syklisk.

Varmemotor med indre forbrenning
(engelsk betegnelse: Internal combustion engine)

På norsk brukes alltid betegnelsen "forbrenningsmotor".
Arbeidet utføres av selve forbrenningsgassene, som altså også er et arbeidsmedium. Forbrenningen skjer diskontinuerlig i stempelmotorene, kontinuerlig i strømningsmotorene.

Stempelprinsipp

Den historiske **dampmaskinen** kan plasseres i denne "boksen". Den hadde en syklisk arbeidsmåte i to takter: arbeidsslaget og utstøtingsslaget. Dampen kunne ha et trykk på opptil 30 bar. Dampmaskinene fikk en vesentlig betydning for transportsektoren og industrialiseringen på 1800-tallet.
Denne perioden har derfor blitt kalt dampmaskinens århundre. For framdrift av skip ble dampmaskinen utkonkurrert av dieselmotoren utover på 1900-tallet. Den såkalte Stirlingmotoren hører også hjemme i denne boksen (se oppg. 7.10)

Strømningsprinsipp

Damp av høyt trykk fra en dampkjel strømmer gjennom et turbinhjul og virker på samme måte som forklart for gassturbinen til høyre. Slike **dampturbiner** ble tidligere mye brukt i skip, men har i dag bare interesse i spesielle tilfelle (f.eks. i kjernekraftbasert dampproduksjon).

Stempelprinsipp

Kort forklaring: Baseres på en **syklisk** arbeidsprosess i en absolutt **gasstett** sylinder. Derfor blir både temp. og trykk etter den **diskontinuerlige forbrenningen** svært høye.Trykket gir en kraft på stemplet

$$F = p \cdot A$$

og dermed et volumendringsarbeid når dette forskyves.
Eksempler på motortyper innen denne gruppen er **dieselmotorer** og **ottomotorer.**

Strømningsprinsipp

Kort forklaring: Baseres på **kontinuerlig forbrenning** i et rom som **ikke** er absolutt tett. Derfor blir både trykk og temp. mindre enn i en stempelmotor. I stedet oppstår en høyhastig strømning gjennom et eller flere turbinhjul. Når gassene her avbøyes av skovler, oppstår en tangentialkraft

$$F = m \cdot \bar{a}$$

Denne gir et rotasjonsarbeid. Motorer som arbeider etter dette prinsippet, kalles **gassturbiner.**

To arbeidsprinsipper:
Otto-diesel-prosess
Ren ottoprosess

To gassutvekslingsprinsipper:
Firetaktsmotor
Totaktsmotor

Tre turtallområder:
Langsomme (80-300 o/min)
Mellomhurtige (300-1000 o/min)
Hurtige (> 1000 o/min)

Varmemotortyper og spesifikt brenselsforbruk

Brenselsforbruket er den viktigste størrelsen vi har for å evaluere varmemotorer. Ikke bare forteller denne hvor økonomisk motoren er i bruk, men den sier også mye om hvor miljøvennlig motoren er med hensyn til CO_2-utslipp. Som vi har nevnt foran og som vi også kommer tilbake til senere, er det proporsjonalitet mellom brenselsforbruk og CO_2-utslippet.

Den vanligste måten å oppgi brenselsforbruk på er det såkalte *spesifikke brenselsforbruket*, se definisjonen til høyre.
Vi merker oss at størrelsen er *omvendt proporsjonal med motorens effektive virkningsgrad*. Denne bestemmes av to faktorer: arbeidsprosessens termiske virkningsgrad og motorens mekaniske virkningsgrad, se figur til høyre.Typiske tallverdier framgår nedenfor.

Spesifikt brenselsforbruk (b_e) og effektiv virkningsgrad (η_e) for fartøymotorer

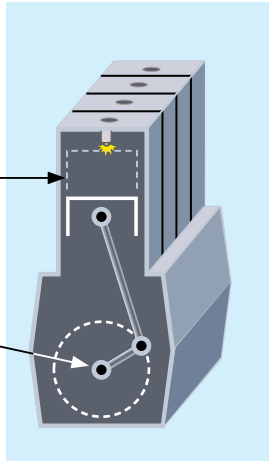
	b_e (g/kWh)	η_e
Dieselmotor, langsom totaktsmotor:	160-180	0,53-0,47
Dieselmotor, mellomhurtig firetaktsmotor:	170-210	0,50-0,40
Dieselmotor, hurtig firetaktsmotor:	190-220	0,44-0,38
Ottogassmotor, mellomhurtig firetaktsmotor:		0,50-0,40
Gassturbin m / enkel arbeidsprosess:	240-280	0,35-0,30
Dampturbin m/oljefyrt dampkjel:	275-310	0,31-0,27
Kombinert gassturbin og dampturbin:	185-210	0,45-0,40

Verdiene gjelder ved 100% pådrag ("Maximum Continous Rating", MCR)

Hvorfor har gassturbiner og dampturbiner høyt brenselsforbruk?

Som vi skjønner fra forrige side, karakteriseres en gassturbin av at arbeidsmediet strømmer gjennom motoren under stasjonære forhold. Forbrenning og varmeutvikling skjer kontinuerlig, og etterfølgende turbinhjul med skovler utsettes konstant for de varme forbrenningsgassene. Samtidig er turtallet høyt og de mekaniske påkjenningene dermed meget store. Selv i konstruksjoner med de mest høyverdige materialer i skovlene må gasstemperaturene holdes under visse grenser. Det er ekstremt vanskelig å kjøle skovlene, som av strømningstekniske grunner må være så tynne som mulig. Dette betyr at *det disponible temperaturfallet i motorene i høyre del av tabellen på forrige side blir vesentlig mindre i en strømningsmotor enn i en stempelmotor. Dermed forteller termofysikkens andre lov oss at utviklet varme i en gassturbin blir av dårligere kvalitet enn i en stempelmotor, og brenselsforbruket blir altså høyere.*

*Damp*turbiner m/dampkjel er enda dårligere stillet. Maksimal damptemperatur før turbinhjulet er mindre enn 450 °C, og resonnementet ovenfor vil bety enda mer. Dessuten opptrer det varmetap i dampkjelen. Dampturbinanlegg installeres i dag nesten ikke i nye skip og behandles ikke nærmere i boka. For ordens skyld bør det imidlertid nevnes at det er en viss interesse for systemer som kombinerer gassturbin- og dampturbinanlegg, se side 7-33. Dette gir nemlig en økning i virkningsgraden.



*Arbeidsprosessens virkningsgrad (også kalt termisk virkningsgrad, η_t) baseres på arbeidet som utvikles i **sylinderen***

*Effektiv virkningsgrad (η_e) baseres på arbeid som står til disposisjon på **utgående aksel**. Pga. tapt friksjonsarbeid er:*
$\eta_e = \eta_m \cdot \eta_e = 80\text{-}95\%$ av η_t

Forskjellen mellom termisk og effektiv virkningsgrad for en forbrenningsmotor

Definisjon av spesifikt brenselsforbruk
*En motors brenselsforbruk kan oppgis pr. tidsenhet ($\dot{m}_B$ kg/h). En tallverdi basert på en slik måleenhet ville imidlertid være avhengig av hvor stor motoren var, og den ville ikke fortalt noe om motorens brenselsøkonomiske kvalitet. Derfor oppgis heller brenselsforbruket pr. time og pr. kW utviklet effekt på utgående aksel (Pe kW). Dette kaller vi **spesifikt brenselsforbruk:***

$$b_e = \frac{\dot{m}_\beta}{P_e} \left[\frac{kg/h}{kW} = \frac{kg}{kWh} \right]$$

Som det framgår av måleenhetene, kan vi også si at det spesifikke brenselsforbruket er et uttrykk for forbruket målt i kg pr. kWh arbeid på utgående aksel.

En motors spesifikke brenselsforbruk (b_e kg/kWh) henger nøye sammen med dens effektive virkningsgrad og brenslets energiinnhold (h_n kWh/kg, se side 7-26):

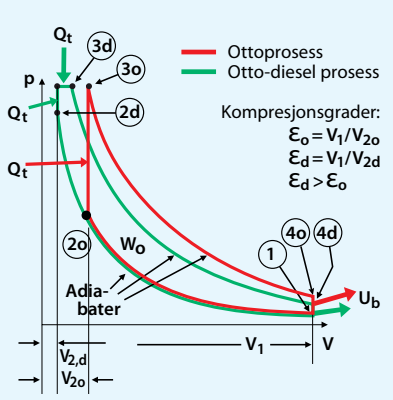
$$\eta_e = \frac{1}{b_e \cdot h_n}$$

Vi undrer oss på:

Hvordan kan sammenhengen mellom en motors effektive virkningsgrad og dens spesifikke brenselsforbruk

$$\eta_e = \frac{1}{b_e \cdot h_n}$$ utledes?

Analyse av forbrenningsmotorer av stempeltype



Ottoprosess
1-2o: Adiabatisk kompresjon
2o-3o: Varmetilførsel, konst. volum
3o-4o: Adiabatisk ekspansjon
4o-1: Varmebortførsel U_b (gassutveksling)

Otto-dieselprosess
1-2d: Adiabatisk kompresjon
2d-3d: Varmetilførsel, under konst. volum og konst. trykk
3d-4d: Adiabatisk ekspansjon
4d-1: Varmebortførsel U_b

Sammenligning
Det forutsettes at begge motorene har samme maksimaltrykk, samme sylindervolum V_1 og får tilført samme varmemengde Q_t. Iflg. termofysikkens første lov må da:

$$Q_t = W_o + U_b$$

Ved arealbetraktninger innser vi at Ottoprosessen nødvendigvis må ha en ekspansjonsgraf som ligger høyere enn dieselprosessens. Ellers ville dieselprosessen gitt både størst arbeid W_0 (areal innenfor lukket kurve) og størst bortført indre energi U_b for samme tilførte varme Q_t, noe som er umulig.

Iflg. tilstandsligningen må dermed:
$p_{4o} > p_{4d}$, $T_{40} > T_{4d}$, $U_{b,o} > U_{bd}$
$W_{o,o} < W_{o,d}$.

Resonnement som påviser hvorfor Otto- dieselprosessen gir bedre termisk virkningsgrad enn Otto-prosessen. Dette gjelder ikke bare for idealiserte, men også for virkelige motorer.

Definisjon av hovedtypene ottomotor og dieselmotor

I ottomotorene får lufta tilført brenslet (bensinen, gassen) så tidlig at det er til stede i sylinderen under hele kompresjonen. Brenslet antennes like før øvre dødpunkt av en gnist (eller tennstråle). Siden alt brensel er til stede på forhånd, forbrennes det meget raskt, så raskt at stemplet nesten ikke får tid til å flytte seg. Det er svært viktig at brenslet ikke selvtenner før gnisten kommer, og ottomotorene utføres derfor med vesentlig *lavere kompresjon* enn dieselmotorene.

Dieselmotorene utføres med **høy kompresjon**. Den komprimerte lufta får dermed så høy temperatur at den første delen av brenslet (dieseloljen) som sprøytes inn i sylinderen mot slutten av kompresjonen, *selvtenner* og forbrenner meget raskt. Resten av brenslet sprøytes inn i løpet av en kort periode etter øvre dødpunkt og forbrenner da etter hvert som det tilføres. Denne forbrenningen skjer så langsomt at trykket i sylinderen holder seg tilnærmet konstant.

Teoretiske arbeidsprosesser for stempelmotorer

Når vi skal vurdere nærmere hvilken av de to motortypene ovenfor som er mest økonomisk i drift, er det pedagogisk hensiktsmessig å starte med teoretiske betraktninger over de prosesser som foregår i disse motorene Først idealiserer vi prosessene, og så foretar vi de nødvendige, praktiske korreksjoner etterpå.

Idealprosesser. De idealiserte prosesser, som kalles Ottoprosess og Otto-dieselprosess, er vist til venstre. Det er først og fremst de to taktene når motorene omsetter arbeid, altså kompresjonstakten og ekspansjonstakten, som er interessante. Begge prosessene forutsetter at både kompresjonen og ekspansjonen foregår så raskt at det ikke blir noen varmeutveksling med omgivelsene. Forskjellen mellom prosessene består i at vi tenker oss at varmetilførselen skjer under konstant volum i Ottoprosessen og under både konstant volum og konstant trykk i Otto-dieselprosessen (se figur). Dette passer godt med de karakteristikker som ble gitt ovenfor av ottomotorer og dieselmotorer.

Figuren til venstre viser hvordan gasstrykket varierer som funksjon av sylindervolumet for de to prosessene. Det forutsettes at prosessene har samme maksimaltrykk, samme sylindervolum i nedre dødpunkt og får tilført samme varmemengde. Figuren er meget interessant fordi den enkelt påviser hvorfor dieselmotorene må være mer økonomisk i drift enn ottomotorene, se figurteksten.

Dieselmotoren og termofysikkens andre lov. Vi kan også forklare dieselmotorens gode virkningsgrad ved å bruke det samme resonnementet som på forrige side ble brukt under evalueringen av strømningsmotorene i forhold til stempelmotorene generelt. Hovedårsaken til at dieselmotoren får bedre virkningsgrad enn ottomotoren, er at den kraftige kompresjonen gir en høy temperatur (opptil 1000 °C) som startpunkt for forbrenningen og dermed for varmetilførselen. Under forbrenningen stiger temperaturen ytterligere til ca. 2500 °C. Middeltemperaturen under varmetilførselen blir dermed svært høy, noe som muliggjør et stort temperaturfall under ekspansjonen. Som forklart foran, betyr dette god kvalitet på den tilførte energien og en tilsvarende god termisk virkningsgrad. Da blir også den effektive virkningsgraden god for dieselmotoren.

Dieselmotor eller ottomotor?

Konsekvensene av sammenligningen mellom otto- og dieselmotorer er klare: Pga. bedre virkningsgrad vil *dieselmotoren* få et lavere brenselsforbruk. Dette er hovedgrunnen til at den har fått enorm betydning innen transportsektoren, både til vanns og til lands.

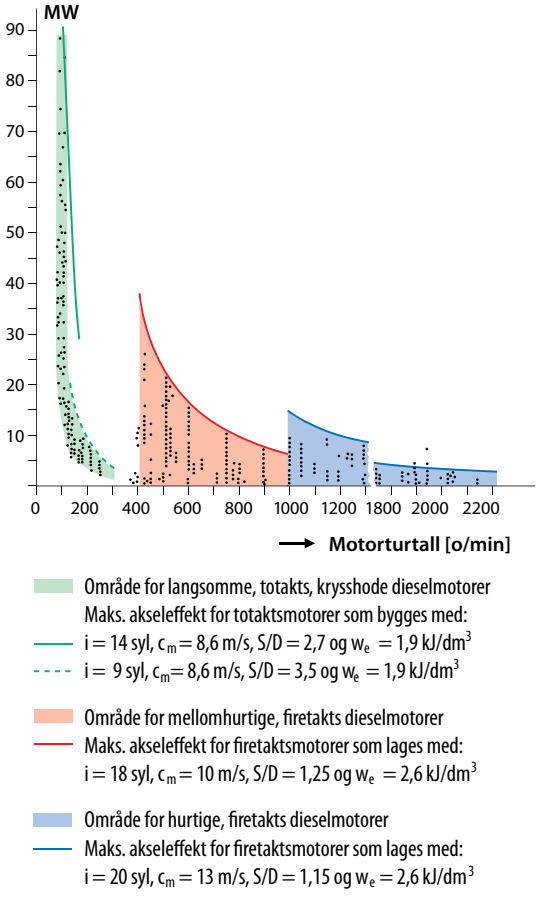
Når det gjelder ottomotoren, må vi skille mellom hvilke typer brensler som brukes. Hovedfordelen til den bensindrevne ottomotoren er at forbrenningsprosessen foregår meget raskt slik at motoren kan gjøres svært hurtiggående. Dette gir en relativt lett motor med lite plassbehov ved en gitt effekt. Derfor passer den godt i personbiler og til sjøs som utenbordsmotor. Den gassdrevne ottomotoren har en annen, meget viktig fordel, nemlig miljøvennligheten. Som vi kan se på side 7-29, er både helse- og miljøskadelige utslipp mye mindre enn fra en dieselmotor. Gassottomotoren forutsetter imidlertid at det er mulig å finne plass til de økte volumbehov som tankanlegg med nedkjølt og/eller komprimert gass (LNG) krever i for-hold til bensintanker. Dette betyr at gassmotorer først og fremst er aktuelle for drift av store motorenheter, for eksempel i skip og tunge kjøretøyer (busser med tankanlegg på taket). Gass muliggjør også bruk av høyere kompresjon enn i bensinottomotorer, slik at gassotto-motoren nærmer seg dieselmotoren når det gjelder forbruk. Men den krever tenningshjelp og er derfor ikke en dieselmotor.

Totaktsmotor eller firetaktsmotor?

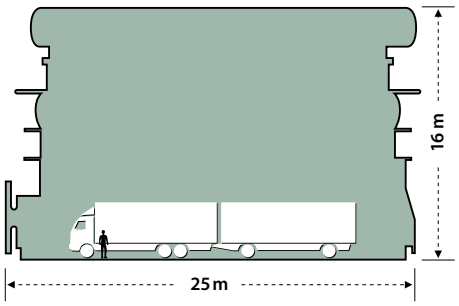
Renspyling av sylindrene er en vanskelig prosess for en totaktsmotor. Firetaktsmotoren bruker en ekstra motoromdreining for å skifte ut forbrenningsgassene med ny, frisk ladning, mens totaktsmotoren må bruke deler av arbeidstaktene til slik gassutveksling, se side 7-15. Man skulle kanskje tro at totakts-prinsippet dermed blir fullstendig overlegent, siden det gir "plass" til utvikling av arbeid på hver eneste motoromdreining. Men saken er ikke så enkel. Gassutvekslingen omfatter bl.a. en renspyling av sylinderen for avgasser fra foregående forbrenning. En slik renspyling blir mer vellykket jo lenger tid som står til disposisjon for spyleprosessen. Derfor brukes *totakts-prinsippet i motorer med lave turtall (ca. 300 o/min).*

Konsekvenser av det *lave turtallet* er følgende fordeler og ulemper:

- Lave turtall *muliggjør store akseleffekter per motorenhet,* se figur øverst. Hvorfor det er slik, tas opp til drøfting i oppg. 7.13
- Langsomme motorer gir et *gunstig brenselsforbruk.* De kan nemlig koples direkte til propellen som dermed får et lavt turtall. Dette bedrer både kraftoverføringens og propellens virkningsgrader. I tillegg har slike motorer spesielt lavt brenselsforbruk (se side 7-11).
- Motorene *krever stor plass.* Se figur til høyre.

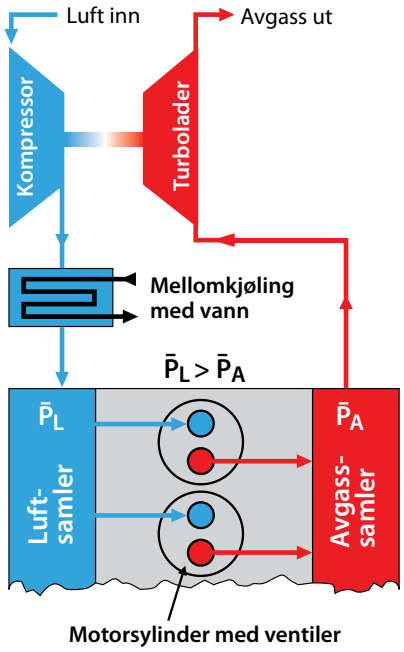


Oversikt over verdens fabrikasjon av dieselmotortyper med ulike turtall, for framdrift av skip.
Hver enkelt motortype er markert med en prikk.

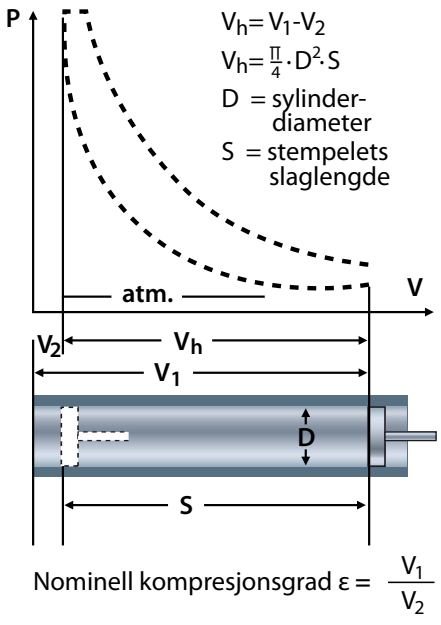


Verdens største motor (2009)
Dette er en totakts, krysshode dieselmotor med akseleffekt 87000 MW ved 97 o/min. Det lave turtallet må kompenseres med store sylindervolumer (se lign. side 7-17). Dessuten gir krysshode-prinsippet, se side 7-25, ekstra stor byggehøyde. Produksjonsprisen per enhet akseleffekt er 30-50 % høyere enn for mellomhurtige dieselmotorer.

Dieselmotorers arbeidsmåte



Turboladning av en firetakts dieselmotor



Definisjon av en stempelmotors slagvolum V_h og kompresjonsgrad

Virkelige arbeidsprosesser for dieselmotorer

Hittil har vi bare sett på idealiserte arbeidsprosesser i stempelmotorer. De virkelige prosessene avviker imidlertid en del fra de idealiserte. For å kunne beregne det arbeid og den effekt som f.eks. en dieselmotor yter, har vi nedenfor beskrevet de viktigste av disse avvikene.

Overladning. En motor trenger alltid luft for å kunne forbrenne det brenslet som tilføres. Det er derfor viktig at sylindrene fylles opp med en størst mulig luftmengde. Dette kan oppnås ved at den tilførte lufta gis et overtrykk slik at tettheten til sylinderladningen øker. Den vanligste måten å gjøre dette på er å utstyre motoren med en eller flere turboladere, og i så fall sier vi da at motoren er turboladd. En turbolader består av en avgassdrevet turbin koblet til en kompressor som leverer lufta til sylindrene.

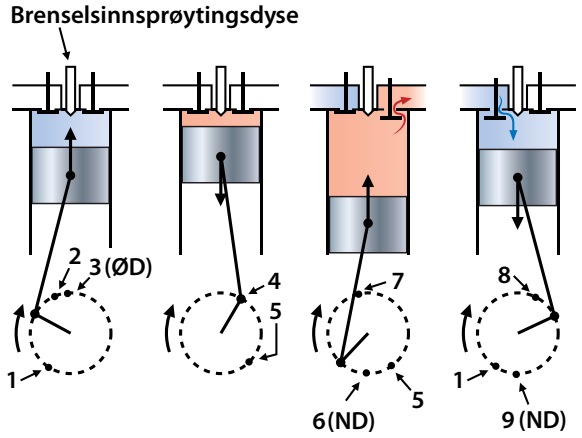
Både turbinen og kompressoren arbeider som en gassturbin, se side 7-32. Turboladning av en firetaktsmotor er skjematisk vist i figur til venstre. Det samme prinsippet brukes også for totaktsmotorer.

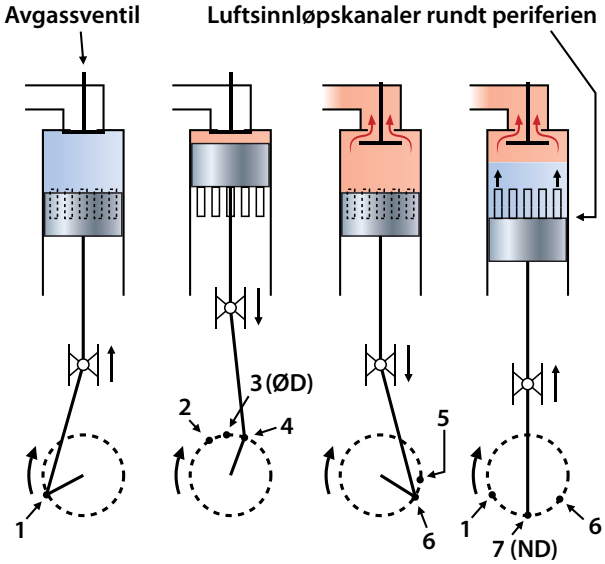
Resultatet av turboladningen er altså økt arbeid og økt akseleffekt. I arbeidsdiagrammene (p-V-diagrammene) på neste side kommer dette til syne ved at kompresjonen begynner (punkt 1) med et overtrykk (2—3 bar over atmosfæretrykk). I tillegg til at prosessdiagrammene "løftes" oppover, vil altså arealene W_t bli vesentlig større enn i idealdiagrammer for normalladde motorer.

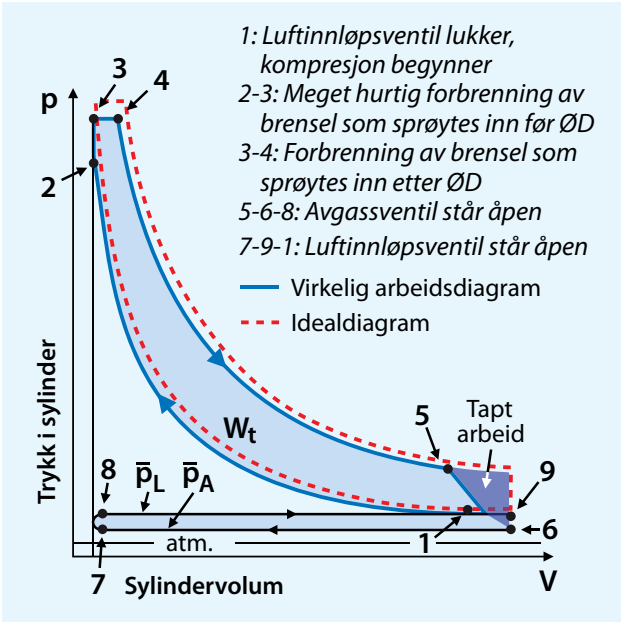
Varmetap på grunn av kjøling. Materialtekniske hensyn krever at godset i sylinderfôringer, topplokk og stempler kjøles av et strømmende kjølemedium. Dette ble det ikke tatt hensyn til i idealdiagrammene, som jo baserte seg på adiabatisk kompresjon og ekspansjon. Tar vi hensyn til virkningen av slik kjøling, vil de virkelige diagram-menes arbeidsarealer reduseres med15—20%.

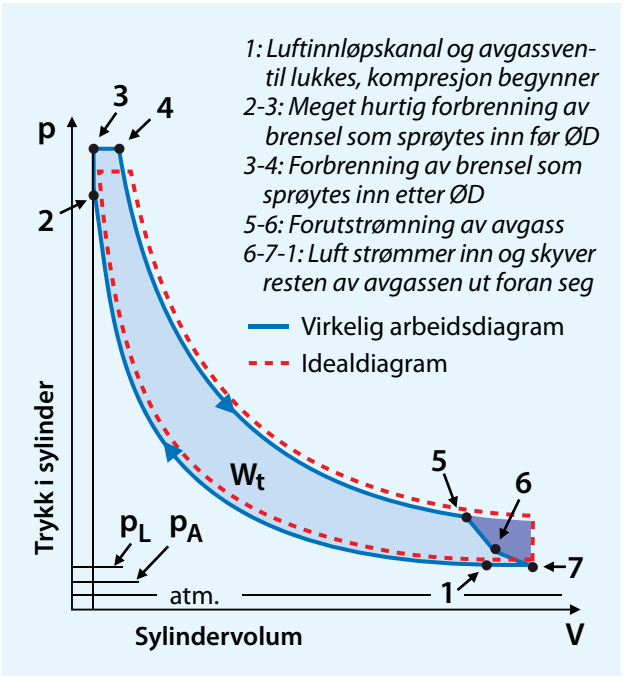
Gassutveksling. Som poengtert flere ganger tidligere, har stempelmotoren et syklisk arbeidsprinsipp. Dermed blir utskifting av forbrenningsgassene med en ny, frisk sylinderladning en sentral del av den totale arbeidsprosessen. Dette gjøres på helt forskjellige måter i totakts- og firetaktsmotorer. I totaktsmotorer foregår denne gassutvekslingen i løpet av korte perioder mens stemplet beveger seg til og fra nedre dødpunkt, mens prosessen i firetaktsmotorer bruker to ekstra stempelslag (takter) til den samme prosessen. Detaljer framgår av de selvforklarende figurene på neste side.

Som det framgår av figurene, skal vi videre merke oss at det tapes et "arbeidsareal" (skyggelagt) under gassutstrømningen i begge prosessene. I firetaktsmotorer kompenseres dette imidlertid delvis av at de to ekstra taktene også gir et visst arbeid. Trykket i sylinderen er nemlig i gjennomsnitt større under luftfyllingen enn under avgassutstøtingen, slik at det utvikles et netto arbeidunder gassutvekslingen.









Trykk—volum-diagrammer (p-V-diagrammer) for virkelige arbeidsprosesser i

- ***firetakts dieselmotor (ovenfor)***
- ***totakts krysshode dieselmotorer (til høyre)***

Definisjon av spesifikk arbeidsevne

Effektivt arbeid. Det er arbeidet på utgående aksel som interesserer mest. Denne størrelsen kalles effektivt arbeid. Som påpekt på side 7-11, opptrer det friksjoner internt i en motor. Det tilhørende friksjonsarbeidet (W_f) må trekkes fra det virkelige arbeid i sylinderen (W_t). Vi kan bruke de samme tallverdier som i figuren på side 7-11, og får:

$$W_e = W_t - W_f = 80\text{—}95\% \text{ av } W_t$$

Den minste verdien gjelder for meget hurtige motorer og den største for langsomme totaktsmotorer.

Spesifikk arbeidsevne. Det effektive arbeidet pr. arbeidsprosess (W_e) vil være avhengig av motorens sylindervolum. For analyseformål er det da bedre å bruke verdier som gjelder pr. volumenhet. Som mål for motorens fysiske størrelse legger man i motorteknikken alltid til grunn det såkalte slagvolumet, se figur til venstre.

Dermed får vi følgende definisjon av det vi gjerne kaller en stempelmotors spesifikke arbeidsevne, w_e:

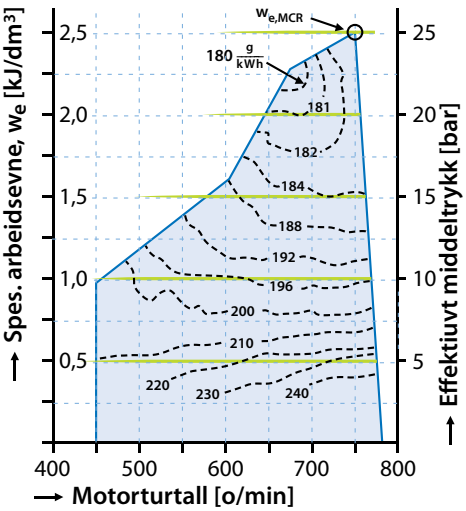
$$w_e = \frac{W_e}{V_h} \left[\frac{J}{m^3} = 10^{-6} \frac{kJ}{dm^3} \right]$$

Her er *We* det arbeid (J, kJ) som *hver av motorens arbeidsprosesser* bidrar med på dens utgående aksel.

Vi undrer oss på:

Hvor stort er det totale slagvolumet for verdens største dieselmotor, regnet i dm^3? Hvor mange personbildieselmotorer svarer dette til hvis vi regner med et totalt slagvolum lik 2 dm^3 for hver av disse?

Dieselmotorers arbeidevne og effekt



Motor: Rolls-Royce, type Bergen B 32:40P
Syl.dimensjoner: D=320 mm, S=400 mm, V_h=32,15 dm³
Antall sylindre: 6, 8 eller 9 i rekke, 12 eller 16 i V-form

Figuren viser aktuelt driftsområde for motorens spes. arbeidsevne (w_e). Øvre grense for w_e beskrives av tre rette linjer som bl.a. bestemmes av turboladerens leveringskapasitet ved de forskjellige turtall. Denne øker med motorturtallet og pådraget. Maksimal spes. arbeidsevne oppnås ved turtallet 750 o/min og fullt brenselspådrag:

$$w_e,MCR = 2{,}49\ kJ/dm^3$$

Det er lagt inn koter (stiplete kurver) for diverse konstante spesifikke brenselsforbruk i g/kWh. Grønne linjer gjelder for 20, 40, 60, 80 og 100% pådrag

Spesifikk arbeidsevne (arbeid pr. dm³ slagvolum og pr. arbeidsprosess) for en mellomhurtig, firetakts dieselmotor for framdrift av fartøy

Spesifikk arbeidsevne. Dreiemoment

Typiske verdier for spesifikk arbeidsevne. Det som interesserer mest, er oftest hvor stor en motors spesifikke arbeidsevne kan bli på fullt pådrag ("full gass", Max. Continuous Rating, MCR). Denne er avhengig av en rekke forhold. Først og fremst bestemmes den av graden av overladning. Typiske verdier anno 2009 er gitt nedenfor.

Motortype	Spes. arbeidsevne w_e, MCR [kJ/dm³]
Langsomme totakts dieselmotorer	1,9 – 2,1
Mellomhurtige firetakts dieselmotorer	2,3 – 2,6
Hurtige firetakts dieselmotorer	2,0 – 2,9
Mellomhurtige ottomotorer med gassdrift	1,8 – 2,0
Hurtige ottomot. (utenbords, bensindrift)	0,8 – 1,2

Spesifikk arbeidsevne som funksjon av turtall. Som eksempel tar vi for oss en norskprodusert motor med data som vist til venstre. Det spesifikke arbeidet oppnår sin maksimumsverdi bare ved det høyeste turtallet. Dette skyldes turboladeren. Ved midlere og lave motorturtall blir massestrømmen av avgass ikke stor nok til at turbinen kan levere den nødvendige effekt til turboladerens kompressor. Dermed reduseres trykket på lufta som denne leverer, og sylinderladningen av luft avtar tilsvarende. Brenselspådraget og dermed innsprøytet brenselsmengde pr. arbeidsprosess må reduseres, og sluttresultatet blir at spesifikk arbeidsevne synker med turtallet, som vist.

Spesifikk arbeidsevne uttrykt som effektivt middeltrykk. Hvis vi analyserer måleenheten for spesifikk arbeidsevne, ser vi at den kan omformes til en trykkenhet, se oppgave 7.10 og eksempel 7.2.

Dreiemoment på utgående aksel. En motors arbeisevne kan også uttrykkes ved hjelp av det dreiemoment den gir på utgående aksel. Bruker vi sammenhengen mellom arbeid W, dreiemoment Md og akseldreining alfa fra side 3-24, kan vi for en arbeidsprosess skrive:

$$i \cdot W_e = i \cdot w_e \cdot V_h = M_d \cdot 4 \cdot \pi \ [J] \qquad \text{for en firetaktsmotor}$$

$$i \cdot W_e = i \cdot w_e \cdot V_h = M_d \cdot 2 \cdot \pi \ [J] \qquad \text{for en totaktsmotor}$$

Disse to ligningene kan vi bruke til å finne dreiemomentet på utgående aksel for totakts- og firetaktsmotorer hvor arbeid per arbeidsprosess We, slagvolum per sylinder (Vh) og antall sylindre i er kjent.

Eksempel 7.2. Fabrikanten for motoren i venstre marg oppgir at denne gjør et arbeid lik 80 kJ per arbeidsprosess når den kjøres med fullt pådrag ved 750 o/min. Bestem motortypens spesifikke arbeidsevne, effektive middeltrykk og totalt dreiemoment på utgående aksel for en motor med 16 sylindre. *Løsning:*

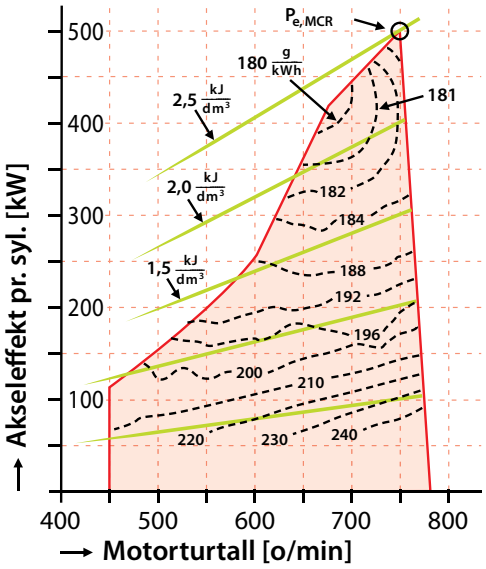
Spesifikk arbeidsevne: $$w_{e,MCR} = \frac{W_e}{V_h} = \frac{80\ kJ}{32{,}15\ dm^3} = 2{,}5\ \frac{kJ}{dm^3}$$

Eff. middeltrykk: $$p_{me} = 2{,}5\ \frac{kJ}{dm^3} = 2{,}5 \cdot 10^{-6}\ \frac{Nm}{m^3} = 2{,}5\ MPa = 25\ bar$$

Tot. dreiemom.: $M_d = i \cdot W_e/4 \cdot \pi = 16 \cdot 80\ kJ/4 \cdot \pi = 102\ kNm$

Effekt

Effekt forteller hvor fort en motor utfører et arbeid. Vi har hittil hovedsakelig sett på motorers *arbeidsevne*, altså hvordan de kan produsere nødvendig mekanisk energi. Dette er viktig både for å forstå motorenes virkemåte og for å kunne vurdere virkningsgrader og dermed hvor økonomiske de er i drift. Den spesifikke arbeidsevnen (kJ/dm³) sier imidlertid ikke noe om hvor *fort* f.eks. et skip kan flyttes fra A til B. Selv en liten motor kan makte en slik flytting hvis den har nok tid til disposisjon. Skal vi finne ut hvor lang tid motoren trenger, må vi ha tilleggsopplysninger om hvor *fort* den skaffer den nødvendige mekaniske energien, det vil si hvor mange volumenheter motoren har i arbeid pr. tidsenhet. Vi må altså trekke inn i beregningene både motorens turtall (omdr./s) og dens fysiske størrelse (i · V_h dm³). Alle disse opplysningene inngår i begrepet akseleffekt, som altså er den effekt motoren yter på utgående aksel.



Driftsområdet uttrykt i akseleffekt (kW) pr. sylinder for den samme motoren som omtalt på venstre side.

Kotene for konstant, spesifikt brenselsforbruk (g/kWh) er lagt inn også i dette diagrammet. Grønne linjer angir spesifikk arbeidsevne [kJ/dm³] for pådrag lik 20, 40, 60, 80 og 100% av MCR.

Akseleffekt pr. sylinder for en mellomhurtig, firetakts dieselmotor for framdrift av skip.

Beregning av akseleffekt. Som vi skjønner av det foregående, kan vi nå uttrykke en *firetaktsmotors* effekt slik:

$$P_e = w_e \cdot i \cdot V_h \cdot n/2 \quad [\text{kJ/s} = \text{kW}]$$

Her er:
P_e = akseleffekt (effekt på utgående aksel, [kW]
w_e = spesifikk arbeidsevne, [kJ/dm³ pr. arbeidsprosess]
i = antall sylindre [-]
V_h = motorens slagvolum pr. sylinder, [dm³]
n/2 = antall arbeidsprosesser pr. sekund og pr. sylinder), [s^{-1}]
n = motorens turtall, omdr./s, [s^{-1}]

En totaktsmotor har en arbeidsprosess pr. syl. og pr. omdreining og får en effekt

$$P_e = w_e \cdot i \cdot V_h \cdot n$$

De to ligningene ovenfor gjelder generelt for sammenhengen mellom en stempelmotors spesifikke arbeidsevne og dens akseleffekt. Har vi en graf for spesifikk arbeidsevne som funksjon av turtall, kan en tilhørende graf for akseleffekt bestemmes av ligningene. På denne måten er altså figuren til høyre basert på figuren i venstre marg.

Beregning av akseleffekt basert på dreiemoment. Oppgis arbeidsevnen ved hjelp av motorens utgående dreiemoment, kan tilhørende akseleffekter beregnes ved å kombinere ligningene ovenfor med ligningen på forrige side. Dette gir både for firetakts- og totaktmotorer:

$$P_e = M_{d,e} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \quad (\text{kW})$$

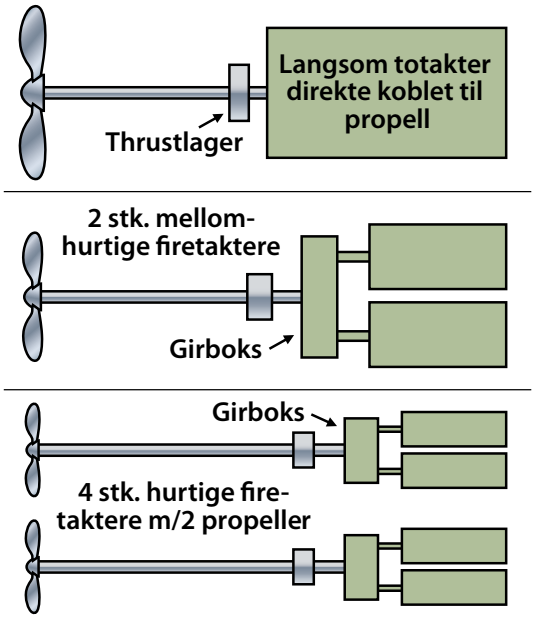
når $M_{d,e}$ er motorens utgående dreiemoment i kNm og n er turtall i s^{-1}.

Grunnen til at vi her får samme uttrykk både for totaktere og firetaktere, er at dreiemomenter alltid oppgis som gjennomsnittsverdi for alle omdreininger som utgående aksel gjør ved et gitt pådrag. Det vises for øvrig til eksempel på neste side.

Vi undrer oss på:

Motoreksperter beskriver oftest en motors spes. arbeidsevne som et middeltrykk i sylindrene (i bar) i stedet for v.hj.a. enheten kJ/dm³. Vi undrer oss på hvordan det er mulig å omforme kJ/dm³ til bar (10^5 N/m²)?

Valg av dieselmotor ved et gitt effektbehov



Tre alternative arrangementer av framdriftssystemer

For et nytt fartøy vil normalt skrogform og dermed framdriftsmotstand (R_{tot}) og slepeeffekt ($P_e=R_{tot}\cdot v_s$), ha blitt fastlagt før endelig valg av motortype og størrelse skal treffes. Det vises i denne forbindelse til sidene 3-14/17.

Alternative motorarrangementer

Når motortype skal bestemmes, har man da ofte valget mellom langsomme totaktere, mellomhurtige firetaktere eller hurtige firetaktere. Dette ble påpekt allerede på side 7-13. Eksempler på valgmuligheter som kan foreligge, er gitt i figur til venstre. For å finne ut hvor mange motorer som blir nødvendig, står man da ofte overfor den problemstilling som er tatt opp i eksemplet nedenfor.

Eksempel 7.3. Hvor stor er den kraftigste firetaktsmotor som kan bygges med et turtall på 750 o/min? Vi forutsetter at det er flere grunner til at nettopp det nevnte turtallet er det mest aktuelle. Hva er den øvre grense for akseleffekt som *én* motor da kan yte? Erfaringer fra tidligere motorkonstruksjoner medfører at følgende motordata kan legges til grunn (typiske verdier anno 2009)

- Antall sylindre: Maksimalt i = 20 (V-motor)
- Midlere stempelhastighet: c_m = 10 m/s
- Slaglengde/sylinderdiameter- forhold: S/D = 1,25
- Spesifikk arbeidsevne ved MCR: w_e = 2,6 kJ/dm^3

I tillegg til den øvre grensen for akseleffekt som en firetakter kan yte ved 750 o/min, skal også motorens dreiemoment på utgående aksel beregnes. **Løsning**, se nedenfor.

Slaglengde: $c_m = 2\cdot S\cdot n \longrightarrow S = \frac{c_m}{2\cdot n} = \frac{10\ \text{m/s}}{2\cdot(750/60)\ \text{s}^{-1}} = 0{,}4\ \text{m} = 400\ \text{mm}$

Sylinderdiameter: D = S/1,25 = 400 mm/1,25 = 320 mm

Slagvolum pr. sylinder:

$$V_h = \frac{\pi\cdot D^2\cdot S}{4} = \frac{3{,}14\cdot(3{,}2\ \text{dm})^2\cdot 4{,}0\ \text{dm}}{4} = 32{,}15\ \text{dm}^3$$

Akseleffekt:

$$P_e = \frac{w_e\cdot i\cdot V_h\cdot n}{2} = \frac{2{,}6\ \text{kJ/dm}^3\cdot 20\cdot 32{,}15\ \text{dm}^3\cdot 750/60\ \text{s}^{-1}}{2} = \underline{10450\ \text{kW}}$$

Dreiemoment:

$$P_e = M_{d,e}\cdot 2\cdot\pi\cdot n\cdot \longleftrightarrow M_{d,e} = \frac{P_e}{2\cdot\pi\cdot n} = \frac{10450\ \text{kW}}{2\cdot 3{,}14\cdot 750/60\ \text{s}^{-1}} = \underline{133\ \text{kNm}}$$

Alternativt:

$$M_{d,e} = \frac{w_e\cdot i\cdot V_h}{4\,\pi} = \frac{2{,}6\ \text{kJ/dm}^3\cdot 20\cdot 32{,}15\ \text{dm}^3}{4\cdot 3{,}14} = 133\ \text{kNm}$$

Den kraftigste firetaktsmotoren som kan bygges med dagens teknologi, er altså på ca10000 kW hvis vi krever at den skal gå med 750 o/min. Dette passer bra med figuren på side 7-13. Dersom skipet som motoren skal drive, har et større effektbehov, må dette enten utrustes med to mellomhurtige motorer med f.eks. turtall 750 o/min eller med en langsom totaktsmotor. Et tredje alternativ kan kanskje være en mellomhurtig firetakter med f.eks. 500 o/min.

Tilpasning av framdriftsmotor til fartøyets behov

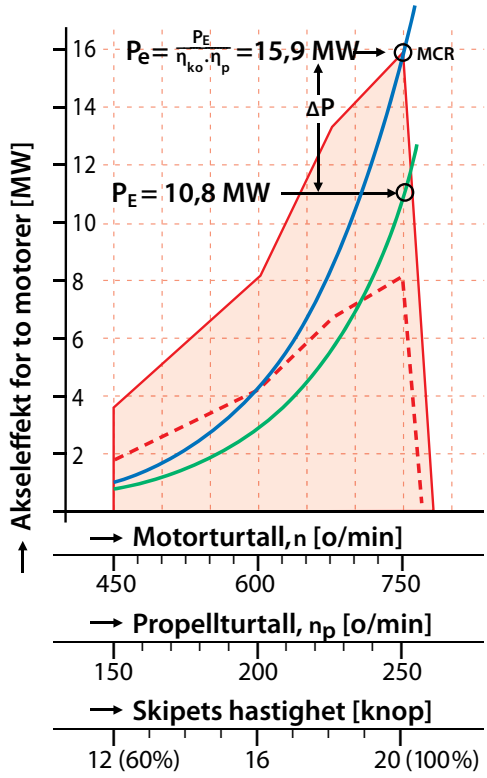
Ved hjelp av et dataprogram som arbeider etter Holtrops metode (jf. side 3-14) er slepeeffekt for et skip med volumdeplasement 25 000 m³ bestemt som vist med grønn graf på figur til høyre.

Vi nå skal finne motorer som passer for et slikt skip, og vi forutsetter som eksempel at det skal brukes et tomotorsanlegg. Først må det tas hensyn til kraftoverføringens virkningsgrad (η_{ko}) og propulsjonsvirkningsgraden (η_p). Motorene må da samlet ha en akseleffekt $P_e=P_E/(\eta_{ko}\cdot\eta_p)$, se blå graf i figuren til høyre. Deretter må vi velge motortype og så "spille på" de fire faktorene i hovedligningen på side 7-17 på en slik måte at det framkommer motorer som leverer passende effekter (rød og blå graf må skjære hverandre i "riktig" punkt). Driftsområdet for de valgte motorer må så sammenstilles med den beregnede grafen for det totale effekthovet, slik som vist figuren. Det forutsettes da at det er proporsjonalitet mellom skipets hastighet og propellens og motorens turtall. Det vises også til eksemplet nedenfor.

Eksempel 7.4. Valg av motor for et gitt skip. Et skip har en størrelse og skrogform som gir en slepeeffekt som vist i den grønne grafen til høyre. Normal hastighet er 20 knop, som svarer til en nødvendig slepeeffekt P_E=10 800 kW. Det skal finnes fram til eksempler på passende kombinasjoner av turtall (n), antall sylindre (i) og slagvolum pr. sylinder (V_h) for følgende tre alternative arrangementer med dieselmotorer: en langsom, to mellomhurtige og fire hurtige. For det mellomhurtige alternativet brukes det samme opplegget som er behandlet på side 7-17, **Løsning:** Se nedenfor:

	Langsom totakter	Mellomhurtig firetakter	Hurtig firetakter
Kraftoverføringens virkningsgrad, (lager og gir) η_{ko}	0,99	0,98 · 0,99	0,97 · 0,985
Propulsjonsvirkningsgrad, η_D	0,70	0,70	0,70
Behov for akseleffekt på motor, $P_{e,behov} = P_E / (\eta_{ko}\cdot\eta_D)$ [kW]	15584	15900	16148
Spes. arbeidsevne ved MCR, w_e [kJ/dm³]	2,05	2,49	2,84
Antall motorer x antall sylindre	1 x 9 (R)	2 x 16 (V)	4 x 16 (V)
Slaglengde / syl.diameter, S / D [mm/mm]	2214/500	400/320	210/190
Slagvolum per syl., $V_h = \pi\cdot D^2\cdot S/4$ [dm³]	434	32,2	5,95
Turtall på motor, n [o/min]	117	750	1800
Akseleffekt, totalt for anlegget [kW]	15600	16000	16200
Motorfabrikant	MAN	Rolls-Royce	MTU

Motorene er valgt etter informasjon fra internasjonal oversikt over motorer på markedet anno 2010. Det er ikke plass til å beskrive motorene detaljert.



Driftsområde for et anlegg med to mellomhurtige dieselmotorer (Rolls Royce, type Bergen B32:40P, jf. side 7-17)

Øvre grense for samlet akseleffekt fra to motorer, som funksjon av motorturtall

Øvre grense for akseleffekt fra en av motorene, som funksjon av motortall (jf. side 7-17)

Slepeefffektbehov som funksjon av hastighet/motorturtall for skip med volumdeplasement 26 000 m³, beregnet v,hj.a. dataprogram som arbeider etter Holtrops metode (jf. side 3-14/15)

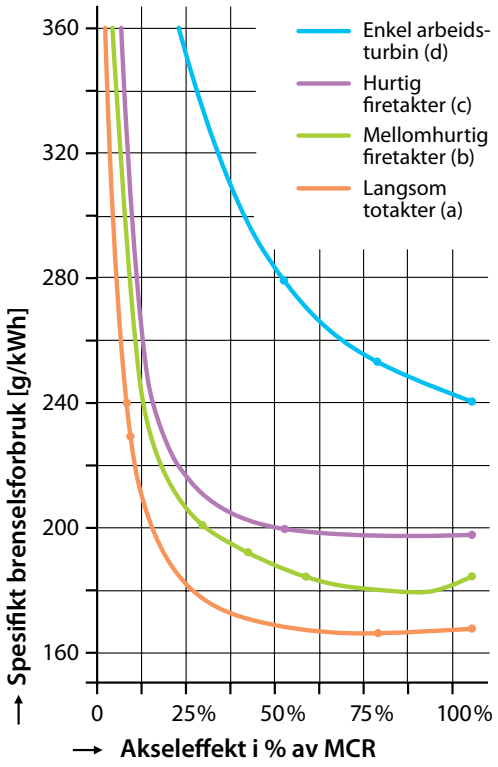
Totalt behov for effekt fra maskinerianlegget når det tas hensyn til effekttapet ΔP i kraftoverføring (inkl. girboks) og propell

Det er lagt inn alternative x-akser for

- *propellturtall, forutsatt en utveksling n/np = 3,0 i girboks*
- *skipets hastighet, forutsatt proporsjonalitet mellom propellturtall og hastighet*

Sammenstilling av et skips behov for motoreffekt og effektleveranse fra et anlegg med to mellomhurtige dieselmotorer og girboks

Dieselmotorers brenselsforbruk



Grafene er basert på at et skips effektbehov som funksjon av turtallet følger en såkalt propell-belastningkurve, dvs. at effekt-behovet antas å være proporsjonalt med 3. potens av skipets hastighet og dermed også motor-turtallene. Dette er ikke helt riktig. Som oftest reduseres effektbehovet hurtigere ved de høyeste hastighetene/turtallene. Propell-belastningskurver (n^3-kurver) brukes likevel svært ofte som referanse når brenselsforbruk skal oppgis på dellaster for en motor. Aller riktigst blir det imidlertid å bruke kotekart, som vist på side 7-16 eller 7-17 sammen med innlagte grafer for henholdsvis total motstand eller motstandseffekt, beregnet som vist på side 3-14 eller 3-16.

Eksempler på spesifikt brenselsforbruk som funksjon av belastning (effekt i % av MCR) for dieselmotorer og enkel gassturbin

I praksis er det ikke bare en dieselmotors evne til å yte arbeid og effekt som er av betydning når en motor skal vurderes nærmere. Andre forhold av interesse er dens brenselsforbruk, påkjenninger som krever vedlikehold, plassbehov og utslipp av miljøskadelige avgasser. Det siste punktet skal vi komme tilbake til i et eget underkapittel om forbrenningsprosesser, se sidene 7-26 og følgende.

Spesifikt brenselsforbruk

Spesifikt brenselsforbruk varierer sterkt med en motors belastning. Vi har allerede på side 6-11 oppgitt slike verdier for forskjellige dieselmotortyper. Verdiene var oppgitt på spesifikk form (g/kWh), og det var forutsatt at verdiene var basert på full last på motorene (MCR). Motorer kjøres selvsagt ikke hele tiden på full last, og brenselsforbruket på dellaster er også av interesse. Grafer som dekker hele belastningsområdet, er vist i figur til venstre.

Vi ser at spesifikt brenselsforbruk øker når belastningen synker og at forbruket blir svært høyt når belastningen er liten. Dette kommer bl.a. av friksjonen i motorens mange glideflater. Også friksjonen avtar med belastningen, men vil alltid være til stede (f.eks. også på tomgang). Det tilhørende friksjonsarbeidet vil på små belastninger "monne" *relativt* mye i forhold til netto utgående arbeid på motorakselen. Friksjonsarbeidet krever også et brenselsforbruk som dermed vil forverre motorens spesifikke forbruk i økende grad ved synkende belastning.

Når vi studerer figuren til venstre, skal vi også merke oss at motorer kan ha sitt aller beste, spesifikke brenselsforbruk ved en belastning som er noe mindre enn MCR. Særlig er dette ofte tilfelle for de langsomme totaktsmotorene.

Brenselsforbruk per seilt nautisk mil

I praksis vil selvsagt et skips brenselsforbruk pr. seilt strekning, for eksempel pr. nautisk mil, være mye mer interessant enn forbruket pr. kWh på maskineriet. Dette forbruket kan vi nå bestemme slik:

$$B = \frac{\text{brenselsforbruk pr. time}}{\text{seilt distanse pr. time}} = \frac{b_e \cdot P_e}{v_S} = \left[\frac{\text{kg}}{\text{n. mil}} \right]$$

Her er
b_e = spesifikt brenselsforbruk [kg/kWh] ved aktuell akseleffekt, se figur til venstre
Pe = aktuell akseleffekt [kW]
v_S = aktuell hastighet på skipet [knop = nautisk mil /h]

Det må også tas hensyn til energibehov om bord. Vi har hittil først og fremst tenkt på brenselsforbruket for et skips framdriftsmotor (eller hovedmotoren som den ofte kalles). Et skip har imidlertid i tillegg alltid en eller flere såkalte hjelpemotorer som driver elektriske generatorer for leveranse av elektrisk kraft til forskjellige formål om bord. Dette tilleggsbehovet er gjerne konstant og altså uavhengig av skipets hastighet. Ved små hastigheter vil skipet bruke lang tid pr. distanse, og hjelpemotorens brenselsforbruk pr. nautisk mil øker derfor etter hvert som hastigheten avtar, se figur til høyre på neste side. Også totalt forbruk vil derfor øke igjen ved små belastninger.

Eksempler

Eksempel 7.5. Forskjell i årlig brenselsforbruk for skipet i eksempel 7.4 når dette utrustes med mellomhurtige dieselmotorer i stedet for langsom totakter. Beregn økingen når det forutsettes at motorene skal gå med maks. effekt (MCR) i 250 seilingsdøgn per år og har et spesifikt brenselsforbruk som gitt i figur til venstre på forrige side.

Løsning: Ifølge figuren har de to nevnte motorene spes. brenselsforbruk på 168 og 184 g/kWh. 16000 kW for begge motortypene gir en besparelse for totaktsmotoren på

(0,184-0,168) kg/kWh · 16000kW · 24 h/døgn · 250 døgn/år ~ 1500 tonn pr. år

Eksempel 7.6. Besparelse i hovedmotorenes brenselsforbruk per nautisk mil ved reduksjon av hastigheten fra 20 til 18 knop. Det forutsettes at skipet i eksempel 7.4 utrustes med mellomhurtige dieselmotorer. Beregn hovedmotorenes brenselsforbruk per nautisk mil ved de nevnte hastigheter og besparelsen i prosent. Siden kotekart foreligger (side 7-17), brukes dette til å bestemme spes. brenselsforbuk i stedet for figuren til venstre. Avmerk resultatene i figur til høyre. **Løsning** nedenfor:

Ved 20 knop: $B_{20} = b_e \cdot P_e/v_S = 0{,}184$ kg/kWh · 15900 kW/(20 n.mil/h) = 146 kg/n.mil

Ved 18 knop: Fra blå graf på side 7-19 finner vi et effektbehov på 8300 kW som svarer til ca. 50 % av maks. effekt. Plotter vi inn 675 o/min (18 knop) og 260 kW/syl i i figuren side 7.17, vil kotekartet her gi b_e = 186 g/kWh, og dermed

$$B_{18} = b_e \cdot P_e/v_S = 0{,}186 \text{ kg/kWh} \cdot 8300 \text{ kW}/(18 \text{ n.mil/h}) = 85{,}7 \text{ kg/n.mil}$$

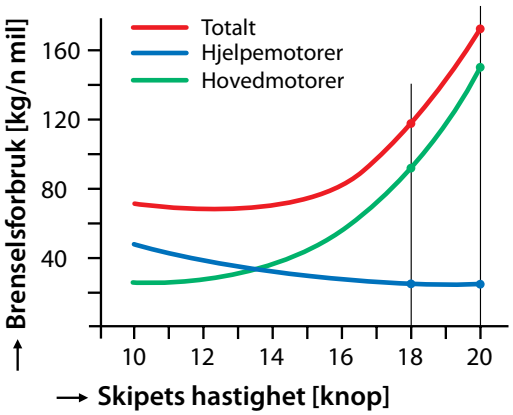
Verdiene er lagt inn på grønn graf i figuren til høyre. Reduksjon på 2 knop (10%) i hastighet gir altså (146-85,7)/146 · 100% ~ 40% mindre forbruk på hovedmotorene. *Fart koster!*.

Eksempel 7.7. Totalt brenselsforbruk pr. nautisk mil ved hastigheter lik 20 og 18 knop. Vi skal se mer på det samme skipet som i eksemplet ovenfor. Dette er også utstyrt med en hurtig dieselmotor på 2000 kW/1500 o/min som hjelpemotor. Denne har *konstant* last og spes. forbruk 210 g/kWh. Det relativt store elektriske effektbehovet kan f.eks. skyldes store kjøleanlegg om bord. Beregn forbruket per nautisk mil for hjelpemotoren og totalt forbruk. Marker resultatene i figuren. **Løsning** nedenfor:

$$B_{20} = b_e \cdot P_e/v_S = 0{,}210 \text{ kg/kWh} \cdot 2000 \text{ kW}/(20 \text{ n.mil/h}) = 21 \text{ kg/n.mil}$$

$$B_{18} = b_e \cdot P_e/v_S = 0{,}210 \text{ kg/kWh} \cdot 2000 \text{ kW}/(18 \text{ n.mil/h}) = 23{,}3 \text{ kg/h}$$

Summeres disse verdiene med brenselsforbrukene fra eksempel, 6 får vi 167 og 109 kg/n.mil ved hastigheter på henholdsvis 20 og 18 knop, altså 35 % besparelse. Resultatene er avmerket i figuren til høyre.



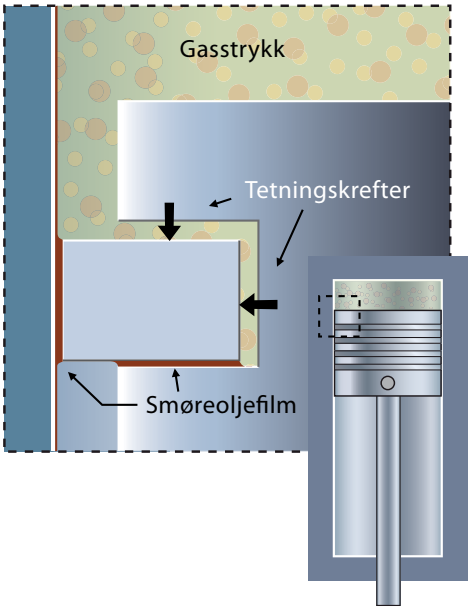
Grafene gjelder for skipet som ble behandlet i eksemplene 7.6 og 7.7. Skipet er utstyrt med mellomhurtige dieselmotorer og en relativt kraftig, hurtig dieselmotor som hjelpemotor. Avmerkede punkter for 18 og 20 knop er hentet fra eksemplene.

Eksempel på et skips brenselsforbruk for hovedmotorer og hjelpemotor samt totalt forbruk som funksjon av hastighet.

Vi undrer oss på:

Hvor store ville merkostnadene til brensel i NOK pr. år blitt hvis skipet i eksemplene ovenfor hadde vært utstyrt med de hurtige dieselmotorene som nevnt på side 7-19 i stedet for de mellomhurtige? Regn med spes. forbruk som i figur til venstre, og en pris på 350 dollar/tonn til en kurs lik 6 kr/dollar.

Dieselmotorers mekaniske påkjenninger



Smøreoljefilmen gir god tetning, men klarer ikke å holde ringen fullstendig atskilt fra sylinderen. Slitasje opptrer derfor i en viss grad både på stempelringen og sylinderløpebanen.

Gasstrykket forplanter seg til sporet hvor stempelringen ligger og gir stor tetningskraft og dermed stort flatetrykk når tetningsbehovet er størst. Systemet er altså selvregulerende. Flere ringer plasseres under hverandre slik at lekkasje forbi den øverste ringen fanges opp. Dette gir en god og elegant løsning på det viktige tetningsproblemet i stempelmotorer, og mange mener at det er stempelringen, sammen med den diskontinuerlige forbrenningen (se side 7-28) og evnen til gå på miljøvennlig brensel (se side 7-29), som vil "holde liv" i stempelmotoren til drift av skip langt utover i dette hundreåret.

Illustrasjon som viser hvordan gasstrykk i sylinderen bidrar til god tetning, men samtidig også stor slitasje, av sylinderløpebane og stempelring

Som kjent, vil motorer under drift utsettes for slitasje på grunn av mekaniske påkjenninger slik at de må overhales og vedlikeholdes med visse mellomrom. I tillegg til brenselsøkonomien må derfor også behovet for vedlikehold tas med i betraktningen når en motors driftsøkonomi skal evalueres.

Skipsmotorers driftsprofil. I motsetning til bilmotorer kjennetegnes skipsmotorer ved at de er i drift med tilnærmet full effekt i lange perioder om gangen. For eksempel seiler et typisk containerskip i omtrent 300 døgn i året på nesten full fart, 24 timer i døgnet. Slitasjen på utsatte deler i motorene blir deretter. Verst stillet er stempelringene og sylinderløpebanene, av grunner vi skal komme tilbake til nedenfor. Det er derfor som oftest slitasjen på disse delene som avgjør hvor lang tid det går før overhaling og utbedring blir nødvendig.

Faktorer som innvirker på slitasje av stempelringer og sylinder

Slitasjemekanismer. I stempelmotorer er det av avgjørende betydning å sikre en fullstendig tetning mellom den delen av sylinderen hvor arbeidsprosessen foregår og resten av sylinderen. Dette skjer ved hjelp av såkalte stempelringer med en virkemåte som framgår av figur til venstre.

Det er naturlig å tenke seg at slitasjen øker med

- økende veistrekning som en stempelring tilbakelegger på sylinderløpebanen. Denne vil være proporsjonal med stemplets midlere hastighet
- økende flatetrykk som virker mellom stempelringen og sylinderløpebanen. Dette vil være proporsjonalt med det gasstrykket som virker på innsiden av stempelringen, se figuren. Trykket er størst når stemplet befinner seg nær øvre dødpunkt, se figurer side 7-15. Selv om trykket i ringsporet blir mindre enn i sylinderen, er det på en måte maks. forbrenningstrykk som blir avgjørende for slitasjen.

Midlere stempelhastighet og maks. forbrenningstrykk er to meget viktige størrelser som er med på å bestemme slitasjen i en stempelmotor. Vi kan derfor bruke disse som uttrykk for den slitasjepåkjenning som vi forventer at motoren vil bli utsatt for.

Midlere stempelhastighet. Stempelhastigheten varierer i løpet av en takt. Den er null i dødpunktene og har en maks. verdi omtrent midt mellom disse. Det naturligste er å bruke gjennomsnittsverdien som mål. Hvis turtallet er n [o/s] (omdreininger pr. s), vil medgått tid på en omdreining være t = 1/n sekunder. I løpet av denne omdreiningen tilbakelegger stemplet to slaglengder (2 · S). Midlere hastighet blir dermed:

$$\bar{v}_{st} = s / t = 2 \cdot S / (1/n) = 2 \cdot S \cdot n \quad [m/s]$$

Eksempel 7.8. Midlere stempelhastighet for dieselmotortyper. Beregn midlere stempelhastighet for de motortyper som er vurdert i eks. 7.4, side 7-19. **Løsning:**

Langsom totakter: $\bar{v}_{st} = 2 \cdot S \cdot n = 2 \cdot 2{,}214\ m \cdot (117/60)\ s^{(-1)} = 8{,}6\ m/s$
Mellomhurtig firetakter: $\bar{v}_{st} = 2 \cdot S \cdot n = 2 \cdot 0{,}400\ m \cdot (750/60)\ s^{(-1)} = 10\ m/s$
Hurtig firetakter: $\bar{v}_{st} = 2 \cdot S \cdot n = 2 \cdot 0{,}210\ m \cdot (1800/60)\ s^{(-1)} = 12{,}6\ m/s$

Maksimalt forbrenningstrykk. Figuren til høyre er meget interessant. Den viser karakteristiske trekk ved dieselmotorutviklingen gjennom flere tiår. Figuren tar for seg langsomme totaktsmotorer, men firetaktsmotorer har gjennomgått en helt tilsvarende utvikling. Denne pågår stadig og kan beskrives slik:

- Figuren viser at totaktsmotorer i dag har en spesifikk arbeidsevne ved MCR som er mer enn tre ganger så stor som da turboladning av motorene begynte i 1955. Dermed skjønner vi hvilken **enorm betydning turboladning har hatt for dieselmotorutviklingen.**
- Figurens graf kan også brukes sammen med den nederste x-aksen og vi ser da hvordan trykket på levert luft fra turboladeren har økt i den samme perioden. Levert luftmengde er blitt økt tilsvarende. Dette er muliggjort ved en stadig forbedring av virkningsgradene både på kompressor- og turbinsiden. Utviklingen vil fortsette, bl.a. ved overgang til totrinns turboladning

- En konsekvens av den økte turboladningen er at også maks. forbrenningstrykk stadig har økt, tilnærmet proporsjonalt med økingen i spesifikk arbeidsevne og turboladerens lufttrykk. Hele tiden har nemlig dieselmotorens fordel med høy kompresjonsgrad vært opprettholdt. Dette har stadig gitt økte trykk også ved kompresjonens slutt og dermed et tilsvarende økt maksimalt forbrenningstrykk på toppen av dette, se figurer side 7-15.

Mekanisk påkjenningstall

Vi er interessert i det maksimale forbrenningstrykket for å kunne evaluere påkjenningene på en motor, men det er sjelden at fabrikantene oppgir dette trykket. På grunn av den gode proporsjonaliteten som grafen på figuren til høyre viser, kan vi imidlertid i stedet bruke den maksimale, spesifikke arbeidsevnen ($w_{e,MCR}$).

Vi kan nå "samle" virkningene av de to viktige størrelsene stempelhastighet ($\bar{v}_{st}$) og maksimal arbeidsevne ($w_{e,MCR}$) ved å bruke dem som faktorer i et produkt. Dette produktet kan vi gjerne kalle teknologiparameteren for motoren:

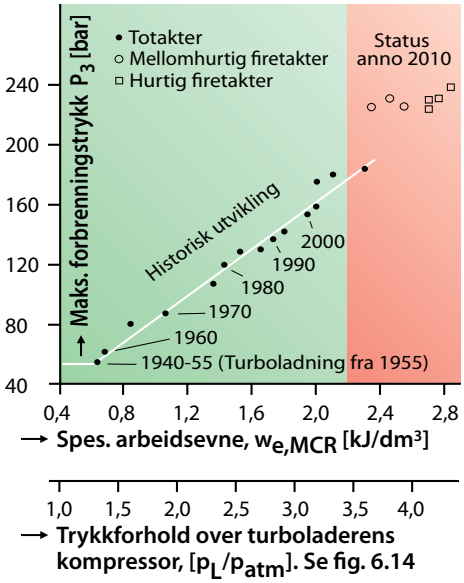
$$\text{Teknologiparameteren } TP = \bar{v}_{st} \cdot w_{e,MCR} \; [(\text{dm/s}) \cdot (\text{kJ/dm}^3) = \text{kW/dm}^2]$$

Teknologiparameteren er et **relativt** begrep som sier noe om hvor store mekaniske påkjenninger som forskjellige dieselmotortyper utsettes for. Stort TP-tall for en motor indikerer behov for noe hyppigere ettersyn enn for en motor med lavere TP-tall. Også andre faktorer virker imidlertid inn på slitasjeforholdene i en motor, og TP-tallet alene må ikke tillegges for stor vekt.

Eksempel 7.9. Beregn teknologiparameteren for de tre motortypene som kan være aktuelle for skipet i eksempel 7.4, side 7-19. Bruk verdiene for spes. arbeidsevne $w_{e,MCR}$ fra dette eksemplet og verdier for $\bar{v}_{st}$ fra forrige side. **Løsning:**

Langsom totakter: TP = 86 dm/s · 2,05 kJ/dm³ = 177 kW/dm²
Mellomhurtig firetakter: TP = 100 dm/s · 2,49 kJ/dm³ = 249 kW/dm²
Hurtig firetakter: TP = 126 dm/s · 2.84 kJ/dm³ = 358 kW/dm²

Foran har vi sett at den mellomhurtige dieselmotoren representerer et kompromiss mht. brenselsforbruk. Eksemplet viser at det samme er tilfelle også når det gjelder behov for ettersyn/vedlikehold.

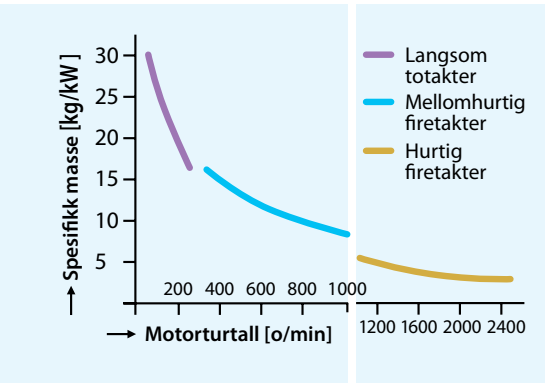


Maksimalt forbrenningstrykk som funksjon av spesifikk arbeidsevne. Historisk utvikling for totakterne og status anno 2009 for firetakterne.
Grafen for historisk utvikling er basert på utførte Sulzer/Wartsila totaktsmotorer. Status anno 2009 gjelder for både totakts- og firetaktsmotorer. Grafen kan tilnærmet også brukes sammen med den nederste x-aksen som illustrerer overladningsgraden. Innlagt linje gir en proporsjonalitetsfaktor lik ca. 80 bar/kJ/dm³ . Eksempel for totaktsmotor: $w_{e,MCR}$=2,2 kJ/dm³ gir p_3=176 bar

Vi undrer oss på:

Som nevnt foran, kan en skipsmotor være i drift på nesten full belastning i 24 x 300 timer pr. år. Hvor stor er driftstiden for en typisk personbilmotor i forhold til skipsmotorens driftstid? Regn med at personbilen årlig kjører en strekning lik 16 000 km med en fart ca. 80 km/h. Er det andre forskjeller i de to motortypenes driftsprofiler enn selve tidsfaktoren?

Dieselmotorers plassbehov. Gir og clutch



Spesifikk motormasse som funksjon av turtall.

Mellomhurtige og hurtige firetaktere må utstyres med gir. Masser for slike gir er ikke inkludert, men vil typisk være 20-30 % av motormassen.

Vi undrer oss på:

Hvor stor masse har verdens største motor som har en akseleffekt på ca. 87000 kW ved ca. 100 o/min og som er vist på side 7-13? Hvor mange vogntog á 50 tonn svarer massen til?

Vi har foran sett at de langsomme totaktsmotorene er gunstigere enn de hurtige firetakterne både når det gjelder brenselsforbruk og vedlikeholdsbehov. Til gjengjeld tar de stor plass og er svært tunge.

Spesifikk masse

Sammenligning mellom de ulike motortypenes masser gjøres gjerne på spesifikk form. Med spesifikk masse mener vi da motorens masse per effektenhet [kg/kW]. Figur til venstre viser tydelig hvor tunge de langsomme totakterne egentlig er.

Plassbehov

Dette er illustrert på neste side ved at de tre motorarrangementene for skipet i eks. 7.4 (se side 7-19) er illustrert i samme skala og med det antall motorer som var nødvendig ifølge skipets effektbehov. Vi ser at det særlig er i høyden at totaktsmotoren med krysshode krever så stor plass.

Hvorfor krysshode? Kreftene som skal overføres fra stempel til veivaksel, er proporsjonale med kvadratet av sylinderdiameteren. Dette stiller store krav til flatetrykkene i veivstangas øvre lager. Det er derfor bare i motorer under en viss størrelse at veivstanga kan lagres opp inne i selve stemplet Slike motorer kaller vi trunkmotorer. Denne konstruktive forskjellen framgår tydeligst på side 7-15.

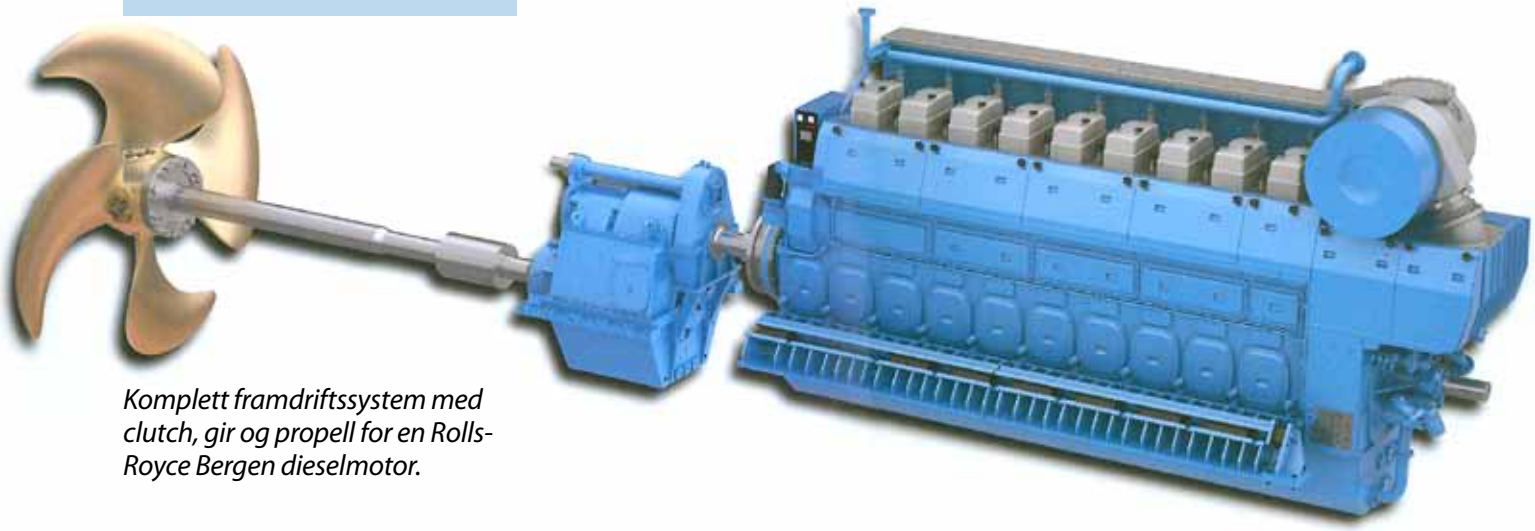
Girboks og clutch

I prinsippet består et gir av to tannhjul som er i inngrep med hverandre. Med et girs *utveksling (i)* mener vi forholdet mellom radiene til de to tannhjulene. Ifølge oppg t.15 gjelder da:

$$i = \frac{R_{ut}}{R_{inn}} = \frac{n_{inn}}{n_{ut}} = \frac{M_{d,ut}}{M_{d,inn}}$$

I et gir reduseres altså turtallet, mens dreiemomentet øker.

I f.eks. et tomotorsanlegg kan det på dellast være ønskelig å kunne kople ut en av motorene. I så fall må anlegget utstyres med clutch, som vist i figur til høyre på neste side.

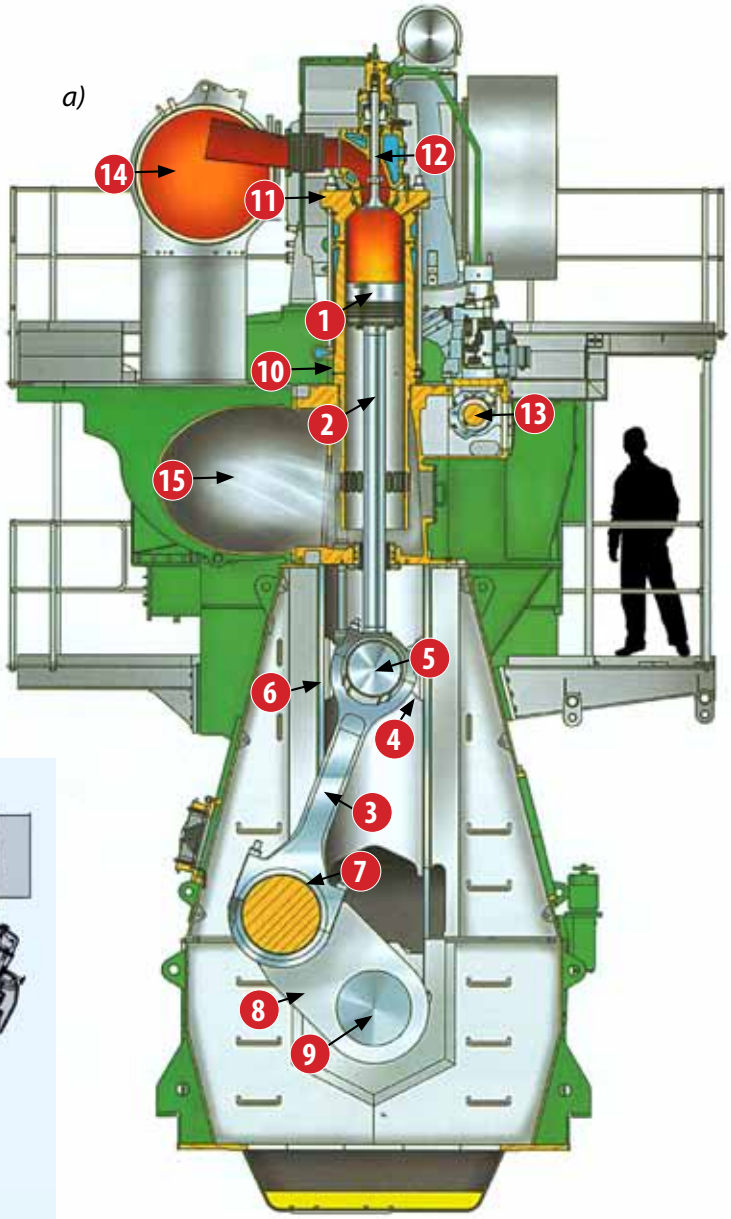


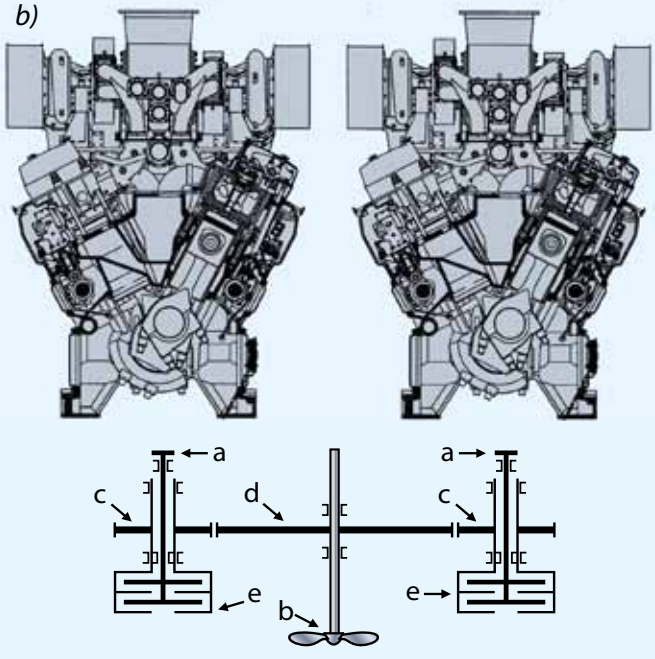
Komplett framdriftssystem med clutch, gir og propell for en Rolls-Royce Bergen dieselmotor.

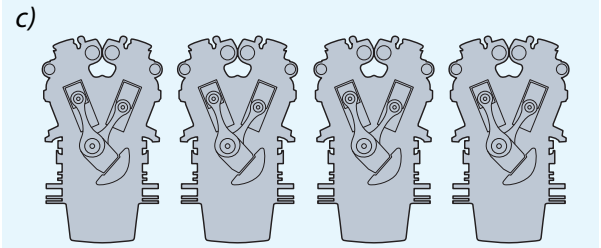
Tverrsnitt av tre motorarrangementer for skip i eksempel 7.4, side 7-19.
a) En langsom MAN totakter med krysshode (motorlengde 9,8 m)
b) To mellomhurtige Rolls-Royce Bergen firetaktere (trunkmotorer, lengde 7,7 m + girboks)
c) Fire hurtige MTU firetaktere (trunkmotorer, lengde 4,0 m + girboks)
Alle arrangementene er i samme skala og har samme totale akseleffekt (ca. 16000 kW)

Sentrale deler i en totakts krysshodemotor

1. Stempel
2. Stempelstang (oscillerende bevegelse)
3. Veivstang (også pendlende bevegelse)
4. Krysshode
5. Kryssbolt
6. Geidplan
7. Veivlager
8. Veivarm
9. Veivaksel (utgående aksel)
10. Sylinderfôring
11. Sylinderhode
12. Avgassventil (hydraulisk drevet)
13. Kamaksel (for drift av avgassventil og brenselinnspr. pumpe)
14. Avgassamler (leder avgass til turbo-laderens avgassturbin)
15. Luftsamler (får luft fra turboladerens kompressor, turboladeren er ikke vist)







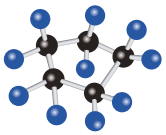
Skjematisk illustrasjon av friksjonsplateclutch
a. Fra dieselmotor
b. Propell
c. Tannhjul drevet av motor når clutchen er inkoplet
d. Tannhjul som driver propellen
e. Clutch-hus, som kan forskyves aksielt slik at det oppstår kontakt med clutch-platene og dermed kraftoverføring ved friksjon

Brensler. Forbrenningsprosesser

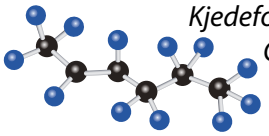
a

Et gassmolekyl CH_4 (Metan)

b



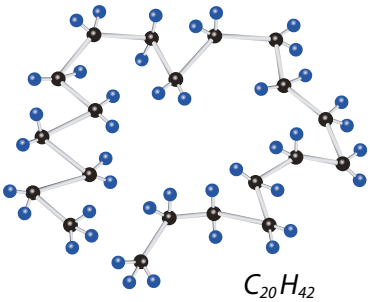
Ringformet C_5H_{10}



Kjedeformet C_6H_{12}

To bensinmolekyler

c



$C_{20}H_{42}$

Et dieselmolekyl

H-atom (atommasseenheter: 1u)

C-atom (atommasseenheter: 12u)

Kjemisk oppbygging av noen molekyler for fossile brensler.

a. Naturgass er en blanding av fire molekyltyper med 1-4 karbonatomer. Hovedbestanddelen er metan. For en typisk blanding gjelder:
Effektiv brennverdi: 48 MJ/kg
Teoretisk luftbehov: 17 kg /kg

b. Bensiner er blandinger av kjede- og ringformede molekyler med 5-12 karbonatomer. Leveres i to hovedkvaliteter med ulike oktantall.

c. Dieseloljer omfatter autodieseloljer med 13-17 karbonatomer og marine dieseloljer i ulike kvaliteter med 15-20 karbonatomer, stort sett i kjedeform. Tungoljer har mer enn 20 C-atomer

Brensler

Brensler som egner seg til bruk i forbrenningsmotorer, er:

- **Hydrogen (H2)**
- **Hydrokarboner (HC-forbindelser)**
  - Naturgass (blanding av fire gasstyper. Se side 10-8)
  - Bensiner (for biler og utenbordsmotorer)
  - Parafiner (for gassturbiner i fly)
  - Dieseloljer (for biler brukes lette "gassoljer", også kalt autodieselolje, for skip og båter brukes tyngre kvaliteter, kalt "Marine Gas Oil", Marine Diesel Oil (MDO) eller marin dieselolje
  - Tungoljer (Heavy Fuel Oils, flere typer med lite/mye S)
- **Biobrensler (HCO-forbindelser)**
  - Alkoholer (etyl- og metylalkoholer, som bensintilsetning)
  - Biodieseloljer

Hydrogen (H_2) framstilles enten ved elektrolyse av vann (krever elektrisk energi) eller ved avspalting fra HC-produkter i raffinerier (gir utslipp av CO_2). Hovedfordelen med bruk av hydrogen som brensel er absolutt rene avgasser (H_2O), ulempen er at den meget lave tetthet enten krever frakting på trykktanker eller i nedkjølt form.

Hydrokarbonene er nærmere beskrevet på sidene 10-8/9. Her framgår blant annet hvordan de er dannet og hvordan de framstilles av råoljer. Vi skjønner av dette hvorfor slike brensler egentlig er langtidslagret solenergi (fra fotosynteser for millioner av år siden) og hvorfor de dermed kalles fossile brensler. Hovedfordelen med hydrokarboner som brensel er at de er meget energirike og dermed enkle å frakte. Hovedulempen er at de ved forbrenning gir avgasser som både er skadelige for klimaet (CO_2) og for menneskers helse (se figur på neste side). I tillegg til hydrogen (H) og karbon (C) er disse brenslene i en viss grad "forurenset" med svovel (S) fra den gang de ble dannet. Også svovelinnholdet medfører skadelige avgassutslipp. Råoljen kan også inneholde mindre mengder oksygen fra nedbrytingsprosessene.

Stort sett gjelder følgende data for brenslene i lista ovenfor:

- Brennverdien synker fra 48 MJ/kg for naturgass til 40 for tungoljer
- Luftbehovet synker fra 17 kg/kg for naturgass til 14 for tungoljer
- Tettheten øker fra 0,75 kg/dm^3 for bensin til nesten 1,0 for tungoljer

Biobrensler. Disse produseres av planter eller biologiske rester og baseres altså på produkter som har framkommet av *nylige* fotosynteser. Fotosyntesen er en prosess som bruker solenergi, vann og CO_2 (se side 11-7). Vi kan altså si at biobrenslene inneholder *korttidslagret solenergi.* Biobrenslene har dermed nylig tatt ut like mye CO_2 fra atmosfæren som de kommer til å slippe ut igjen når de senere forbrennes i motorer. De gir altså ikke noe *netto* CO_2-utslipp (når vi ser bort fra utslippene fra innhøsting og etterfølgende prosesser). Dette er hovedfordelen med biobrenslene. Den største ulempen er at de ved store forbruk vil "konkurrere" med matproduksjonen på jorda.

Forbrenningslære

Teoretisk luftbehov ved forbrenning. De kjemiske prosesser som foregår ved forbrenning av hydrokarboner og svovel, beskrives slik:

$O_2 + C = CO_2 + \text{varme}$
$O_2 + 4H = 2H_2O + \text{varme}$
$O_2 + S = SO_2$

Det er relativt enkelt å vise (se oppgave 7.3) at den luftmengde som er nødvendig for å forbrenne 1 kg brensel, blir

$(L/B)t = 1{,}276 \cdot 22{,}7 \cdot (c/12 + h/4 + s/32 - o/32) / 0{,}21$ [kg luft / kg brensel]

Her er c, h , s og o masseandelene av karbon, hydrogen svovel og oksygen per kg brensel. Typiske sammensetninger for de ulike brenseltypene gir teoretiske luftbehov på ca. 15 kg/kg for bensiner, 14,5 for dieseloljer (litt mindre for biodiesel) og 14 kg/kg for tungoljer. For naturgass (metan) vises til oppgave 7.3.

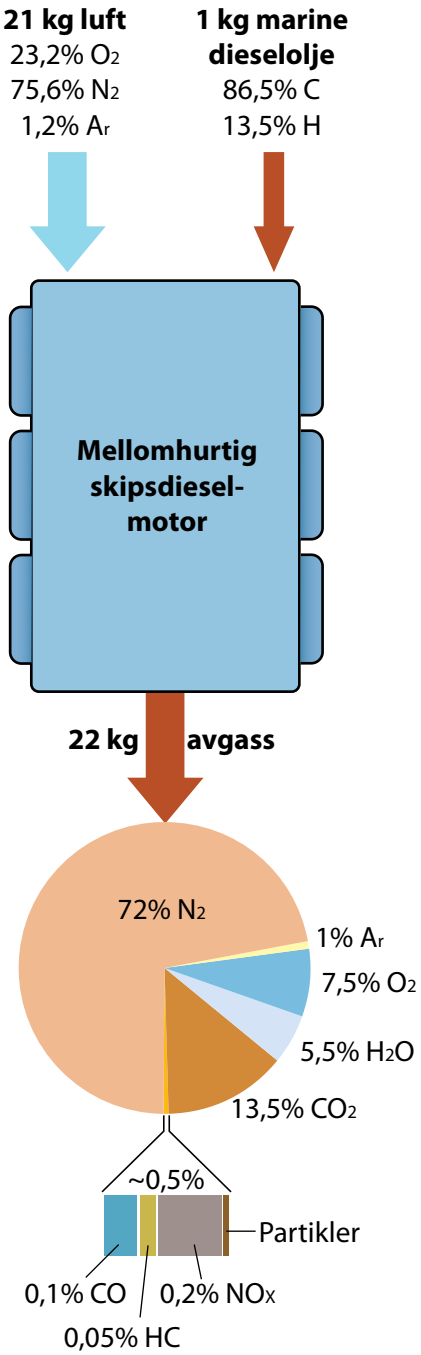
Virkelig luftbehov. Når det gjelder det virkelige luftbehovet, er det stor forskjell mellom ottomotorer og dieselmotorer. I dieselmotorer sprøytes brenslet inn i forbrenningsrommet i løpet av noen få veivgrader rundt Ø.D. Det blir dermed for liten tid til å oppnå en perfekt blanding mellom luft og brensel. Konsekvensen av dette er at dieselmotorer må ha et visst luftoverskudd i sylinderen for å oppnå en tilfredsstillende forbrenning. Det beskriver vi ved hjelp av en luftfaktor som defineres slik:

λ = Virkelig blandingsforhold (L/B)v / Teoretisk forhold (L/B)t

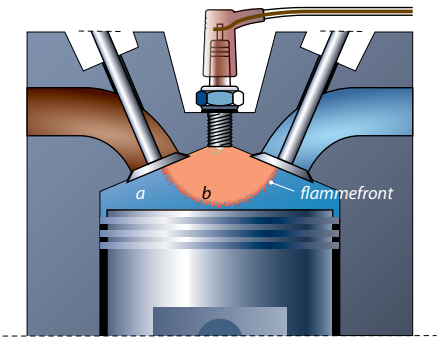
- For dieselmotorer vil λ = ca. 1,5-2,0 for hurtige og mellomhurtige firetaktsmotorer og λ = ca. 2,0-2,5 for langsomme totaktsmotorer.
- For ottomotorer for bildrift (bensinmotorer) må λ være meget nøyaktig lik 1,0 av hensyn til virkemåten for katalysatoren.
- For større ottomotorer for fartøy/skipsdrift er luftfaktoren ca. 1,8.
- For gassturbiner nyttes luftfaktorer λ = ca. 3 for å holde temperaturen etter forbrenningen tilstrekkelig lav (se side 7-31)

Avgassammensetning. Skadelige utslipp. Vi kan nå resonnere oss fram til hva avgassen fra en dieselmotor i hovedsak består av, se figur i margen. *Siden nitrogen (N_2)* er hovedbestanddelen i den lufta som tilføres, er det klart at denne gassen også må være den største bestanddelen i avgassen fra motoren. Videre inneholder avgassen *oksygen* **(O_2)** fordi en dieselmotor alltid går med luftoverskudd slik at all lufta ikke brukes opp under forbrenningen. Av forbrenningsligningene øverst på siden ser vi videre at *karbondioksid (CO_2), vanndamp (H_2O)* og *svoveldioksid (SO_2)* vil være til stede i avgassen.

Under forbrenningsprosessen dannes det imidlertid også stoffer som er direkte helseskadelige for mennesker. *Karbonmonoksid (CO)* dannes på grunn av ufullstendig forbrenning. En meget liten andel av brenselet forbrenner overhodet ikke og kommer ut igjen som *hydrokarboner* **(HC).** Til slutt har vi imidlertid enda to, meget viktige, helsekadelige stoffer, nemlig *nitrogenoksider (NOx)* og *partikler (PM)*, se neste side.

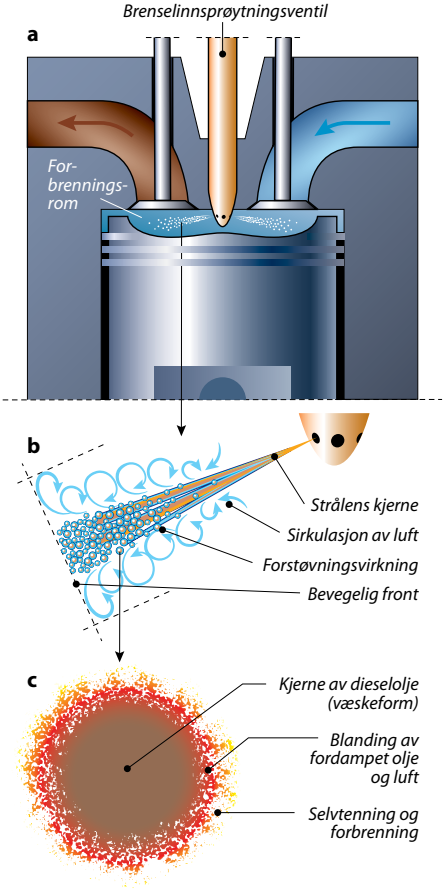


Sammensetning av avgassen fra en mellomhurtig, firetakts dieselmotor.
Du kan lese mer om dannelse og utslipp av nitrogenoksider (NOx) og partikler (PM) på neste side.



a = uforbrent ladning b = forbrent ladning

Skjematisk illustrasjon av forbrenning i en ottomotor



Skjematisk illustrasjon av forbrenning i en dieselmotor:

a) Forbrenningsrom med stråler av innsprøytet dieselolje

b) Dieseloljestråle med forstøvning fra overflate (små dråper rives løs p.g.a. friksjon mot lufta)

c) En dråpe sterkt forstørret. Forbrenning starter ved selvtenning i en blanding mellom luft og fordampet dieselolje på dråpens overflate

Forbrenningsprosesser

Forbrenning i bensinmotorer. Først bør du på nytt lese om forskjellen mellom otto- og dieselmotorer på side 7-12. Brensel for ottomotorer i biler eller utenbordsmotorer er som kjent bensin. Denne kan i en viss grad være blandet opp med HCO-forbindelser med høye oktantall (alkoholer og syntetiske brensler). Mellomhurtige ottomotorer for skipsdrift bruker naturgass som brensel. Forbrenningsprosessen i slike gassmotorer tas opp på neste side. Både bensinmotorer og gassmotorer er ottomotorer og kjennestegnes altså ved at forbrenningen starter med det vi kaller fremmedtenning. Dette er som regel en gnist, og denne kommer like før øvre dødpunkt.

I bensinmotorene har bensinen normalt blitt tilført allerede foran innløpsventilen, og har dermed fått god tid til å fordampe og blande seg med lufta, slik at det er blitt dannet en homogen blanding mellom luft og brensel. Blandingsforholdet er slik at luftfaktoren blir meget nøyaktig lik 1,0, noe som gir gode forhold for forbrenningsprosessene øverst på forrige side. Etter at gnisten har satt i gang forbrenningen, vil denne fullføres ved at en flammefront brer seg svært hurtig gjennom hele forbrenningsrommet, se figur i margen. I flammefronten kan tempe-raturen være mer enn 3000 °C.

Forbrenningen i dieselmotorer foregår på en helt annen måte. Figuren i margen viser et forbrenningsrom for en mellomhurtig dieselmotor. Brenslet sprøytes inn i dette rommet i form av en stråle like før stemplet når øvre dødpunkt. Da har lufta i sylinderen blitt komprimert opp til et trykk på mer enn 100 bar, og temperaturen har steget til mer enn 800 °C. Det høye trykket gjør at lufta får stor tetthet. Det blir derfor stor friksjon mellom strålens overflate og lufta. Friksjonen bryter løs små dråper fra strålens overflate. På grunn av den høye temperaturen vil dråpene raskt varmes opp, og det skjer en fordamping fra overflaten. Denne brenseldampen vil blandes med den meget varme lufta. I et slikt miljø vil prosessene øverst på side 7-27 starte av seg selv. Den høye temperaturen gjør at både oksygenmolekyler og brenseldampmolekyler har oppnådd stor kinetisk energi (både translasjoner og rotasjoner), se side 7-6. Dermed er det lagt til rette for kraftige kollisjoner mellom oksygenmolekyler og brenseldampmolekyler. Molekylene "knuses" og erstattes av nye atomkombinasjonene, som beskrives av ligningene på side 7-27. Vi sier da at brenslet **selvtenner**. Når forbrenningen først har kommet i gang, stiger temperaturen dramatisk i forbrenningssonene, og forbrenningen brer seg raskt gjennom alle dråpene og strålen.

Dannelse av nitrogenoksider (NO_x). Nitrogenoksider (NO_x) er et samlenavn for nitrogenoksid (NO) og nitrogendioksid (NO_2). Det er imidlertid primært NO som dannes i motorer, mens NO_2 stort sett oppstår ved ytterligere oksidasjon i atmosfæren. Nitrogenoksid (NO) dannes etter reaksjonsligningen

$$N_2 + O_2 = 2\,NO$$

Dette er en prosess som krever høye temperaturer, så høye at N_2- og O_2-molekylene oppnår en kinetisk energi og dermed en fart som er stor nok til at kollisjoner mellom molekylene gir det resultat som ligningen ovenfor beskriver. Samtidig skjønner vi imidlertid at stor konsentrasjon av O_2-molekyler vil øke sjansene for at den nødvendige kollisjonen inntreffer. Dieselmotorer, som jo arbeider med luftoverskudd, har derfor gjerne større NO-utslipp enn ottomotorer.

Dannelse av partikler (PM, Particulate Matter). Dette er stoffer som er skadelige for mennesters lungefunksjon. Det er bare dieselmotorer som slipper ut partikler i mengder av betydning. Partiklene dannes ved at den innerste kjernen i enkelte av brenselsdråpene vist foran, ikke "møter" nok oksygenmolekyler til å få skikkelig forbrenning. I stedet dannes partikler som stort sett består av sot. Vi skjønner straks hvor mye bedre det er med gass som brensel.

Forbrenning i gassmotorer. Bruk av naturgass som brensel i stedet for dieseloljer har en rekke fordeler av miljømessig betydning, se nedenfor. Vi har allerede på side 7-12 pekt på at dieselmotoren oppnår sin gode virkningsgrad først og fremst fordi den arbeider med høyere kompresjon enn ottomotoren. I ottomotor med bensindrift begrenses kompresjonsgraden av bensinens oktantall, som i dag normalt er 92 eller 95. Oktantallet beskriver bensinens evne til å motstå selvtenning slik at forbrenningen ikke skal starte før gnisten kommer.

Det er dette som oppnås når vi går over til bruk av naturgass som brensel. Naturgass består hovedsakelig av metan som har et oktantall på nesten 120. Dessuten viser det seg at oktantallet til en brensel/luft-blanding øker med luftfaktorer opp til 1,8. *Ved å basere en gassmotor på naturgass og bruke en luftfaktor på omtrent 1,8, kan en slik motor utføres så høykomprimert at den får en virkningsgrad som kan konkurrere med en dieselmotor.*

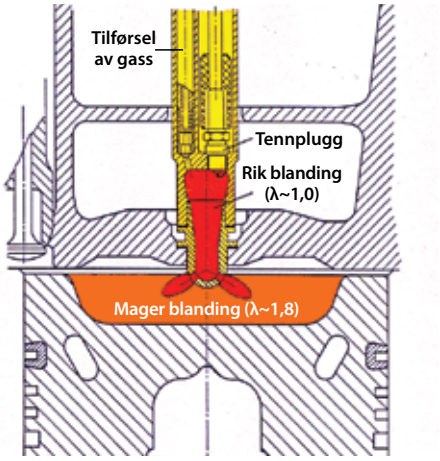
Selve forbrenningsprosessen framgår av figur og tekst øverst i margen

Og dermed har vi altså fått en gassmotor med gode ytelser og som har følgende formidable fordeler sammenlignet med en dieselmotor:

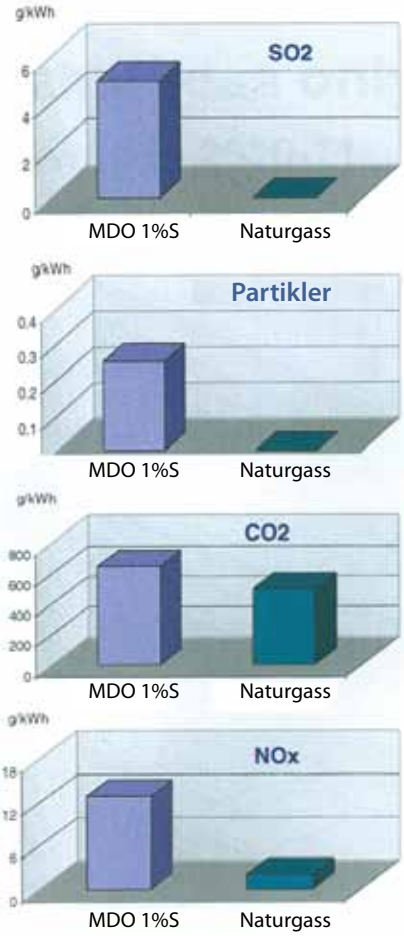
- Utslipp av svoveldioksid (SO_2) er fullstendig eliminert, fordi naturgass (levert enten som CNG eller LNG) ikke inneholder svovel (S) i det hele tatt
- Utslipp av partikler er nesten lik null, fordi partikkeldannelse først og fremst opptrer ved forbrenning av brenselsdråpene i dieselmotorer, se ovenfor.
- Utslipp av CO_2 er redusert med 26 %, fordi metan inneholder en mindre andel karbon per kg brensel enn dieseloljer, se side 7-26 og oppgave 7.2.
- Utslipp av nitrogenoksider (NOx) er redusert med 80-90 %, fordi maksimal forbrenningstemperatur reduseres når luftfaktoren øker.

For ordens skyld bør vi nevne at bruk av naturgass ikke bare har fordeler. Lagertanker for å kunne ta med tilstrekkelige mengder med brensel betyr en vesentlig komplikasjon i forhold til de enkle dieseloljetankene. Dette gjelder enten gassen oppbevares under høyt trykk (CNG) eller i nedkjølt form (LNG).

Det finnes også en variant av gassmotorer som vi kaller "dual fuel-motorer". Med disse kan man velge om det skal kjøres på dieselolje (som beskrevet på forrige side) eller gass. I siste tilfelle brukes en liten innsprøytingsdusj som "tennstråle" i stedet for den tennpluggen som er vist øverst på denne siden for "otto-mager-motoren".

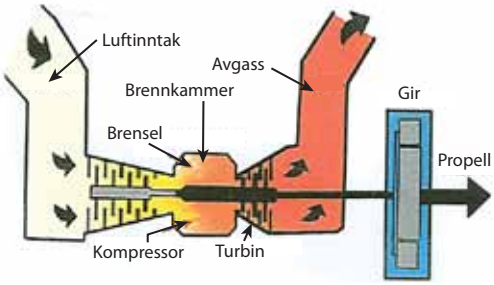


Forbrenning i Rolls-Royce "Otto mager gassmotor".
Forbrenningen starter i et forkammer med rik blanding, og stråler med brennende gass sprøytes inn i hovedforbrenningsrommet med mager blanding hvor resten av gassen forbrenner.



Skadelige utslipp ved drift med MDO (Marine Diesel Oil) sammenlignet med drift med naturgass.
Fra [9.13, kilde: Rolls-Royce Marine]

Gassturbiner



Prinsipiell virkemåte for en gassturbin

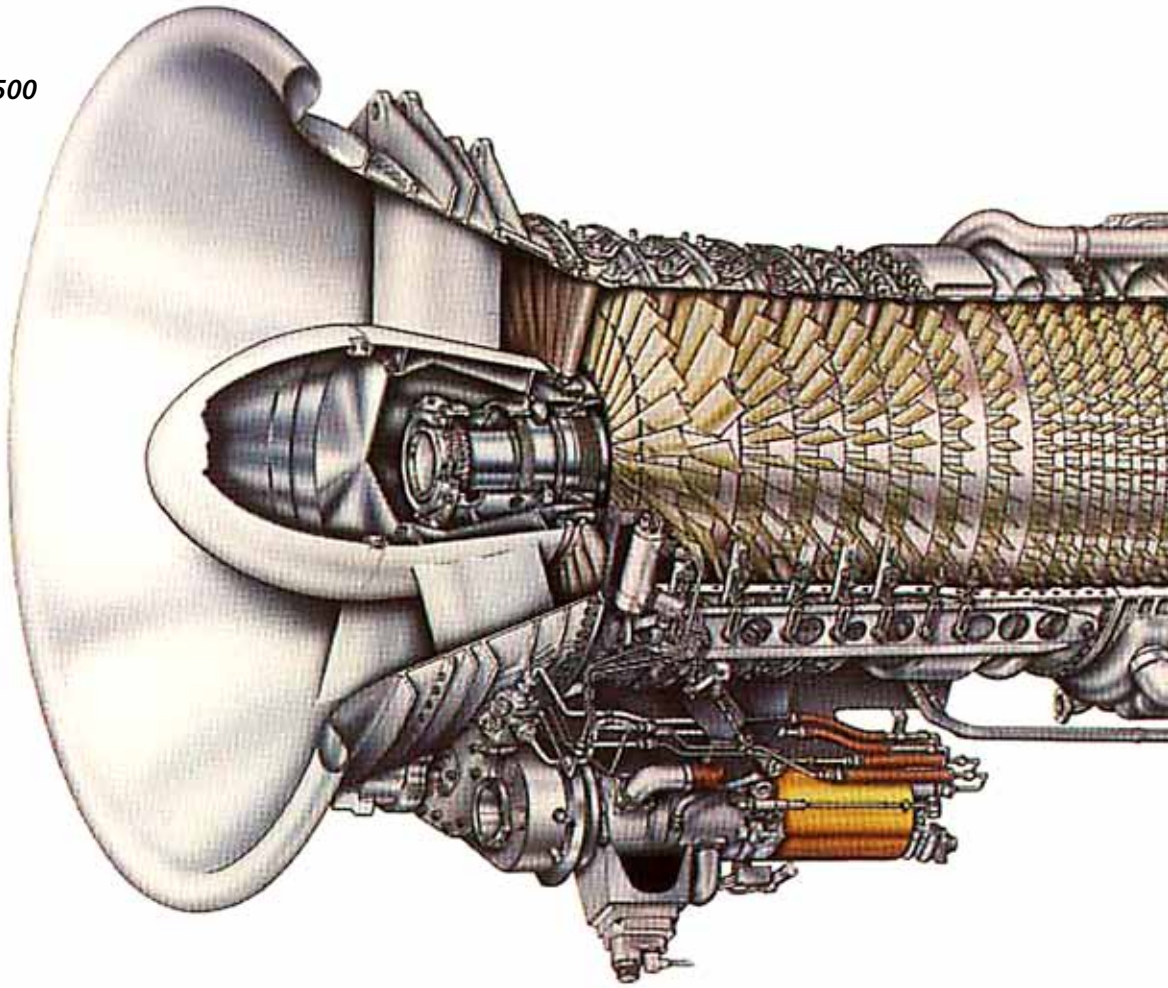
Verdens første gassturbin ble bygd i 1903 av den norske ingeniøren Ægidius Elling. Den hadde en effekt på 11 hk. Konstruksjonen var fremragende både varmeteknisk og strømningsteknisk, men materialteknikken var den gang ikke kommet langt nok til at turbinen fikk noen praktisk betydning. Blant annet var sigefastheten for dårlig for turbinskovlene.

Innledningsvis bør du på nytt se på sidene 7-8/9 hvor det framgår at gassturbiner til havs brukes til framdrift av fartøy (system nr. 3 og 4, både ved drift med propell og med vannjet). Vi ser videre av tabellen at gassturbiner også brukes sammen med elektrisk generator til kraftverk på plattformer (system nr. 20). Du bør også lese sidene 7-10/11 på nytt. Her får du prinsipielt beskrevet arbeidsprinsippet for gassturbiner, hva som skiller dem fra stempelmotorer og hvorfor de har så dårlig virkningsgrad (altså høyt brenselsforbruk).

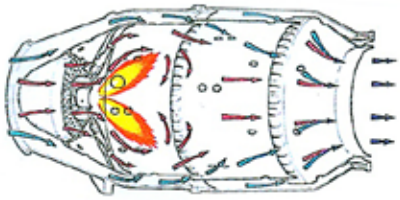
Gassturbiners virkemåte

Vi skal se litt nærmere på hvordan gassturbiner arbeider. Arbeidsprosessen er vist sammen med arbeidsprosessen til en dieselmotor på side 7-32. Vi ser der både hva de to motortypene har felles og hva som skiller dem. Begge har en kompresjonsprosess, en forbrenningsprosess og en ekspansjonsprosess. I begge tilfelle kan disse framstilles i trykk—volum-diagrammer, hvor de lukkede flatene er uttrykk for det arbeidet som utføres. Det er imidlertid også klare forskjeller mellom gassturbinen og dieselmotoren, blant annet:

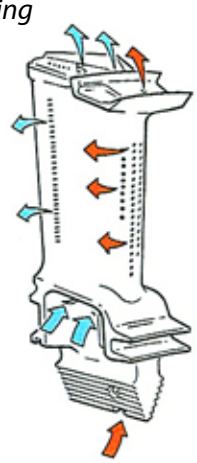
General Electric gassturbin, type LM 2500
Effekt: 25000 kW
Totrinns arbeidsturbin: Høytrykkstrinnet driver kompressoren, og lavtrykkstrinnet driver lasten. Det er flere brennkammere plassert rundt omkretsen



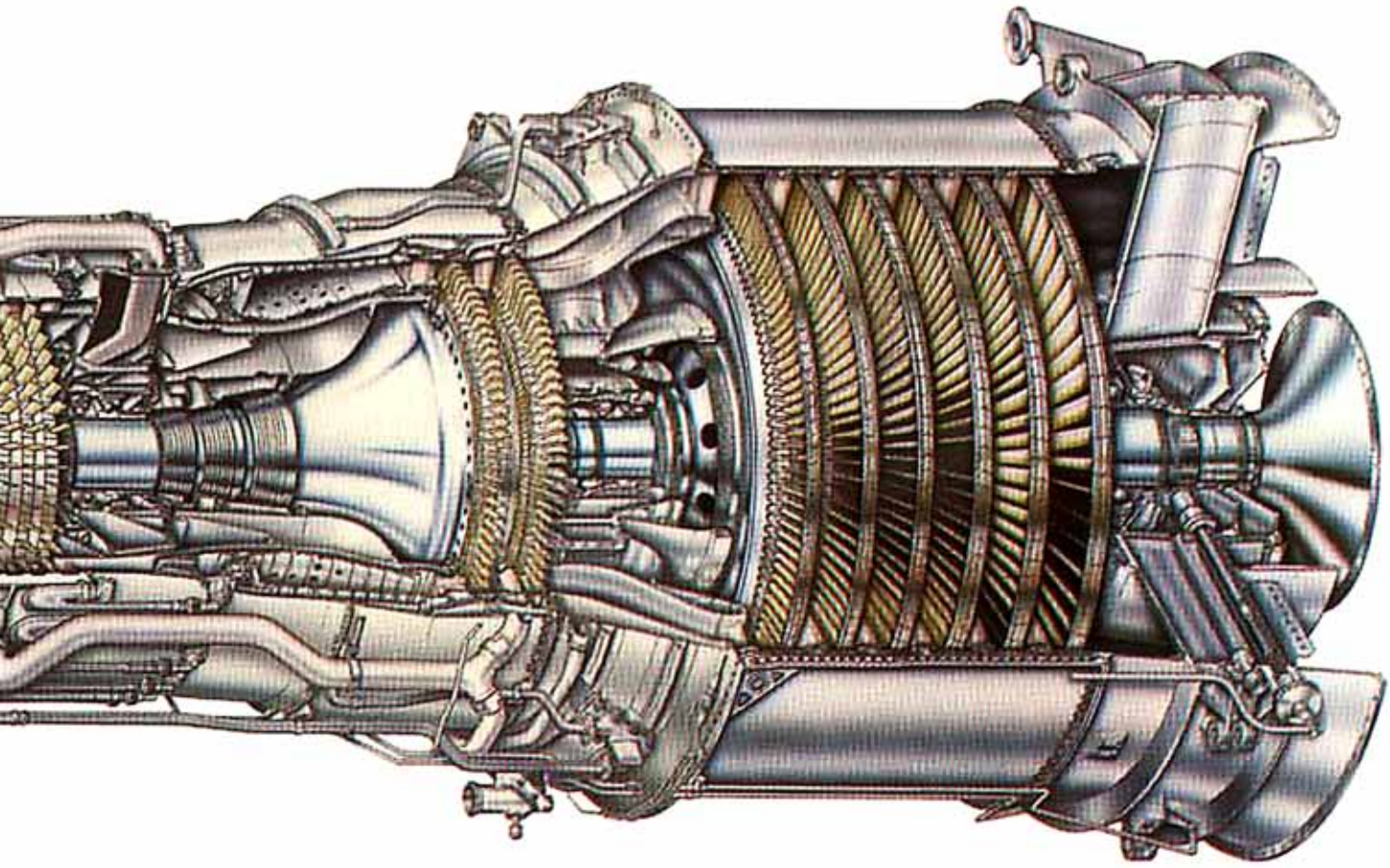
- **Vesentlig mindre kompresjon** i en gassturbin og dermed både lavere kompresjonstrykk og -temperatur. Kompresjonen skjer i et turbinhjul og ikke i sylindere.
- **Kontinuerlig forbrenning** i en gassturbin og diskontinuerlig i en dieselmotor. Dette er en meget viktig forskjell, se side 7-11.
- **Litt synkende trykk under forbrenningen** i en gassturbin. Under forbrenningen strømmer forbrenningsgassene videre til arbeidsturbinen samtidig som trykket dermed synker litt. Dette er ikke tilfelle i en dieselmotor. Her vil *første del* av forbrenningen skje meget raskt, slik at trykket stiger betydelig, se arbeidsdiagrammene på neste side. Det maksimale trykket i en gassturbin er bare 18-20 bar, mens det kan bli mer enn 200 bar i en mellomhurtig dieselmotor.
- **Relativt lave forbrenningstemperaturer** sammenlignet med en dieselmotor. Vi har flere ganger foran nevnt at det av materialtekniske grunner er meget viktig å holde temperaturene som skovlene i arbeidsturbinen utsettes for, under kontroll. Disse skovlene får stor påkjenning av formidable sentripetalkrefter under rotasjonen, og de vil begynne å "sige" hvis materialet blir for varmt. I den gassturbinen som er vist nedenfor, må derfor temperaturen på forbrenningsgassene ikke overstige 1200°C. Dette på tross av at skovlene blir kjølt ved hjelp av kjøleluft som strømmer gjennom innvendige boringer i de tynne bladene, se figur. Som vi skjønner, blir framstilling av slike turbinblad komplisert og kostbart. Da er kjøling av de varmebelastede deler i en dieselmotor (stempel, topplokk, avgassventiler) vesentlig enklere. Her er forbrenningstemperaturene mer enn dobbelt så høye. Som tidligere nevnt, forklarer dette dieselmotorens gode virkningsgrad. Det relativt lave temperaturnivået i gassturbiner oppnås ved å bruke mye mer luft i forhold til brenselsmengden enn i en dieselmotor, altså ved å bruke høyere luftfaktor, se side 7-27.

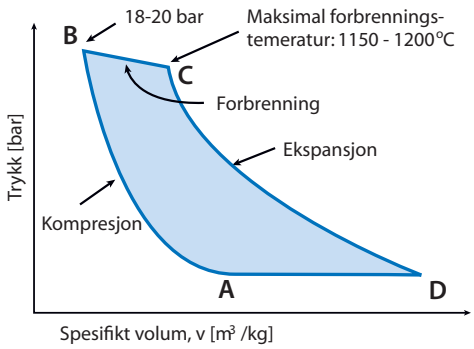


Forbrenning og strømning i et brennkammer i en Rolls-Royce gassturbin. *Røde piler viser lufttilførsel og forbrenningsgasser fra forbrenningen. Blå piler viser luftkjøling*



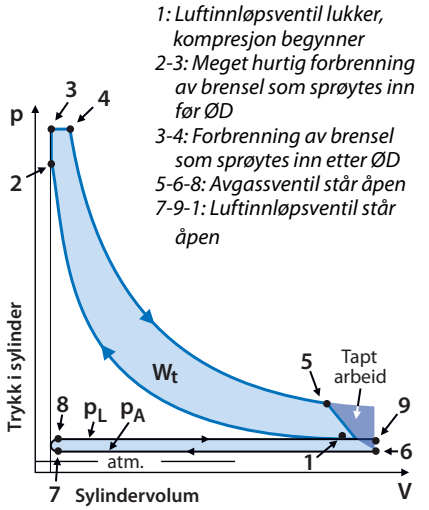
Innvendig luftkjøling av skovl for arbeidsturbin (Rolls-Royce). *Røde piler viser strømning av kjøleluft med høyt trykk og blå piler luft med lavt trykk*





Arbeidsdiagram for en gassturbin

Arbeidsdiagrammer for en gassturbin og en dieselmotor er sammenstilt i figurene til venstre. I begge tilfelle er trykkforløpet framstilt som funksjon av volumer. For gassturbinen, som er en strømningsmaskin, brukes imidlertid spesifikt volum (v, m^3/kg), mens det for dieselmotorer selvsagt brukes volumer i m^3 (V) langs førsteaksen. Arbeidet som svarer til de lukkede flatene, vil dermed være Joule/kg luft for gassturbinen og Joule per sylinder for dieselmotoren. For øvrig er figurene selvforklarende.



Arbeidsdiagrammer for en gass turbin og en mellomhurtig, firetakts dieselmotor.
For gassturbinen framgår virkemåten av påskriftene, for dieselmotoren vises til se side 7-15

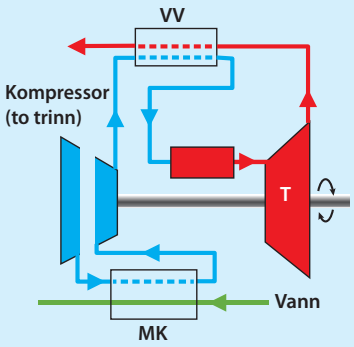
Anvendelser

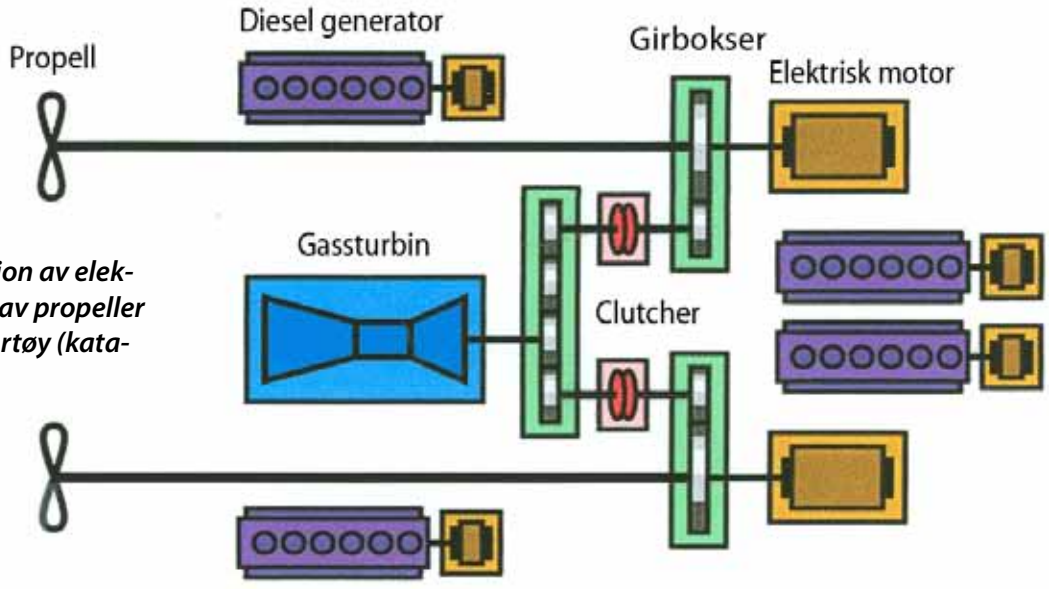
Som tidligere nevnt, brukes gassturbiner lite til framdrift av skip med propell fordi brenselsforbruket er for høyt. Unntaket er når gassturbinens beskjedne plassbehov og lave vekt spiller en viktig rolle. Dette er som kjent tilfelle i hurtiggående båter drevet med propell eller vannjet (semideplasementsfartøyer eller planende fartøyer). Figuren nedenfor viser et slikt fartøy (propelldrevet).

For øvrig anvendes gassturbiner i stor grad til drift av generatorer i kraftverk om bord i plattformer som ikke får elektrisk energi overført fra land. Også dieselmotorer brukes til å produsere elektrisk energi i plattformer, se figur side 8-13.

Forbedring av virkningsgrad
To vanlige metoder:
- *Mellomkjøling (MK)*
- *Varmeveksling (VV)*

Slike tiltak gjør imidlertid anlegget både mer kostbart, komplisert og tyngre. Særlig det siste er en vesentlig ulempe





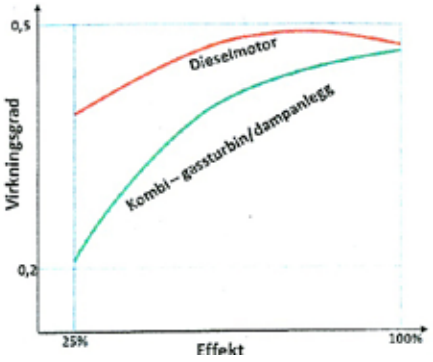
Anlegg for produksjon av elektrisk energi og drift av propeller i et hurtiggående fartøy (katamaran).

Gassturbin og dampturbin – kombianlegg

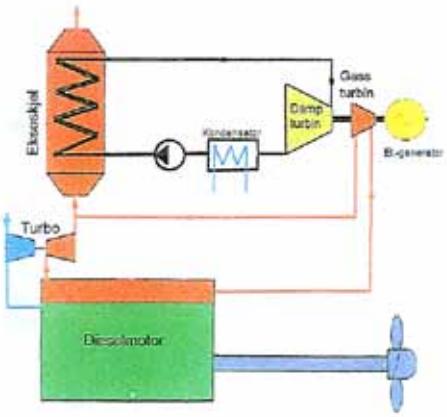
Hver for seg har gassturbin og dampturbin relativt lave virkningsgrader. Årsaken til dette er grunnprinsippet for en varmemaskin der virkningsgraden er avhengig av temperaturspranget over prosessen. Temperaturspranget totalt sett for gassturbinen og dampturbinen blir større i et kombianlegg, og dermed oppnås en høyere total virkningsgrad. Et slikt kombianlegg kan oppnå virkningsgrad opp mot 0,5. Figuren under viser energiflyten i et slikt anlegg.

Årsaken til at slike kombianlegg i svært liten grad er benyttet for energiproduksjon om bord i skip, er tre sentrale egenskaper:

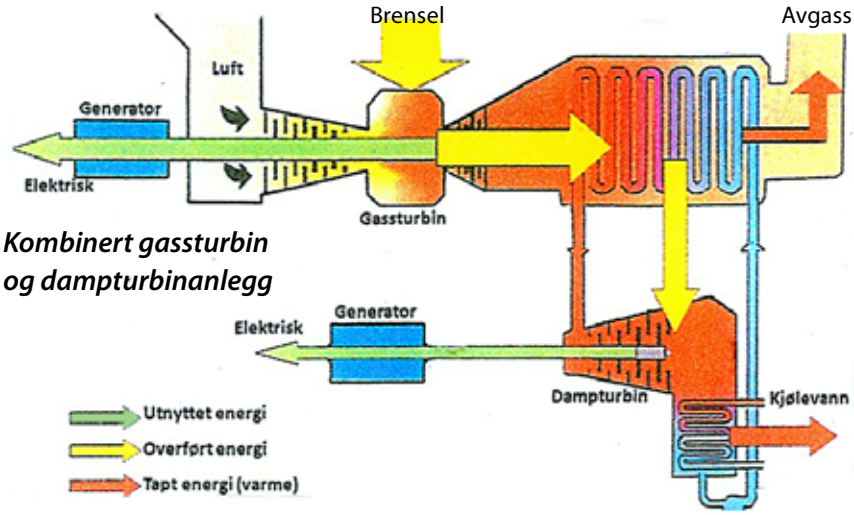
- Virkningsgraden er svært lastavhengig og avtar dramatisk når lasten avtar
- Systemet har mye tregere responstid enn en dieselmotor og har problemer med å håndtere raske lastvariasjoner, som for eksempel under manøvrering av et skip
- Systemet setter høye krav til rene brensler. Tyngre, billige brensler som inneholder svovel og andre urenheter, vil føre til skade på gassturbinen.



Virkningsgrader for gassturbin/ dampturbin kombianlegg sammenlignet med dieselmotor



Kombinasjon av dieselmotor og dampanlegg



Kombinert gassturbin og dampturbinanlegg

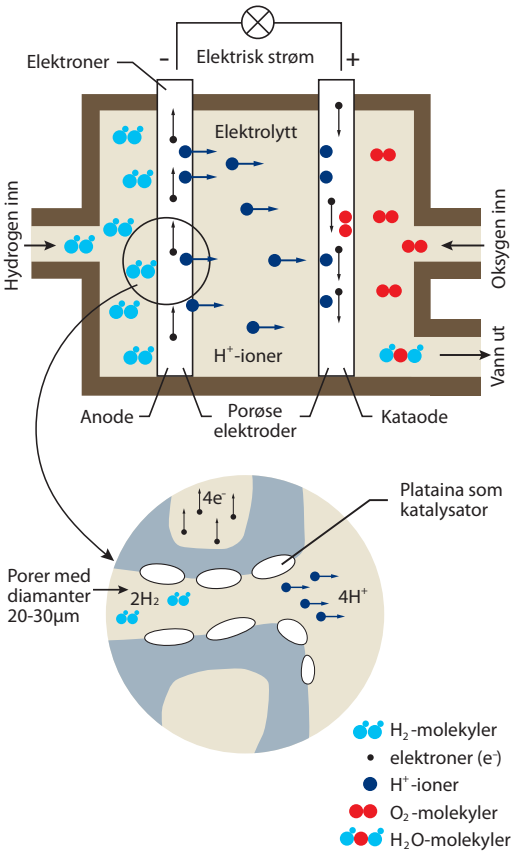
Mulige anvendelser av gassturbin og dampturbin til energiproduksjon om bord i skip.

- For skip med ekstreme krav til lav vekt og høy effekt er gassturbin ofte den eneste løsningen.
- For skip med drift på naturgass (LNG) kan kombinert gassturbin/ dampanlegg i noen tilfelle konkurrere med dieselmotorer
- For å øke virkningsgraden ytterligere for dieselmotoranlegg kombineres dette med et dampanlegg som gjenvinner noe av avgasstapene fra motorene. Dette er system som er og har vært i bruk, men kost—nytte-forholdet er kun lønnsomt på anlegg med store effekter. Et slikt anlegg kan øke totalvirkningsgraden med 5-10 %, forutsatt et relativt avansert system. Figuren i midten viser hovedprinsippene for gjenvinning av avgassenergi.

Vi undrer oss på:

Når brensler omformes til mekanisk energi, produseres det samtidig mye "spillvarme". Hvorfor kaller vi det "spillvarme", og hvordan kan vi utnytte denne energien på en bedre måte?

Produksjon av elektrisk energi ved hjelp av brenselceller



Skjematisk framstilling av virkemåten for en PEM brenselcelle. *Begge elektrodene er av grafitt og utformet slik at brenslet (H_2) og oksidasjonsmiddelet (O_2 i lufta) strømmer gjennom innvendige porer. Ved anoden ioniseres hydrogenet i:*

- *Elektroner, som vandrer gjennom den ytre kretsen*
- *Positive hydrogenioner (H+), som beveger seg gjennom elektrolytten til katoden*

Oksygenatomene i den porøse katoden ioniseres (blir negative) ved at de her fanger opp elektronene. Disse negative oksygenionene vil så slå seg sammen med de positive hydrogenionene og danne vann.

På side 7-8/9 er det gitt en oversikt over ulike metoder for produksjon av elektrisk energi til havs. En av de oppførte metodene (nr. 11) er bruk av brenselceller. For ordens skyld skal vi nedenfor gi en nærmere beskrivelse av denne muligheten, selv om det synes å være svært "høyt opp og langt fram" før den får noen praktisk betydning til havs.

Brenselceller ble utviklet allerede i 1969 for Apollo 11 hvor det var behov for å kunne produsere elektrisk energi innenfor et lukket system. Utvikling pågår fortsatt, men i dag er motivasjonen særlig knyttet til miljøspørsmål. Teknologien har imidlertid sine begrensninger, og det store gjennombruddet har ikke kommet. Foreløpig er det bare utviklet brenselceller for relativt små effekter, og det stilles mange spørsmål til om dette er en teknologi som har særlig potensial ut over helt spesielle anvendelser.

Hvordan virker en brenselcelle?

En brenselcelle kan vi enkelt si er et reversert elektrolyseapparat. I kjemien lærer vi at elektrolyse er en prosess der vi bruker elektrisk strøm til å forandre kjemiske forbindelser. Disse elektrokjemiske reaksjonene foregår i en elektrisk ledende væske, elektrolytten. Ved elektrolyse av vann blir vannmolekyler splittet til hydrogen- og oksygenmolekyler. I en brenselcelle går prosessen den andre veien. Hydrogen og oksygen reagerer med hverandre og danner vann. Samtidig frigjøres elektrisk energi.

Elektrolyse: H_2O + elektrisk energi → $H_2 + ½\ O_2$
Brenselcelle: $H_2 + ½\ O_2$ → H_2O + elektrisk energi

Temperaturnivået under oksidasjonsprosessen i en brenselcelle er mye lavere enn det vi får ved en vanlig forbrenning av hydrogen. Ofte sier en derfor at en brenselcelle arbeider med "kald forbrenning". Dette er misvisende. Selv om vi i begge tilfelle har en oksidasjon av et brensel, er prosessene prinsipielt forskjellige. I en vanlig forbrenning i en varmemotor omdannes den kjemiske energien til *termisk energi*, mens vi i en brenselcelle får omdannet den kjemiske energien *direkte til elektrisk energi*. De grunnleggende lovene som styrer disse to prosessene, er vesensforskjellige og resulterer i forskjellig virkningsgrad. Anlegg med brenselcelle og elektromotor gir generelt bedre totale virkningsgrader enn anlegg med forbrenningsmotor av sammenlignbar størrelse.

Egenskaper til brenselceller. Den viktigste fordelen til brenselceller er miljøvennligheten. Med hydrogen som drivstoff er avgassen ren vanndamp. Her må vi imidlertid merke oss at hydrogen bare er en energibærer som må lages basert på en annen energikilde. Dermed kan dette bli et spørsmål om å redusere lokale utslipp på bekostning av de globale. Unntaket er når brenselcellen bruker hydrogen som er produsert av fornybar energi.

Når energikilden er metan, et annet hydrokarbon eller metanol, må vi i tillegg til selve brenselcellen ha en reformator som skiller ut hydrogenet fra brenslet. Slike prosesser gir imidlertid biprodukter som inneholder karbon (CO og CO2) og er altså ikke forurensningsfrie.

Brenselceller for høye effekter blir plasskrevende, se figur nedenfor. Totalvirkningsgraden blir heller ikke tilfredsstillende. De store og mest effektive høytemperaturcellene trenger dessuten oppvarming til svært høye temperaturer før de fungerer og blir dermed trege.

Anvendelse av brenselceller

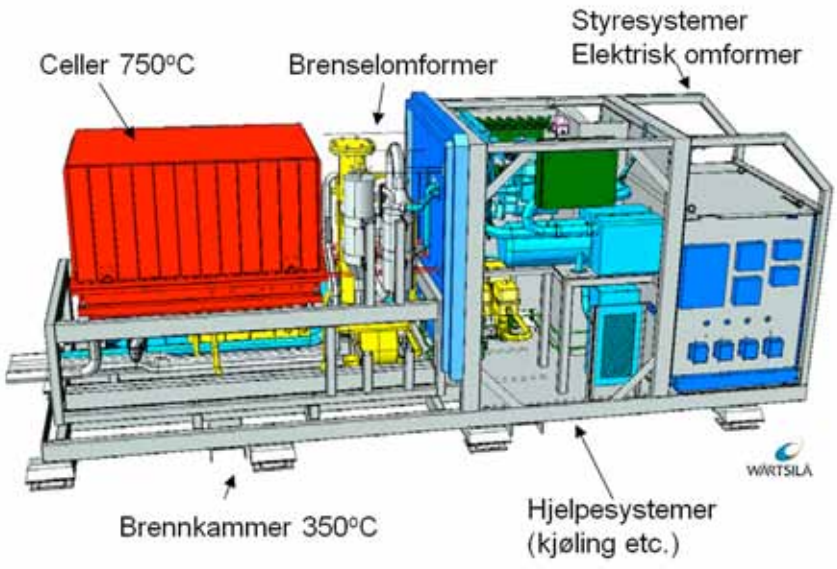
Brenselceller egner seg til spesielle anvendelser der det lokale miljøet er i fokus. Små lavtemperatur brenselceller er i bruk som strømforsyningsenheter til ulike formål der lave effekter er tilstrekkelig. For større effekter er det høytemperaturcellene som er aktuelle, men med eksisterende teknologi vil en brenselcelle for bare 50 kW kreve like stor plass som en forbrenningsmotor som yter 1 MW. For maritime anvendelser er det foreløpig bare aktuelt med svært små effekter, og som et hjelpesystem som benyttes i havn eller andre steder der det er strenge utslippskrav. Brenselceller som hovedmotor i store skip er lite realistisk med dagens teknologi.

	Type	Temp. (C°)	Drivstoff	Virkningsgrad	Anvendelse
Lav-temperatur	PEM	60-100	H_2 / Luft	0,3 - 0,4	Små 0,1 - 2kW
	AFC	60-120	H_2 / O_2	0,3 - 0,4	Små 0,1 - 2kW
Mellom-temperatur	PAFC	150-250	H_2 / Luft	0,35 – 0,45	Mellomstore 0,1 - 5kW
Høg-temperatur	MCFC	550-700	H_2, CO, NH_3, CH_4 / Luft + CO_2	0,45 – 0,55 (0,8 – 0,9)*	Store <1MW
	SOFC	650-800	H_2 , CO , NH_3, CH_4 / Luft + CO_2	0,45 – 0,55 (0,8 – 0,9)*	Store <1 MW

**Totalvirkningsgrader som kan oppnås med full utnyttelse av "spillvarme"*

Oversikt over forskjellige typer brenselceller

PEM – Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell
AFC – Alkaline Fuel Cell
PAFC– Phosphoric Acid Fuel Cell
MCFC– Molten Carbonate Fuel Cell
SOFC – Solid Oxide Fuel Cell



50 kW høytemperatur brenselcelle (Wärtsilä)

Vi undrer oss på:

- Hydrogen er et av de reneste brenslene vi kjenner og som ved forbrenning i luft reagerer med oksygen og gir rent vann som restprodukt. Hva er grunnen til at vi ikke bruker mye mer hydrogen?
- Hva er hovedforskjellene på energiomformingen i en brenselcelle sammenlignet med en forbrenningsmotor?

Energioverføring om bord i skip

Mekanisk energioverføring

Hvorkan kan energi overføres om bord i skip?

Til å drive et skip trengs relativt store mengder energi både til fram - drift og til å utføre mange andre oppgaver ombord. Som beskrevet tas energien fra lagringskilden, som er brenslet, og omdannes så til utnyttbar energi i en eller annen sentral reaksjonsmaskin (forbrenningsmotor). Videre må denne energien transporteres fram til der den skal brukes, altså der den skal utføre et arbeid eller tilføre varme. I hovedsak snakker vi om tre ulike måter å overføre energi ombord i skip:

1. Mekanisk overføring - via drivakslinger, gir og koplinger
2. Elektrisk overføring – via ledninger og kabler
3. Hydraulisk overføring – via rør og ventiler

Disse tre energioverføringsprinsippene har ulike egenskaper som gjør at vi vil velge løsning ut fra hvilke egenskaper som gir oss det beste resultatet. Dette er egenskaper knyttet til funksjoner, arrangement, virkningsgrader, sikkerhet og miljø. Vi skal i resten av kapitelet gi en kortfattet beskrivelse av de ulike energioverføringene – deres egenskaper, fordeler og ulemper.

Mekanisk energioverføring

Det enkleste og eldste prinsippet for energioverføring er mekaniske systemer. De overfører energi i form av krefter og vrimomenter gjennom akslinger, gir, koplinger og mekanismer. I enden av akslingene omformes den roterende energien til andre bevegelsesformer og krefter. Et godt eksempel på dette er det som skjer i en veivmekanisme i en motor, der stemplenes lineære bevegelse fram og tilbake omformes til rotasjon i akslingen som går ut av maskinen. En vindusvisker er et annet nærliggende eksempel der roterende energi fra en drivmotor omformes til en pendlende bevegelse.

Hovedelementene i mekaniske systemer er:
Akslinger som overfører den roterende energien i form av et vrimoment (torsjon).
Gir transformerer roterende energi mellom to tilstander av omdreiningshastighet og vrimomentet. Gir forbinder vi hovedsakelig med tannhjulsoverføringer i mange ulike varianter avhengig av utvekslingsforhold, men det finnes også mange andre varianter som for eksempel kjedeoverføringer og reimoverføringer. De fleste gir har en fast oversetting, men vi finner også mange giroverføringer som har flere trinn. Det giret de fleste av oss kjenner godt, er girutvekslingen på en sykkel der vi veksler mellom lett gir ved lav hastighet og stor motstand, og tyngre gir når motstanden er mindre og det skal gå fortere.
Koplinger er en gruppe elementer som sørger for sikker overføring av energi mellom de andre maskinelementene. De består av flere typer: Enkle faste koplinger som sørger for å låse tilstøtende elementer sammen. Elastiske koplinger som tar opp skjevheter, demper støtlaster og reduserer overføring av vibrasjoner (støy). Av/på- koplinger som sørger for til- og frakopling (clutch).

Vi undrer oss på:

- Hva er grunnen til at vi trenger ulike løsninger for energioverføring og energiomforming?
- Hvorfor bruker vi mye elektrisk energi på land, mens vi om bord i skip heller bruker mekaniske eller hydrauliske overføringssystemer?

Mekanismer er de elementene som omformer bevegelse mellom for eksempel roterende bevegelse og lineære bevegelsesformer. Dette er en svært stor og kompleks gruppe elementer som er tilpasset spesielle oppgaver. En av de mest brukte er veivmekanismen vi finner i motorer og pedalene på en sykkel.
Lager er elementer som styrer og holder de bevegelige elementene på plass i systemet, og overfører krefter til omgivelsene. Det mest vanlige er roterende opplagringer, men det finnes også mange andre ulike typer opplagringer for ulike bevegelsesformer.

Ligninger for beregninger

Energien som overføres, følger svært enkle grunnleggende lover utledet fra:

Arbeid: W_L = Kraft • vei for lineær bevegelse
W_R = Moment • vinkel for roterende bevegelse

Effekt: P_L = Kraft • hastighet for lineær bevegelse
P_R = Moment • vinkelhastighet for roterende bevegelse

Skrevet med symboler: $P = M \cdot \omega$

der M = vrimomentet som overføres i Nm og
ω = vinkelhastigheten i radianer/sek
$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n / 60$ når n = omdreiningshastighet i omdreininger per minutt

I alle energioverføringselementer har vi mer eller mindre tap som skyldes ulike former for friksjon som omformer mekanisk energi til varme. Når vi summerer alle tapene og definerer en virkningsgrad for maskinelementet, gjelder følgende:

Utgående effekt = Inngående effekt • virkningsgrad

$P_{ut} = P_{inn} \cdot \eta$ der η er virkningsgraden for maskinelementet

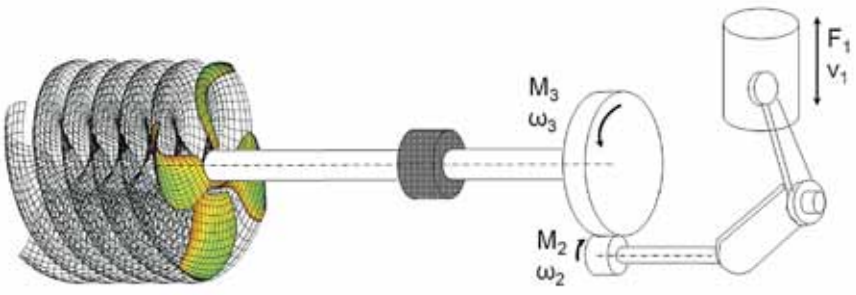
Dersom vi antar tapsfri energioverføring, kan vi skrive følgende sammenheng:

$$F_1 \cdot v_1 = M_2 \cdot \omega_2 = M_3 \cdot \omega_3$$

Dersom vi tar med tapene i hvert ledd i energioverføringen kan vi skrive følgende sammenheng:

$$M_2 \cdot \omega_2 = F_1 \cdot v_1 \cdot \eta_1 \quad \text{og} \quad M_3 \cdot \omega_3 = M_2 \cdot \omega_2 \cdot \eta_2$$

Og slik blir $M_3 \cdot \omega_3 = F_1 \cdot v_1 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2$

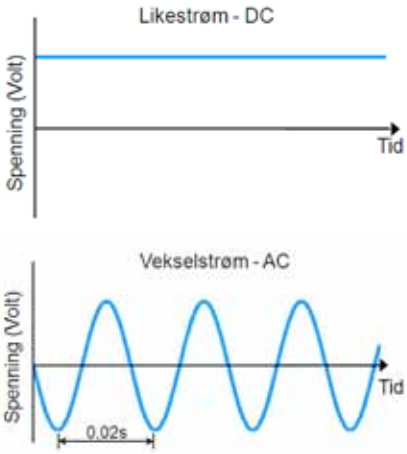


Vi undrer oss på:

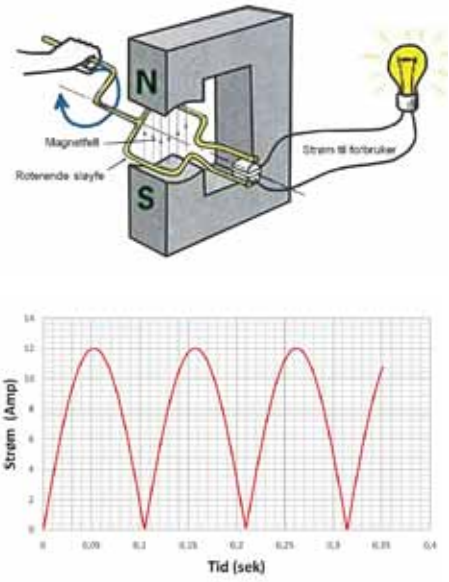
Ta for deg sykkelen din, og identifiser ulike transmisjonselementer. Hvor mange akslinger, koplingselementer, gir, lager og mekanismer finner du? Dette er til dels de samme elementene som du vil finne igjen i alle slags mekaniske maskinerisystemer. Kan du også klare å beregne hvor store krefter og momenter som noen av disse overfører?

Energioverføring om bord i skip

Elektrisk energioverføring



Illustrasjon av likestrøm og vekselstrøm



Illustrasjon som viser prinsippet for en helt enkel vekselstrøms-generator med tilhørende strøm

Den mest vanlige energioverføringsformen er elektrisitet, spesielt på land der elektrisk energioverføring er klart dominerende. På land har vi et felles (globalt) standardisert elektrisk overføringsnett basert på sentralisert energiproduksjon i store kraftverk. Om bord i skip og andre mobile systemer utgjør elektrisk energi en mindre andel av energioverføringen fordi man her ikke har tilgang til elektrisk energi fra et stort nettverk, men må produsere energien om bord. Da er det ofte slik at en mer direkte anvendelse av energien uten å gå gjennom elektrisitet både er mer effektivt og enklere. Likevel bygges det i dag stadig flere skip som er basert nesten fullt ut på elektrisk energioverføring. Ofte er disse skipene omtalt som "diesel-elektriske". Ombord i disse skipene installerer man altså en egen kraftstasjon som produserer elektrisk energi. Det samme gjør man ofte også i plattformer for olje og gassutvinningen i stedet for å ha en lang "skjøteledning" til land.

Elektrisk energioverføring er basert på ulike prinsipper og former. Først og fremst snakker vi om likestrøm (DC) eller vekselstrøm (AC), og høyspenning eller lavspenning.

Likestrøm eller vekselstrøm

Likestrøm har sin bakgrunn i systemer der vi må *lagre* energi. Lagring gjøres i ulike former for batterier der elektrisk strøm blir laget gjennom kjemiske prosesser som binder elektriske ladninger. Vekselstrøm derimot, er energi som blir laget og brukt samtidig. Vekselstrøm er et resultat av at energien skapes i roterende maskiner der strømmen drives av magnetisk/elektrisk induksjon som vist på figurene til venstre. Når vi lager slike maskiner, vil strøm og spenning naturlig følge en svingende funksjon som veksler mellom positiv og negativ spenning. I vekselstrøm skifter spenningen mellom positiv til negativ og tilbake til positiv 50 eller 60 ganger hvert sekund. Dette kaller vi nettfrekven-sen, men svingningene er så hurtige at vi ikke kan se at lysene faktisk blinker. Nettfrekvensen på land (Norge) er 50 Hz, mens det om bord i skip er mest vanlig å bruke 60 Hz.

Lavspenning eller høyspenning

Spenningsnivået for vekselstrøm er standardisert på mange ulike nivå. Vi kjenner godt til 230 volt som er det vanlige i hus (Norge), mens det på nettet brukes mye 400 volt. Videre har vi høyspenningssystemene for overføring over lange strekninger. Her snakker vi om spenninger på 22 kV (kilovolt) og 132 kV.

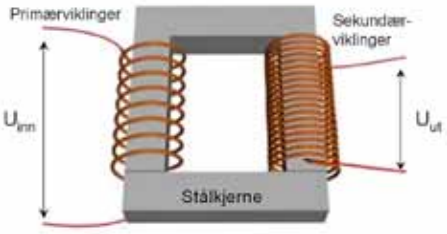
I fysikk har vi lært at elektrisk effekt er gitt som:

$$P = U \cdot I$$

Skal vi øke energimengden (effekten) må vi derfor øke strømmen (I) og/eller spenningen (U). Dersom vi øker strømmen, trenger vi kraftigere ledninger som kan lede store strømmengder uten for store tap. Dersom vi øker spenningen, må vi isolere bedre for å unngå kortslutninger. Høye spenninger som kan sende strøm gjennom kroppen, er også svært farlig, og vi må derfor skjerme systemene for å unngå kontakt.

Om bord i skip finner vi alle spenningsnivåer fra 24 volt likestrømssystemer til 6,6 kV (kilovolt) høyspenningssystemer. Mellom disse finner vi mange ulike spenninger. Disse er vanligvis standardisert og tilpasset ulike maskiner og utstyr. Vi vet at det går relativt dårlig dersom vi kopler til en maskin som er beregnet for en annen spenning. I beste fall vil den da fungere dårlig, mens den i verste fall vil kortslutte og brenne opp eller eksplodere. For framdriftsystemer med store effekter brukes høyspenning for å redusere overføringstapene.

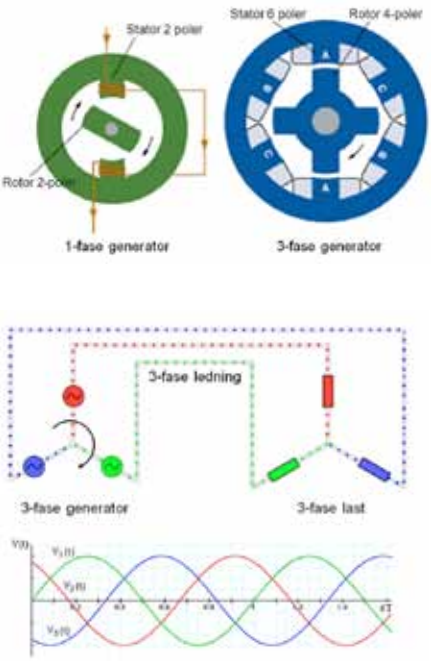
Med vekselstrøm er det også svært enkelt å omforme mellom lav og høy spenning. Til dette brukes transformatorer der magnetfeltet i en stålkjerne overfører effekten, og forholdet mellom antall viklinger på hver side avgjør forholdet mellom spenningsnivåene inn og ut av transformatoren, som vist på figuren.



Prinsippet for en elektrisk transformator

1-fase eller 3-fase

For vekselstrøm har vi systemer for 1-fase og 3-fase. Dette er knyttet til hvordan maskinene lages. 3-fase er som oftest utgangspunktet, mens 1-fase er en tredjedel av 3-fasen, basert på hvordan systemet koples. For 3-fase motorer er også dreieretning avhengig av hvordan de 3 fasene koples.



Hovedprinsippene for elektriske generatorer som lager vekselstrøm.

Elektrisk overføring og hastighetsregulering med frekvensomformere

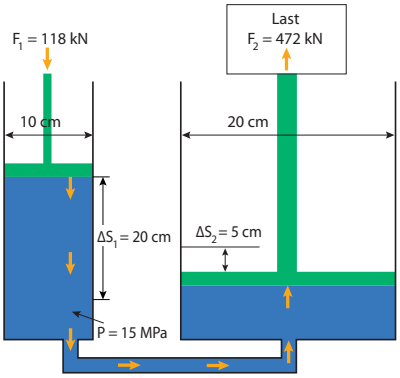
Generatorer og motorer i vekselstrømsystemer er vanligvis det vi kaller synkrone maskiner. Det betyr at de må følge frekvensen på nettet, og at de dermed vil gå med et konstant omdreiningstall som er koplet til denne frekvensen. Antall poler (eller polpar) i maskinen bestemmer hastigheten i forhold til nettfrekvensen. En typisk elektromotor på 50 Hz nett går med 1500 omdreininger pr. minutt, mens den samme motoren vil gå med 1800 omdreininger per minutt tilkoplet et 60 Hz nett. For å regulere hastigheten trinnløst må man enten gå veien via likestrøm, eller man kan installere frekvensomformere. Det vil si omformere som tar inn nettfrekvensen og sender ut en annen frekvens til motoren som dermed vil gå med en omdreiningshastighet som er større eller mindre enn det nettfrekvensen ville gi. Utvikling av frekvensomformerne har vært svært avgjørende for å kunne bruke elektriske maskiner i systemer der variabel omdreiningshastighet er helt nødvendig.

Vi undrer oss på:

- Hva er hovedgrunnen til at det meste av elektrisk effekt finnes i form av vekselstrøm, og når er det helt nødvendig at vi har likestrøm?
- Bryting av likestrøm er en stor utfordring fordi vi da får en lysbue over kontaktene i bryteren. Hvorfor er det et mye mindre problem ved bryting av vekselstrøm?
- Geir kjøpte en elektrisk klokkeradio på ferie i USA. Da han kom hjem, viste det seg at klokken sakket 4 timer i døgnet. Hva kunne være grunnen til dette?

Energioverføring om bord i skip

Hydraulisk energioverføring



Prinsipp for hydraulisk overføring

Eksempel 7.10:
I fysikken har vi lært at
Kraft = trykk • areal.
Hvis vi har en sylinder med diameter 0,1 meter og et hydraulikktrykk på 15 MPa, får vi en kraft:
$F_1 = 15 \cdot 10^6\ N/m^2 \cdot \pi \cdot (0{,}1m/2)^2 = 118\ kN$
$F_2 = 118\ kN \cdot (20/10)^2 = 472\ kN$

Utførte arbeider:
$W_1 = F_1 \cdot \Delta S_1 = 118\ kN \cdot 0{,}2\ m = 23{,}6\ kJ$
Eller:
$W_2 = F_2 \cdot \Delta S_2 = 472\ kN \cdot 0{,}05\ m = 23{,}6\ kJ$

Eksempel på et offshore fartøy der dekksmaskineri drives av hydraulikk.

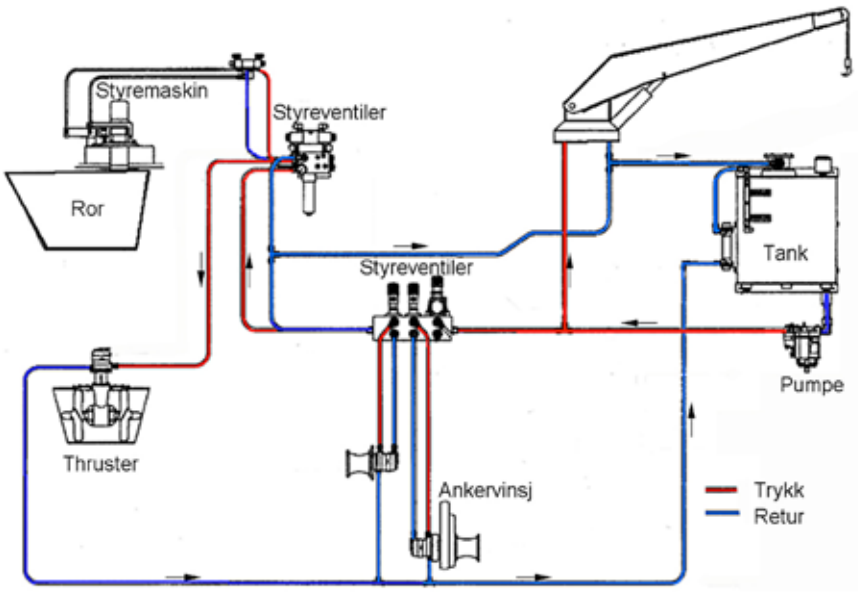
Prinsipp for hydraulisk effektoverføring

Hydraulisk effektoverføring er basert på en væske som utøver trykk på en flate som igjen beveger seg og utfører et arbeid. I de fleste systemer er væsken en olje, men også andre væsker brukes når det er spesielle krav til det ytre miljøet. Hovedelementene i hydrauliske systemer er maskiner som omformer energien fra mekanisk til hydraulisk energi og motsatt. Videre har vi overføringselementene som består av rør og slanger som sørger for at energien overføres fra kilde til forbruker. På toppen har vi styresystemene som består av ulike ventiler som regulerer og styrer oljestrømmen i systemet.

Anvendelser

Når vi kommer ombord i et skip, finner vi at svært mange systemer opereres av hydraulikk. Alt fra store kraner til vindusviskere drives av hydrauliske motorer eller sylindere. Både figurene til venstre, under og på neste side viser anvendelser på fartøy som er er utrustet for offshore arbeidsoperasjoner. Disse kan blant annet involvere installasjoner, løfting/senking og sleping av utstyr både på overflaten og på havbunnen.

Også andre skip enn de som arbeider innen olje- og gassutvinningen har behov for hydraulisk utstyr i en rekke sammenhenger både på og under dekk. En meget viktig skipsgruppe er da for eksempel fiskefartøyer. Du kan derfor lese mer om hydraulikksystemer i kapittel 12 om fiskeriteknologi, med blant annet et eksempel på beregning av en hydraulisk drevet vinsj for innhaling av en trål på sidene 12-22/23.



Eksempel på et hydraulisk system om bord i et skip.

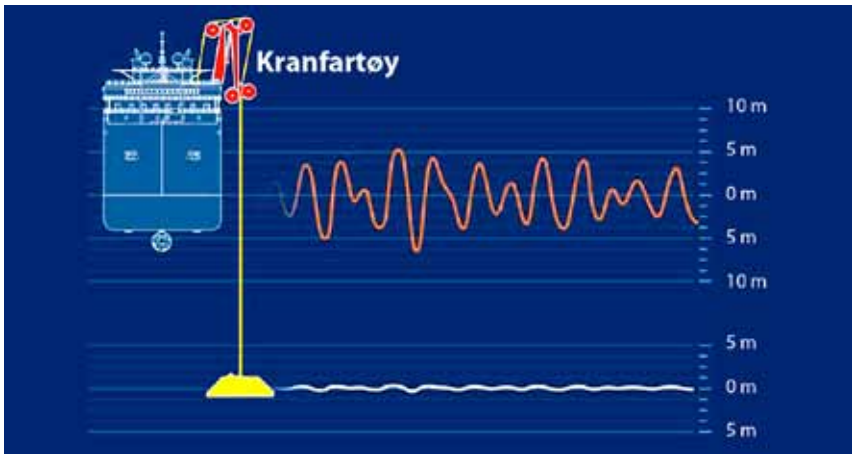
Hvorfor velger vi hydraulisk overføring?

Hydraulisk overføring er svært sterk i forhold til størrelse på maskinene. I mange anvendelser er det nesten umulig å tenke seg løsninger basert på annen form for energioverføring på grunn av vekt og plassbehov. En av de viktigste egenskapene til hydraulisk overføring er evnen til høye statiske krefter. Det vi si stor kraft uten bevegelse. Dette er det stort sett kun hydraulikk som kan utføre. Hydrauliske systemer er også svært robuste og sikre i røffe miljøer som de vi har på dekk av et skip, der elektriske og mekaniske systemer vil ha store problemer på grunn av sjøvann, kulde/varme og korrosjon.

Illustrasjon av en hydraulisk drevet kran for installasjon av offshore undervannsutstyr.

Hydrauliske systemer er lette å styre og svært nøyaktige. De behersker både rettlinjet bevegelse og roterende bevegelse med trinnløs regulering i begge bevegelsesretningene. De aller fleste hydraulikksystem har også innebygd automatisk overbelastningsbeskyttelse som hindrer driftsstans og i verste fall havari. I mekaniske systemer fører overbelastning ofte til permanent skade og havari, og i elektriske systemer ryker sikringer slik at vi får driftsstans. Overbelastninger i hydrauliske systemer merkes knapt fordi det kun medfører at sikkerhetsventiler åpner, og straks belastningen er normal vil maskinen være tilbake i normal drift.

Nøyaktighet og rask respons er egenskaper som er svært viktige for mange systemer om bord i skip. Et eksempel der hydraulisk effektoverføring er nesten eneste alternativ, er på løfteutstyr som kraner og vinsjer. På figuren under ser vi en kran som brukes til offshore operasjoner til blant annet å installere undervannsmoduler. Dette er operasjoner som krever svært stor nøyaktighet og kontroll. Spesielt krevende er det å holde modulen i ro mens båten beveger seg. Dette krever også avanserte styresystemer som overfører nødvendige krefter via et hydraulikksystem som sørger for å bevege kran og vinsj. Mens skipet beveger seg flere meter i vertikal og horisontal retning sørger sylindere og hydraulikkmotorer for å holde modulen nesten helt i ro under vann.



Illustrasjon av offshore kranskip som plasserer en modul på havbunnen.
Grafen viser skipets hivbevegelser under operasjonen. Disse kompenseres automatisk av kranas reguleringssystem slik at modulen blir satt ned på bunnen med stor forsiktighet.

Så hvorfor bruker vi ikke hydraulikk til all effektoverføring?
Som alle andre systemer har også hydraulikk noen negative sider. Den viktigste av disse er virkningsgraden, som for de fleste hydrauliske effektoverføringer ligger i området 60-80%. For overføring av store energimengder er høy virkningsgrad så viktig at dette utelukker hydraulikk til fordel for mekanisk eller elektrisk overføring der disse kan brukes. I tillegg til dårlig virkningsgrad kan også støy og forurensing være problemer.

Vi undrer oss på:

Hvorfor bruker vi så mye elektrisk energi på land, mens vi om bord i skip heller bruker mekaniske eller hydrauliske overføringssystemer?

Energioverføring om bord i skip

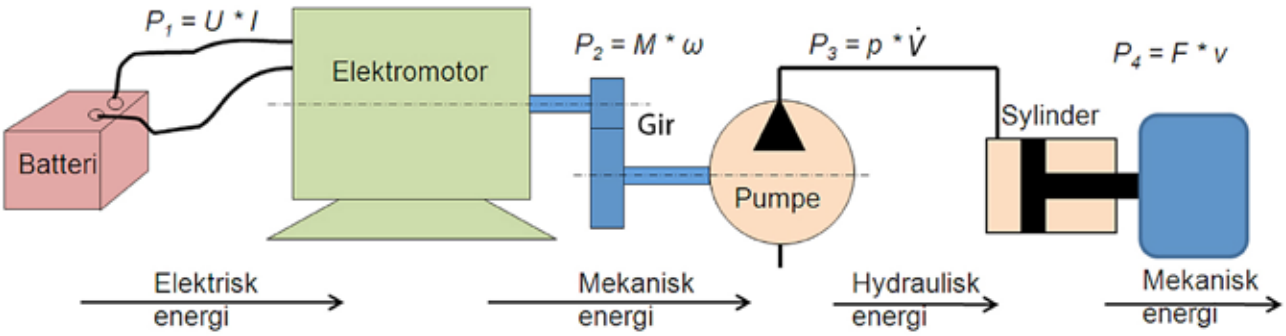
Sammenligning mellom ulike systemer

Energioverføring følger svært enkle fysiske lover der effekt er produkt av kraft og hastighet. Generelt gjelder altså følgende ligning:

Effekt = kraft x hastighet

der:

Overføringssystem	Kraft	Hastighet	Effekt
Mekanisk rettlinjet	F [N]	v [m/s]	F·v [W]
Mekanisk roterende	M [Nm]	ω [rad/s]	M·ω [W]
Hydraulisk	p [N/m^2]	$\dot{V}$ [m^3/s]	p·Q [W]
Elektrisk	U [Volt]	I [Amp]	U·I [W]



I hvert ledd i denne kjeden er det en omformer som omdanner energien fra en form til en annen. Hver slik omformer har litt tap som skyldes friksjon, strømningstap osv. Dette kan vi angi som omformerens virkningsgrad (η). For hver omformer gjelder da: $\eta = P_{ut}/P_{inn}$

Eksempel 7.11
Vi har et enkelt hydraulikksystem der en elektromotor driver en pumpe som leverer olje til en sylinder som så løfter en masse på 5000 kg. Når vi starter dette systemet, måler vi følgende: Elektrisk spenning og strøm er henholdsvis 230 V og 75 A (ampere) mens vi løfter massen med en hastighet 0,3 m/sek.

Vi kan da beregne virkningsgraden til dette systemet:
Først finner vi tilført effekt:

$P_{inn} = U \cdot I = 230\ V \cdot 75\ A = 17250\ W = 17{,}3\ kW$

Så finner vi avgitt effekt:

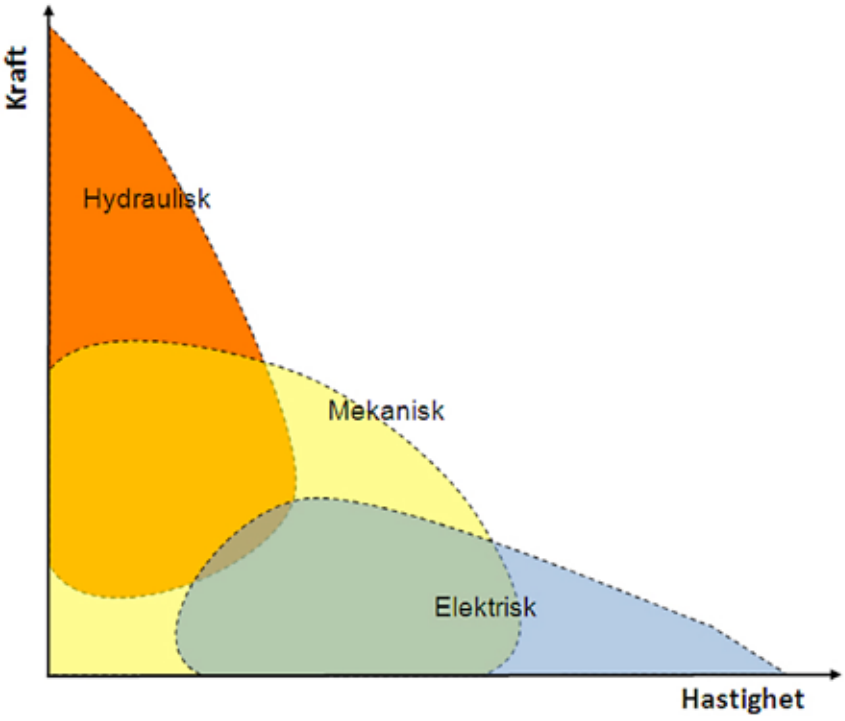
$P_{ut} = F \cdot v = 5000 \cdot 9{,}81\ N \cdot 0{,}3\ m/s = 14715\ W = 14{,}7\ kW$

Virkningsgraden blir da:

$\eta = P_{ut} / P_{inn} = 14{,}3 / 17{,}3 = 0{,}85 =$ **85%**

Sammenligning av de ulike systemene for energioverføring

Når vi sammenligner effektoverføring, må vi bruke ulike vurderingskriterier. I noen tilfeller er et eller flere av alternativene utelukket på grunn av manglende funksjonalitet. Det er for eksempel en del systemer der stort sett kun hydraulikk kan brukes, slik som eksemplet med løfteutstyr. I de tilfellene der man kan velge mellom mekanisk, hydraulisk eller elektrisk, må det vurderes hva som gir det beste resultatet. Her er det snakk om funksjonalitet, sikkerhet, virkningsgrad, miljø og kostnad. Når det gjelder funksjonalitet, kan vi for eksempel se på sammenheng mellom kraft og hastighet. Her ser vi gjerne at dersom det skal gå langsomt med stor kraft, velger man gjerne hydraulikk, mens elektrisk overføring velges når det skal gå hurtig med mindre krefter. Figuren under viser i prinsippet hvordan sammenhengen er mellom hastighet og kraft for de ulike overføringene. Når det gjelder virkningsgrad, er det nesten alltid direkte mekanisk overføring som gir høyest effektivitet. Og ser man på totalsystemene om bord i et skip er det alltid en kombinasjon av mekaniske, hydrauliske og elektriske løsninger som er brukt.



Typisk sammenheng mellom krefter og hastigheter for effektoverføring

Vi undrer oss på:

Vi antar at tapet i eksemplet på venstre side kan fordeles slik at 2/3 av effekten går tapt i friksjon i sylinderen. Vi vet også at hydraulikksylinderen har en diameter på 6 cm. Hvordan kan vi beregne effekttapet i hver av komponentene, og trykket i hydraulikkrøret?

Oppgaver

Oppgave 7.1
Det vises til figurer på side 7-26 som viser hvordan hydrokarboner er bygget opp. Atommasseenheter for hydrogen og karbon er oppgitt på figurene. Bruk disse til å bestemme:
a) Andelen av karbon i naturgass, som vi her regner med består av bare metan. Gi svaret i masseprosent.
b) Andelen av karbon i en marin dieselolje. (Marine Diesel Oil, MDO). Her bruker vi molekylet $C_{20}H_{42}$ som gjennomsnitt for de molekyltyper som den marine dieseloljen består av. Svar i masseprosent.

Oppgave 7.2
Vi tar for oss følgende to molekyltyper, som er typiske i brensler for henholdsvis gassmotorer og dieselmotorer:
- Metan (CH_4) som er hovedbestanddelen i naturgass
- $C_{20}H_{42}$, som er en typisk molekyltype for marin dieselolje (MDO).

Atommasser for hydrogen, karbon og oksygen er 1u, 12 u og 16 u. Videre er brennverdien 48 og 42 MJ/kg for henholdsvis metan og MDO-molekylet.
a) Bruk ligning øverst på side 7-27 til å beregne hvor mange kg CO_2 som dannes per kg karbon.
b) Bruk verdiene for karboninnhold per kg brensel fra oppgave 7.1 til å beregne antall kg CO_2-utslipp per kg for hvert av brenslene:
c) Beregn antall kg CO_2-utslipp per MJ energi for hvert av brenslene
d) Hvor mye mindre er CO_2-utslippet i prosent fra metanen enn fra dieseloljen, regnet både per kg brensel og per enhet energi?

Oppgave 7.3 (fra kurs i 2009 for realfagslærere i vgs)
Teoretisk og virkelig luftforbruk ved forbrenning av metan
Det vises til ligning øverst på side 7-27 for beregning av teoretisk luftbehov ved forbrenning av hydrokarboner. Du skal vise hvordan denne ligningen framkommer. Bruk forbrenning av metan (CH_4) som eksempel. For å bestemme oksygenbehovet kunne vi nå brukt Bolzmanns konstant (felles for alle gasser, se side 7-6) samtidig som vi holdt rede på stoffenes atom- og molekylmasser, men dette er tungvint. Mer praktisk er det å bruke kmol-begrepet. Med 1 kmol mener vi så mange kg av et stoff som atom/molekylmassen til stoffet tilsier:
1 kmol C = 12 kg, 1 kmol H2 = 2 kg og 1 kmol O2 = 32 kg. På lignende måte som Bolzmanns konstant er felles for alle stoffer (se side 76), er også volumet av 1 kmol av en gass det samme for alle gasser ved samme trykk og temperatur (22,7 m^3 ved 1 bar og 0 celsiusgrader). Fra tabeller finner vi da at tettheten for luft er 1,276 kg/m^3 og at oksygeninnholdet er 21 volum-%.
a) Sett opp reaksjonsligningene mellom oksygen og karbon og mellom oksygen og hydrogen
b) Omform ligningene til kmol-basis, og vis hvordan ligningen for $(L/B)_t$ øverst på side 7-27 framkommer.
c) Beregn teoretisk luftbehov ved forbrenning av 1 kg metan.

Oppgave 7.4
En mellomhurtig dieselmotor går på marin dieselolje (MDO).
Vi betrakter molekylet $C_{20}H_{42}$ som typisk for gjennomsnittet av de hydrokarboner som brenslet er sammensatt av. Motoren har en akseleffekt på 8000 kW, og dens spesifikke brenselforbruk er 180 g/kWh. Luftfaktoren er 2,0. Beregn:
a) Brenslets teoretiske luftbehov i kg/kg brensel
b) Motorens virkelige luftforbruk i kg/h
c) Motorens CO_2-utslipp i kg/h
d) Avgassens CO_2-innhold i masse-%

Oppgave 7.5 (fra kurs i 2009 for realfagslærere i vgs)
Effektiv virkningsgrad relatert til spesifikt brenselforbruk
a) Utled ligningen nedenfor for en motors effektive virkningsgrad

$$\eta_e = \frac{1}{b_e \cdot h_n}$$ Her er:

b_e = spesifikt brenselforbruk i kg/kWh
h_n = brenslets brennverdi i kWh/kg
b) Et brensels brennverdi oppgis vanligvis i MJ/kg. Hvordan kan vi regne det om til enheten kWh/kg?
c) Den beste virkningsgraden som er oppnådd i en dieselmotor, er omtrent 0,55. Beregn motorens spesifikke brenselforbruk i kg/kWh. Brenslets brennverdi er 42 MJ/kg.

Oppgave 7.6 (fra kurs i 2009 for realfagslærere i vgs)
Eksempler fra matematikk i vgs (integral- og potensregning)
a) Beregning av omsatt arbeid under adiabatisk og polytropisk tilstandsforandring.
Det vises til figuren øverst på side 7-7. Vi skjønner at utført arbeid under for eksempel en ekspansjon, kan skrives slik:

$$W_e = \Sigma p \cdot dV = \int p \cdot dV$$

Bruk ligningen for adiabatisk tilstandsforandring (se i margen nederst på side 7-6), og vis at integralet har denne løsningen:

$$W_e = \frac{p_4 \cdot V_4 - p_3 \cdot V_3}{\kappa - 1}$$

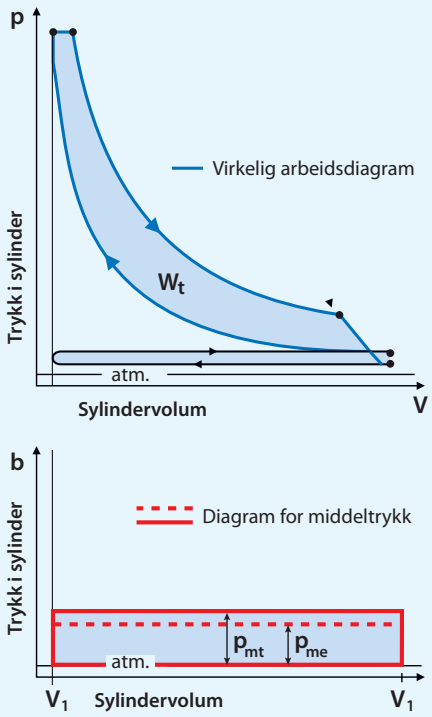
Dette gir et positivt arbeid. Husk at vi må skifte fortegn hvis arbeidet skal brukes i forbindelse med termofysikkens første lov. Foregår ekspansjonen polytropisk, må k erstattes med n.
b) Skriv opp tilsvarende ligning for adiabatisk kompresjon, og grei ut om fortegnene.
c) Det vises til figurtekst nederst på side 7-6. Vis at ligningen

$$p_1 \cdot V_1^{\kappa} = p_2 \cdot V_2^{\kappa} = \text{konst}$$

for adiabatisk kompresjon også kan skrives slik:

$$p_1 \cdot T_1^{\kappa-1} = p_2 \cdot T_2^{\kappa-1} = \text{konst}$$

Oppgaver



Illustrasjon av spesifikk arbeidsevne uttrykt som middeltrykk

Termisk midddeltrykk (p_{mt}) er et tenkt, konstant trykk som gir ***samme arbeidsflate (areal)*** *som den termiske prosessen i sylinderen (farget lyseblått). Effektivt middeltrykk (p_{me}) svarer til spes.arbeidsevne på utgående aksel og tar altså hensyn til mekaniske tap (se side 7-11).*

$$p_{me} = \eta_m \cdot p_{mt}$$

Middeltrykkene finnes altså etter omforming av spes. arbeidsevne (kJ/dm³) til et trykk (MPa). I motoroversikter oppgis middeltrykket oftest i den hyppig anvendte trykkenheteten bar. I beregninger av for eksempel akseleffekt må du imidlertid ikke bruke bar, men SI-enheter som tilpasses enhetene for volum og turtall.

Oppgave 7.7

På side 7-16 er en dieselmotors arbeidsevne framstilt som funksjon av motorturtallet. Arbeidsevnen er uttrykt på to måter: spesifikk arbeidsevne w_e [kJ/dm³] og effektivt middeltrykk p_{me} [bar]. Forskjellen mellom disse to måtene er illustrert til venstre.

a) Vis hvordan en spes. arbeidsevne $w_e = 2{,}5$ kJ/dm³ også kan skrives som et effektivt middeltrykk $p_{me} = 25$ bar.

Oppgave 7.8

Det vises til side 7-17 om beregning av akseleffekt og dreiemoment.

a) Hvor stor akseleffekt i kW yter en firetakts dieselmotor hvis den går med en effektiv, spesifikk arbeidsevne 2,5 kJ/dm³, turtall 600 o/min og har 6 sylindere med slagvolum 25 dm³/syl?

b) Beregn akseleffekten for en totakts dieselmotor med 8 sylindere, slagvolum 220 dm3, effektivt middeltrykk på 20 bar og et turtall 200 o/min

c) Beregn dreiemoment på utgående aksel for motorene ovenfor.

Oppgave 7.9

Det vises til figur øverst på side 7-13 og eksempel på side 7-18 vedrørende faktorer som *i praksis* begrenser størrelsen på dagens dieselmotorer for skipsdrift. Det er nemlig en grense for hvor stor en *motorenhet* kan lages uten at investeringer og vedlikeholdskostnader blir uforsvarlig høye. I den viste figuren er det lagt inn grafer for maksimal akseleffekt som funksjon av turtall for tre hovedtyper motorer. Vi ser at følgende hovedregel gjelder: *Jo lavere turtall motoren baseres på, jo større akseleffekt kan den bygges med.* For mange synes dette å være et stort paradoks, men du skal i denne oppgaven bekrefte hvorfor det må være slik. For grafene i figuren gjelder følgende uttrykk for maksimal effekt som funksjon av turtall:

$$P_e = \frac{\pi}{32(64)} \cdot w_e \cdot i \cdot c_m{}^3 \frac{1}{(S/D)^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

Divisorene 32 eller (64) gjelder for hhv. totakts- og firetaktsmotorer

a) Vis at ligningen ovenfor kan omformes til ligninger som er vist på side 7-17 for motorers akseleffekt.

b) Sett inn følgende verdier for totaktsmotorer:

- Antall sylindere, $i_{max} = 14$
- Midlere stempelhastighet, $c_{m,max} = 8{,}6$ m/s
- Spesifikk arbeidsevne, $w_{e,max} = 1{,}9 \cdot 10^6$ J/m³
- Slag—diameter-forhold, S/D = 2,7

Vis at dette gir følgende ligning for totaktsmotorer

$$P_{e,max} = 228 \cdot 10^6 \frac{1}{n^2}$$

c) Beregn $P_{e,max}$ ved turtall n = 100/60 [s^{-1}], og tegn inn tilhørende punkt i figuren på side 7-13

d) Beregn sylinderdimensjoner (D, S og V_h) for motoren i punkt c).

Oppgave 7.10 (fra kurs i 2009 for lærere i vgs.)
Beregning av firetakts, mellomhurtig dieselmotor for skip
Oppgaven har to formål. For det første skal den vise at det egentlig er mulig å komme uventet langt i slike beregninger, selv når man bare anvender stoff fra fysikken i videregående skole. For det andre skal den bidra pedagogisk til forståelse av virkemåten til en dieselmotor.

En mellomhurtig dieselmotor med turtall 750 o/min har følgende data:
- Sylinderdiameter D = 320 mm
- Slaglengde S = 400 mm,
- Nominell kompresjonsgrad ε = 17
- Trykk og temp. på sylinderladning ved kompresjonens begynnelse: p_1 = 3,0 bar overtrykk, T_1 = 340 K
- Luftfaktor under forbrenning λ = 2,4

For brenslet (marin dieselolje, MDO) gjelder følgende:
- Nedre brennverdi h_n = 42,7 MJ/kg,
- Teoretisk luftbehov $(L/B)_t$ = 14,4 kg luft / kg brensel

Basert på oppgitte data og erfaringsverdier for spesifikt brenselforbruk og dermed effektiv virkningsgrad, skal det beregnes:
a) Luftmengde i sylinder når kompresjonen begynner
b) Tilført brenselmengde og tilført energi per arbeidsprosess
c) Utført arbeid (W_e) og spesifikk arbeidsevne (w_e) per arbeidsprosess
d) Dreiemoment (M_d) og akseleffekt (P_e) på motorens utgående aksel

For å bedre forståelsen av motorens arbeidsprosess og dessuten sannsynliggjøre resultatene fra punktene c) og d), skal følgende beregnes:
e) Trykk, volum og temperatur i tilstand 2
f) Omsetning av arbeid og varme, og forandring i indre energi under tilstandsforandringen 1- 2a. Det forutsettes at kompresjonen skjer polytropisk med en eksponent lik 1,35
g) Tilsvarende beregninger for tilstand 3a og tilstandsforandring 2-3a
h) Tilsvarende beregninger for tilstand 3b og tilstandsforandring 3a-3b
i) Tilsvarende beregninger for tilstand 4 og tilstandsforandring 3b-4. Ekspansjonen foregår polytropisk med en eksponent lik 1,45
j) Utført arbeid og bortført varmemengde for hele arbeidsprosessen.
k) Termisk virkningsgrad, effektiv virkningsgrad (forutsatt en mekanisk virkningsgrad lik 0,9) og spesifikt brenselforbruk. Vurder hvordan verdiene passer med resultatene fra c) og d)
l) Nevn noen feilkilder ved beregningene

Oppgave 7.11
Det vises til sidene 7-36/37 om mekanisk energioverføring. Ta for deg sykkelen din, og identifiser transmisjonselementer.
a) Hvor mange -akslinger, -innkoplingselementer, -gir, -lager og mekanismer finner du? Det er til dels de samme elementene du vil finne igjen i alle slags mekaniske maskinerisystemer
b) Kan du også klare å beregne hvor store krefter og momenter noen av disse overfører?

Referanser

7.1 Statistisk årbok 2009. Statistisk sentralbyrå. 2009

7.2 Statistiske data fra Norges Rederiforbund. 2010

7.3 Erik W Jakobsen: Norsk maritim verdiskaping 2000-2009. Rapport 10.01. 2011. Menon Business Economics. Oslo

7.4 Randers, Aam, Bysveen: En energi og klimaplan for Norge til 2020. www.climate.orgstrategy

7.4 International Maritime Organizatiom: Second IMO GHG Study. 2009

7.5 Harald Valland: Primær energiomforming ved forbrenning. Elementær innføring i gassturbiner. Kompendium i fag TMR4310 ved Institutt for marin teknikk, NTNU. 2008.

7.6 Hans Klein Wood, Douwe Stapersma: Design of Propulsion and Electric Power Generation Systems. The Insttute of Marine Engineering, Science and Technology. London. 2002

7.7 Per Magne Einang: Strategy for greener Shipping. New and renewable Fuels. MARINTEK. Trondheim. 30th International Bunker Conference Oslo. 2009

7.8 Maurice F. White: Marine Engineering Systems. Course Notes i fag 4310 ved Institutt for marin teknikk, NTNU. 2008.

Forfattere: Håvard Holm, Asgeir Sørensen

Manøvrering, styring og regulering

Havromsteknologi

Innhold

Innledning....2
Manøvrering av skip....4
Styring av skip....6
Reguleringssystemer for holding av skip og plattformer i fast posisjon....8
To hovedprinsipper for regulering : Foroverkopling og tilbakekopling....8
Mer om DP-reguleringssystemer....10
Datasystemer og automatisering....12
Reguleringssystemer for skip i fart....14
Hastighetsregulering. Litt om regulatorer....14
Kursregulering. Automatisk styring av fartøyer....16
Bevegelsesdemping av hurtiggående fartøy....17
Oppgaver....18
Referanser....20

NTNU
Institutt for marin teknikk

8

Styring og regulering er sentrale prosesser i virksomhet til havs.

Styring betyr egentlig å ***lede noe som er i bevegelse i en ønsket kurs eller retning.*** *Begrepet kan også brukes i andre sammenhenger, for eksempel styring av en prosess etter et program.*

Regulering *betyr egentlig å bringe orden i en prosess som er blitt utsatt for en forstyrrelse. Dette skal da helst skje automatisk, ved at et måleresultat fra prosessens utgang tilbakekobles til en regulator som sammenligner denne med en referanseverdi, og som sørger for at forstyrrelsen kompenseres i ønsket grad. I motsetning til styring karakteriseres altså regulering av en prosess ved at* ***en eventuell forstyrrelse blir helt eller delvis kompensert og at kompensasjonen blir etterprøvd.***

Det er imidlertid ikke alltid at man i praktisk språkbruk er konsekvent med hensyn til denne forskjellen mellom ordene styring og regulering, slik at disse blir brukt en del om hverandre.

Reguleringsteknikk – nødvendig i dagliglivet og til havs. Styring og regulering hjelper oss i hverdagen med oppgaver som vi ikke vil eller kan gjøre selv. Dette kan være fordi oppgavene krever større nøyaktighet enn vi kan makte, er langvarige, ubehagelige eller farlige. Noen eksempler er: ABS-bremser, antispinnsystem eller cruisekontroll på biler, varmestyring av hus, hodetelefoner med støyreduksjon, styring av harddisker på PC og DVD-spillere osv.

Også i konstruksjoner til havs møter vi massevis av situasjoner som bare kan løses ved hjelp av reguleringsteknikk. Aller først i kapitlet vil vi se nærmere på *styring* av fartøyer ved hjelp av ror og propell. Deretter tar vi for oss eksempler på systemer for *regulering* med utgangspunkt i aktuelle behov som gitt nedenfor.

Hvordan kan et skip holdes i ro i all slags vær uten bruk av ankere?

Dynamisk posisjonering (DP). Med dynamisk posisjonering mener vi at et skip eller for eksempel en borerigg skal kunne ligge i ro med stor nøyaktighet (2—3 meter), over lang tid og under skiftende værforhold uten å bruke ankere. I stedet for oppankring brukes ror, propeller og/eller thrustere plassert på ulike steder, til å holde den flytende konstruksjonen i ønsket posisjon. Disse pådragsorganene styres da av et såkalt dynamisk posisjoneringssystem. Ulike sensorer og målesystemer (satellitt- og undervannsakustikksystemer) måler fartøyets orientering, og vindsensorer måler vindhastighet og retning. Målesignalene analyseres i en datamaskin som sender passende signaler videre til pådragsorganene.

Et kranfartøy er utstyrt med reguleringssystemer både for å holde fartøyet mest mulig i ro og for å operere kranene best mulig også når skipet ruller, stamper eller hiver på seg. Det er sjelden at værforholdene er så gunstige som vist her.

Manøvrering, styring og regulering

Mange anvendelser av DP-systemer. Noen eksempler på flytende konstruksjoner som er utstyrt med DP-systemer, er:

- Tankskip for lasting av olje på feltet (se for eksempel side 10-37)
- Kranfartøyer og flere av de andre serviceskipstypene som brukes i offshoreaktiviteter (se liste side 9-28)
- Flytende borerigg (se side 8-13)
- Skip som opererer i farvann hvor det er viktig at ikke sårbare koraller på havbunnen blir ødelagt, noe som ellers kunne skjedd ved bruk av ankere. For eksempel gjelder dette cruiseskip

Reguleringssystemer for skip i fart

Går vi over til å se på skip i fart, er det ytterligere behov for reguleringssystemer i mange sammenhenger. *Eksempelvis* kan nevnes systemer for:

- Automatisk styring av ror og propell, slik at skip holder fast kurs og fart uansett værforhold, såkalt autopilot
- Regulering av ror og propell for å følge væravhengige ruter som gir optimalt brenselsforbruk og sikkerhet. Det forskes på å integrere slike systemer i enda mer omfattende systemer som kan gjøre framtidens skip lavbemannede eller helt *ubemannede,* se figurtekst til høyre
- Regulering av flaps (eventuelt luftputer) for å få minst mulig vibrasjoner og andre uønskede bevegelser for folk om bord i hurtiggående fartøyer

Andre behov for reguleringssystemer til havs

- **Ubemannede undervannsfartøyer** (se side 10-27). Disse kan programmeres til å undersøke havbunnen i et område uten å ha kontakt med omverdenen. Slik kartlegging er meget viktig i mange sammenhenger, særlig i forbindelse med *olje- og gassutvinningen.* Ubemannede undervannsfarkoster er også uunnværlige for denne virksomheten i en rekke andre sammenhenger, særlig i forbindelse med installasjon av utstyr på havbunnen
- Også for *fiskeri- og havbruksteknologien* er reguleringstekniske systemer av største viktighet
- Utnyttelse av havet til *fornybar energi* gir store reguleringstekniske utfordringer enten det dreier seg om vind-, bølge- eller tidevannskraft.

MÅL Etter å ha studert dette kapitlet skal du:

- Ha fått kunnskap om manøvrering av skip
- Forstå hvordan styring ved hjelp av ror virker
- Forstå hvordan styring ved hjelp av propell og thruster virker
- Ha fått innføring i komponenter, begreper og metoder innen elementær reguleringsteknikk
- Ha fått innføring i dynamisk posisjonering
- Forstå hvordan et autopilotsystem virker

NTNU har flere undervannsroboter til bruk i forsking og undervisning . Her ser du en fjernstyrt undervannsfarkost, også kalt ROV (Remotely Operated Vehicle)

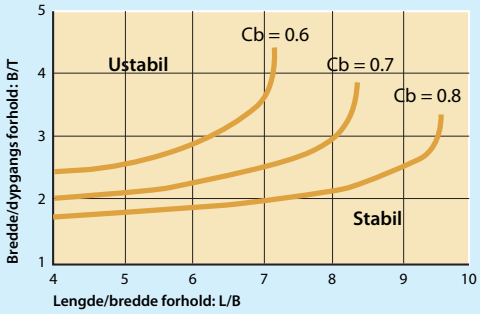
I Trondheim utvikles systemer som muliggjør at skip og båter kan programmeres til å gå en gitt rute. Disse farkostene kan være ubemannede og autonome slik at de styrer seg selv med minimal kommunikasjon til omverden under oppdragene. Foto: Maritime Robotics

Undringsoppgave:

Hva betyr egentlig ordet autonom som er brukt i figurteksten ovenfor?

Manøvrering av skip

Optimal manøvrerbarhet av et skip. *Dette offshore forsyningsskipet er utrustet med en svingbar propell i hekken og en thruster i baugen. Se for øvrig side 8.7*



Dersom man ikke styrer skipet og lar roret eller den svingbare (azimuthing) hovedpropellen stå i en fast posisjon, vil noen skip fortsette i samme retning, mens andre skip likevel vil endre kurs. Denne egenskapen kaller vi skipets retningsstabilitet, og den er avhengig av skipets form og dermed blokkoeffisienten C_b Oversikten over C_b for ulike skipstyper er gitt på side 8-18.

Hva er forskjellen på styring og manøvrering? Å styre et skip i fart vil si å bruke et ror eller en svingbar propell til å lede skipet i den retning som til enhver tid ønskes. Å manøvrere et skip vil si å utsette det for *hyppige* eller store retningsforandringer, ofte kombinert med *fartsforandringer*. I et lett manøvrerbart skip kan slike operasjoner gjennomføres på en rimelig kort tid. Vi skal nedenfor komme inn på hvilke størrelser som da spiller en rolle og hvordan et skips manøvrerbarhet kan testes.

Retningsstabilitet

Forskjellige skipstyper har ulike krav til retningsstabiliteten. På figuren nederst til venstre ser vi at et skips retningsstabilitet er avhengig av lengde (L), bredde (B), volumdeplasement (∇), forholdene L/B, B/T og $C_b = \nabla / (L \cdot B \cdot D)$ (blokkkoeffisienten). For mange skip er det en fordel å være retningsstabilt. Containerskip er et eksempel på dette. Disse går i lange perioder over større strekk uten store krav til manøvrering. For offshore forsyningsskip kan det være annerledes. Det er viktig at de er lette å manøvrere når de skal posisjonere seg i forhold til en oljeplattform med 10 meters avstand. Dette oppnås både ved hjelp av skrogutforming og tilstrekkelig utrusting av fartøyet med propeller og thrustere med god kapasitet akterut og forut, se side 8-7. Cruiseskip stiller også tidvis store krav til både retningsstabilitet og styrbarhet. Dette løses med å installere svingbare propeller eller såkalte azimuther og podder. Se side 8-7.

Optimalisering av rorbruken. På skip brukes roret til å utføre kursendringer og stabilisering av skipet. Mye bruk av roret er imidlertid uheldig fordi det gir økt motstand, økt energibehov samt slitasje i rormaskinene. Det er en typisk avveining i reguleringsteknikken når energiforbruk og slitasje settes opp mot nøyaktighet i styringen. Vi kaller en slik problemstilling et optimaliseringsproblem.

Standard manøvreringstester

For å dokumentere skipets manøvreringsevne er det vanlig å gjøre visse standardiserte tester. Når man følger disse reglene, kan man sammenlikne manøvreringsegenskapene til ulike skip. Nedenfor er gitt noen standard tester. L er her brukt for lengden på skipet og V for skipets hastighet.

Sikksakk manøvrering. Roret legges over 10° den ene og den andre veien. Et krav som ofte settes, er at vinkelen skal være mindre enn 10° dersom $L/V < 10$ s, og mindre enn 20° dersom $L/V > 30$ s. *Konstant turn over.* Roret legges over 35° eller mer, svingradius bør da ikke bli mer enn $5 \cdot L$. *Initial svingevne.* Roret legges over 10°. Når skipet har svingt 10°, bør det ikke ha tilbakelagt en strekning større enn $2{,}5 \cdot L$. *Evne til å stoppe.* Motoren og propellen gis maksimal kraft for å bakke. Skipet bør ha stoppet helt opp før det har tilbakelagt en strekning på $15 \cdot L$.

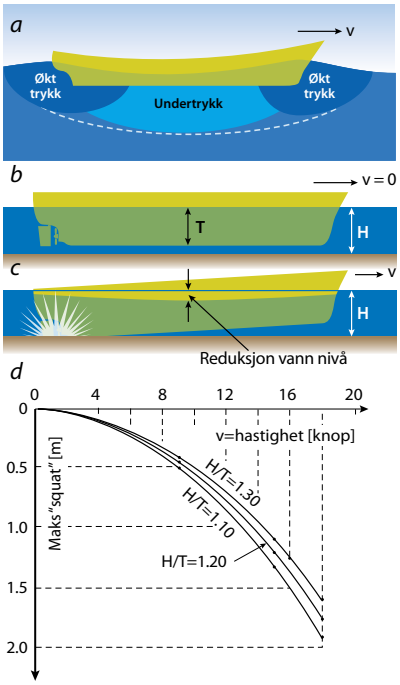
Cruiseskipet MS Allure of the Seas (Royal Caribbean) under Storebæltbroen på jomfruturen fra verftet STX-Europe i Finland, 2010. *Fra Wikipedia, the free encyklopedia. Skipet er normalt 72 m høyt og ville da ikke kunne passere under broen. Skorsteinen har imidlertid "teleskopisk" konstruksjon og ble gjort lavere under passering. Man kunne også lese i avisene at skipet måtte øke farten for å oppnå økt, såkalt "squat"-virkning for å kunne passere. Dette var imidlertid ikke riktig. Du kan lese mer om dette fenomenet nedenfor og generelt mer om cruiseskipet Allure of the Seas på sidene 9-30/31.*

Manøvrering på grunt vann, "squat"

Når et skip beveger seg, skyver det vann foran seg. Dette skaper områder med overtrykk og undertrykk i vannet, som vist på figuren til høyre. Undertrykkene medfører at skipet får økt dypgang når det er i fart. Kommer skipet da inn på grunt vann, med for eksempel bare 1-2 meters klaring under bunnen, øker undertrykkene ytterligere, og skipet "setter seg " enda dypere i vannet samtidig som trimmen forandres, se oppgave 8.3. Skipet kan da i verste fall grunnstøte, oftest med akterparten, men noen ganger også med baugen.

Fenomenet kalles "squat" (fra engelsk "sette seg på huk"). Dette kan unngås ved å bruke ekstra lav fart på grunt vann. "Squatting" var ikke noe problem for Allure of the Seas som hadde nesten 10 m klaring. For store tank- eller bulkskip, som skal inn i Østersjøen med full last, og som da har stor dypgang, er det nødvendig å holde ekstra lav fart i disse grunne farvannene.

Et annet fenomen som oppstår på grunn av interaksjon mellom sjøbunnen og den viste trykkfordeling under et skip i fart, er at skipets motstand vil øke i forhold til motstanden på dypt vann. Dette fenomenet blir merkbart allerede ved større sjødyp enn de som gir squat og bestemmes av et skips dypgang og blokkoeffisient.



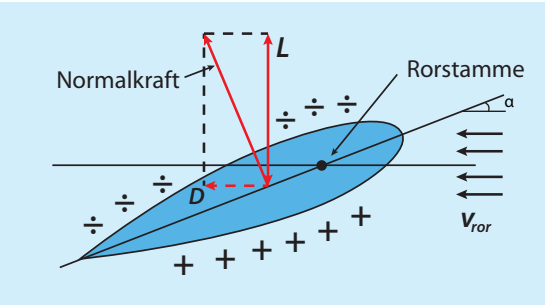
Skips-squat i åpent, grunt farvann.
Særlig aktuelt når H/T<1,3.
Fra [8.3]

a. Trykk i vannet rundt et skip i fart på dypt vann. Se også side 3-6
b. Definisjon av H/T (viktig parameter)
c. Skip i fart på grunt vann med "squat"-grunnstøting akterut. Legg merke til formen på overflaten
d. Eksempel på "squat" for et containerskip med blokkoeffisient 0,6

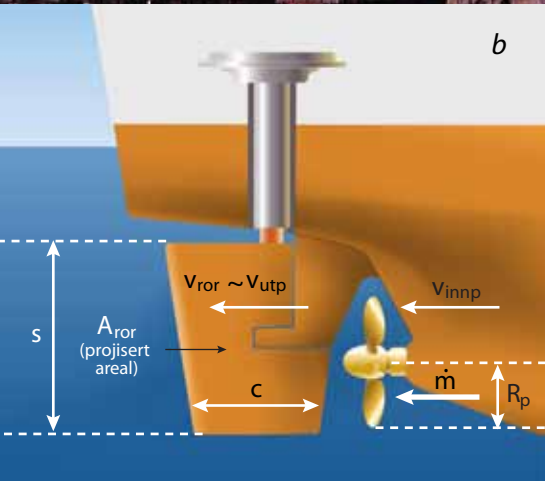
Vi undrer oss på:

a. Hvorfor vil et skip få større dypgang ved stor fart enn ved liten, også når det er på dypt vann?
b. Hvordan kan vi forklare den viste trykkfordelingen i figur a til høyre?
c. Hvorfor vil en gitt fart resultere i større undertrykk på grunt vann enn på dypt?

Styring av skip



Horisontalt snitt gjennom et ror. *Et ror er formet som f.eks. en hydrofoil, se side 3-22. Det utsettes derfor for en friksjon (D) og en sideveis "løftekraft" (L), som påvirker skipet med et moment om oppdriftssenteret og dreier det med urviseren (sett ovenfra).*



Styring ved hjelp av ror

Roret er normalt plassert rett bak propellen. Dermed utnyttes den ekstra hastigheten som induseres av propellen, slik at større rorvirkning oppnås. Sidekraften er avhengig av kvadratet av hastigheten og er ved små vinkler lineært avhengig av rorutslaget.

Rorteori. Et ror arbeider som en foil og kan derfor beregnes som vist på sidene 3-22/23. Styringskraften L må imidlertid kunne virke sideveis i *begge* retninger, og foilprofilen må derfor gjøres symmetrisk om korden. Dette betyr at "løftekraften" L bare blir avhengig av angrepsvinkelen α og er uavhengig av profilkrumningen. Konstantleddet 0,3 i ligningen nederst på side 3-22 faller derfor bort, slik at "løfttallet" blir

$$C_L = 2 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot K_{korr} = 2 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot \ s/(s+2c_m)$$

Her er s = rorets spenn (høyde), c_m = midlere kordelengde og α angrepsvinkel i radianer.

"Løftkraften" (styringskraften) kan, som for alle foiler, skrives slik:

$$L = ½ \cdot \rho \cdot v_{ror}^2 \cdot A_{ror} \cdot C_L$$

Vi har tidligere (side 3-26) pekt på at et skip under fart (v_s) drar med seg vann (medstrøm), slik at propellens framgangshastighet gjennom vannet reduseres med størrelsen $w \cdot v_s$ (w = 0,15 -0,45, typisk verdi 0,20). Vi må også ta hensyn til hastighetsøkingen Δv som svarer til den skyvekraften T som propellen genererer. Halvparten av hastighetsøkingen skjer allerede før innløpet, forårsaket av propellens sugevirkning. Ifølge Newtons 2. lov (se side 3-25), eller impulsloven, kan vi da beregne den hastighetsøkingen Δv som svarer til skyvekraften, av ligningen:

$$T = \dot{m} \cdot \Delta v = \pi \cdot R_p^2 \cdot v_{innp} \cdot \rho \, \Delta v = \pi \cdot R_p^2 \cdot (v_S - w \cdot v_S + ½ \, \Delta v) \cdot \rho \cdot \Delta v$$

Dermed kjennes hastigheten inn på roret: $v_{ror} \sim v_{utp} = v_S - w \cdot v_S + \Delta v$, og "løftkraften" kan bestemmes av ligningen ovenfor. Se også oppg. 8.6

Fritthengende bladror

a. Konvensjonell type. *De fleste ror smalner litt nedover.*

b. Utforming som brukes mye for store skip. *Fra [8.2]*

Viktige ligninger som brukes i beregninger av et rors "løftkraft":

1. Massestrøm inn propell: $\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho = \pi \cdot R_p^2 \cdot v_{innp} \cdot \rho$

2. Hastighet inn propell: $v_{innp} = v_S - w \cdot v_S + ½ \, \Delta v$

3. Hastighet forbi ror (ut fra propell): $v_{ror} = v_{utp} = v_S - w \cdot v_S + \Delta v$

Full hastighetsøking indusert av propellen (Δv) oppnås først i en avstand ca. $2 \cdot R_p$ *fra propellutløpet, det vil si ca. halvveis inne på roret. For enkelhets skyld regner vi imidlertid med full hastighet over hele rorbredden, som satt opp i ligning 3 ovenfor. Se for øvrig oppg. 8.6.*

Styring ved hjelp av propell

Konvensjonelle bladror vanligst i "deep sea skip". Tankskip, containerskip og andre skip som krysser store havstrekninger, bruker som oftest konvensjonelle propeller og ror, som omtalt på side 3-28 og side 8-6. Disse er mer effektive enn andre varianter ved normale hastigheter, men gir så liten styringsevne ved lave hastigheter at de da er anhengige av slepebåter når skipet skal legge til kai.

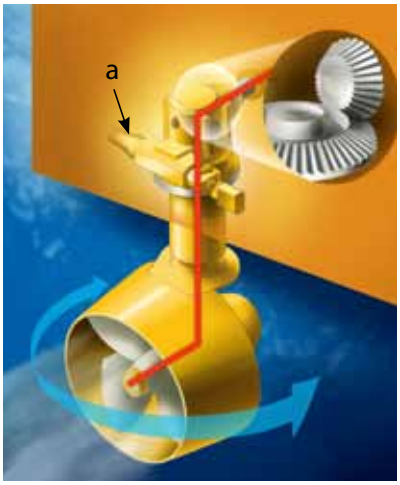
Ekstra krav til manøvrerbarhet ivaretas ved hjelp av thrustere. Andre skip, for eksempel ferger, cruiseskip og offshore serviceskip, må periodevis manøvrere med lave hastigheter og innenfor begrensede områder. Disse må da ha flere styresystemer til disposisjon. Ofte blir slike skip utstyrt med såkalte tunnel-thrustere i hekk, baug eller begge steder. Det blir da laget tunnel i skroget, og en propell plasseres inne i denne. Propellen kan for eksempel drives fra hovedmotoren. En *thruster* er altså ikke noe annet enn en propell som gir skyvekraft til styring og manøvrering av et skip ved lave hastigheter.

Svingbare thrustere og "propellror". Noen ganger er det behov for å ha en *svingbar* thruster som altså kan generere skyvekraft i flere retninger. En såkalt *azimuth-thruster* kan svinges rundt 360 grader om en vertikal akse, se figur til høyre. Et lignende arrangement er brukt i anlegget som er vist nedenfor. I begge tilfelle skjer kraftoverføringen fra hovedmotoren. I tillegg til manøvrering kan slike anlegg også brukes til *framdrift* av skipet, og vi kan gjerne si at skipet da er utstyrt med et *"propellror"* i stedet for et konvensjonelt bladror, samtidig som det kan bruke propellen til å skaffe delvis eller full framdrift når det er ønskelig. Det finnes også skip med separate, konvensjonelle propellanlegg og azimuth-thrustere som bare er beregnet for manøvrering ved lave hastigheter.

Elektrisk drevne "propellror" (podder). I dieselelektriske skip (ofte cruiseskip) og flyttbare plattformer drives gjerne propellene av elektromotorer. Ofte er disse da bygget inn i svingbare "belger" (podder) som plasseres utenpå skroget på hensiktsmessige steder, se figur side 8-13.

Svingbare azimuth-thrustere.

Tunnel-thrustere i baugen på et offshore serviceskip. *Kan drives fra hovedmotoren via pinjongsystem.*



Azimuth-thruster (360 grader svingbar) med Z-drift
Svingbare deler opereres hydraulisk av arm a. Kraftoverføring fra hovedmotor ved hjelp av pinjongsystemer gir en speilvendt Z som vist med rødt . Såkalt Z-drift er mye brukt i mange sammenhenger på skip.

Undringsoppgave:

Hvorfor er konvensjonelle ror alltid plassert bakerst på et skip?

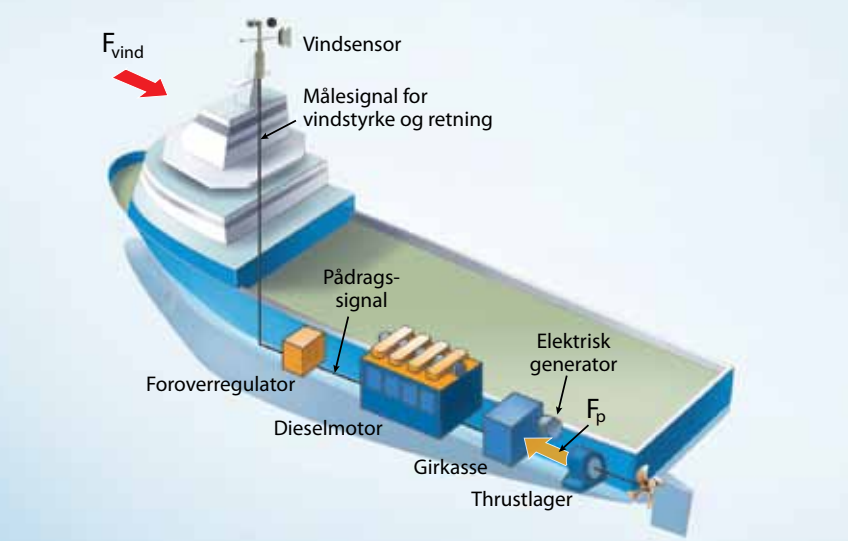
Reguleringssystemer for holding av skip i fast posisjon

To hovedprinsipper for regulering: Foroverkopling og tilbakekopling

Fysisk oppbygging av reguleringssystem med foroverkopling for skip som skal holdes i ro i vind.

Forstyrrelsen (vindstyrken) måles, og vi kan beregne nøyaktig hvilken kraft skipet dermed utsettes for. Vi kan også beregne hvilket turtall propellen må ha for å kompensere for vindkraften, og vi vet hvordan regulatoren må stilles inn for at den skal gi ut et pådragssignal til motorens brenselsinnsprøytingsventiler for å oppnå dette turtallet. Disse er elektromagnetisk styrte, og pådragssignalet fra regulatoren bestemmer hvor lenge ventilene skal stå åpne og dermed hvilken effekt motoren skal yte. Det er altså åpningstiden for disse ventilene som bestemmer motorens pådrag. Vi kobler med andre ord vindforstyrrelsen forover til pådraget, men foretar ikke noen måling av resultatet (skipets posisjon). Derfor bør denne metoden kombineres med tilbakekopling.

Viktige begreper:
Prosessen:
Hydrodynamiske og aerodynamiske krefter som gir skipsbevegelser
Forstyrrelser:
Bølger, vind og strøm.
I eksemplet så vi på vindforstyrrelser



Foroverkopling

La oss tenke oss at du har et skip som du ønsker å holde rolig ved hjelp av et DP-system. Det er kraftig vind som blåser rett mot fronten av skipet med vindstyrke v_{vind}=15 m/s, og vi ønsker å kompensere vindforstyrrelsen direkte med hovedpropellen ved bruk av foroverkopling. Fronten av skipet har et samlet tverrsnittsareal A_x = 200 m^2. Vi kan da regne ut at dette tilsvarer en kraft rett mot skipet med følgende formel:

$$F_{vind} = \tfrac{1}{2} \cdot \rho_{luft} \cdot C_d \cdot A_x \cdot v_{vind}^2$$

ρ_{luft} = 1,29 kg/m^3 er tetthet til luft, og C_d = 0,6 er vindmotstandstall funnet ved modelltesting i vindtunnel. Dette gir F_{vind} =17,4 kN.

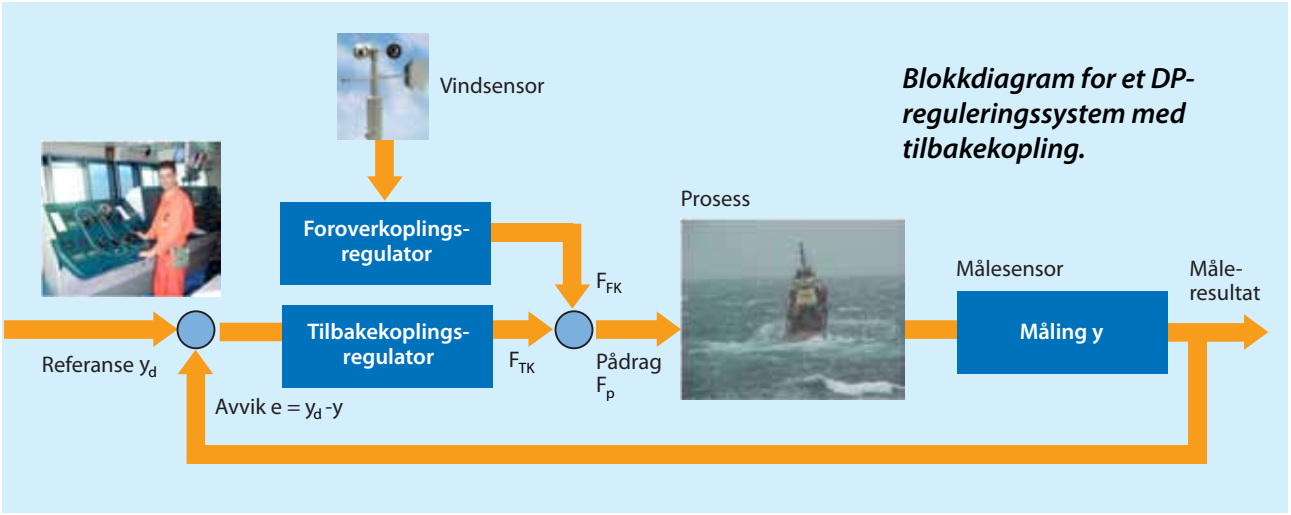
Ved direkte foroverkopling, der propellen kompenserer vindforstyrrelsen direkte, kan vi beregne turtallet til propellen slik at $F_{vind} = F_p$. Turtallet n til propellen er gitt av følgende formel, se side 3-27

$$F_p = \rho_{vann} \cdot D^4 \cdot K_T \cdot n^2$$

ρ_{vann} = 1025 kg/m^3 er tetthet til saltvann, K_T = 0,5 er propellens skyvekrafttall funnet med modelltesting i en slepetank og D er propelldiameter = 2 m. Ved å omformulere ligningen får vi

$$n = \sqrt{F_p/(\rho_{vann} \cdot D^4 \cdot K_T)} = 1{,}45 \text{ omdr./s} = 87{,}4 \text{ omdr./min}$$

Fordeler og ulemper ved metoden. Foroverkopling er en *rask metode* for å regulere et system. Den er imidlertid ikke *en nøyaktig metode* som kan opptre alene, med mindre du har perfekt kjennskap til skipets fysikk (prosessen) gjennom gode målinger og matematiske modeller av skipsbevegelsene og forstyrrelsene. Utover vind er det andre forstyrrelser, slik som bølger og strøm, som også vil påvirke fartøyet. Ved å kombinere foroverkopling med tilbakekopling får vi til en god løsning, se neste side.



Blokkdiagram for et DP-reguleringssystem med tilbakekopling.

Tilbakekopling

Det viktigste hovedprinsippet i reguleringsprosesser er tilbakekopling. I figuren over vises dette sammen med foroverkopling. Regulatoren for tilbakekopling vil reagere på differansen mellom målt tilstand y i forhold til en gitt referanse y_d, dvs. $e = y_d - y$.

La oss igjen tenke oss at vi har et skip som vi ønsker å holde rolig med et DP-system. Det er både kraftig vind, bølger og strøm som angriper rett mot fronten av skipet. Vi kan anta at vi kompenserer forstyrrelsene fra vindkreftene med foroverkopling som vist på forrige side og ovenfor. Foroverkoplingsregulatoren er da:

$$F_{FK} = \tfrac{1}{2} \cdot \rho_{luft} \cdot C_d \cdot A_x \cdot v_{vind}^2$$

v_{vind} er tilgjengelig fra vindsensor.
Den enkleste form for tilbakekopling er å konstruere en proporsjonalregulator (P-regulator).

$$F_{TK} = k_p \cdot (y_d - y)$$

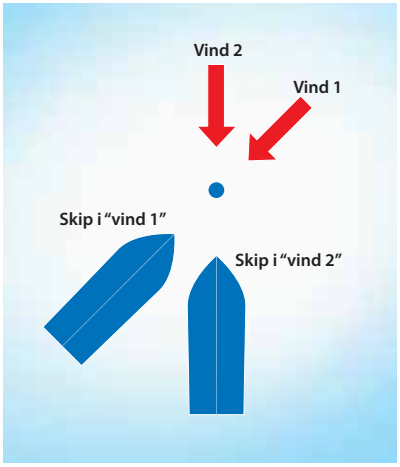
$k_p > 0$ er regulatorforsterkning, som kan økes avhengig av hvor kjapt vi ønsker at det skal reageres på avviket. y_d er referansen som angir hvor vi ønsker å holde skipet. Denne settes av DP-operatøren.

Resulterende pådrag blir nå

$$F_P = F_{TK} + F_{FK}$$

Tilbakekopling gir en nøyaktig regulering av prosessen. Vi har her forutsatt en P-regulator som i dette tilfelle gir en "fjærstivhet" til prosessen. Det er også vanlig å benytte derivat (D) og integral (I) tilbakekopling. Derivat er tilbakekopling fra hastighetsavvik og vil gi ekstra demping. Integratoren integrerer avviket over tid og vil dermed kompensere for statiske avvik forårsaket av midlere bølge- og strømforstyrrelser. Ved å bruke både proporsjonal, integral og derivat tilbakekopling får vi en såkalt PID-regulator. Du kan lese litt mer om regulatorer med derivat og integral tilbakekopling på side 8-15.

Viktige begreper i et reguleringssystem:
1 forstyrrelser, 2 måling, 3 målesensor, 4 prosess, 5 pådrag, 6 tilbakekopling, 7 tilbakekoplingsregulator, 8 reguleringsavvik, 9 ønsket utgangsverdi (referanse), 10 prosessutgang.



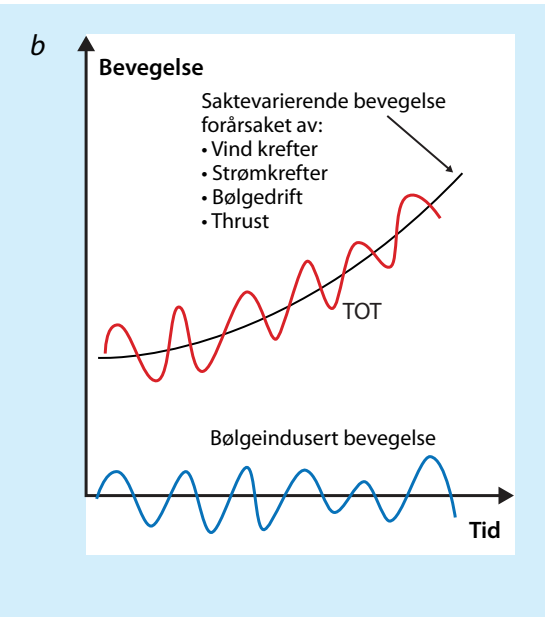
Riktig retningsorientering for et DP-skip
Når et skip skal ligge i ro, er det ikke bare avstanden til et kontrollpunkt som skal holdes konstant. I tillegg må DP-systemet sørge for at skipet alltid "sikter" mot kontrollpunktet, uavhengig av retningen av bølger og strøm.

Undringsoppgave:

På side 8-1 er vist et blokkdiagram for et generelt reguleringssystem med tilbakekopling. Vi undrer oss på hvordan tallkodene for de viktige begrepene nederst på siden kan settes på rett plass i ikonet (enten i en av boksene eller over en av pilene).

Reguleringssystemer for holding av skip eller plattformer i fast posisjon

Mer om DP-reguleringssystemer



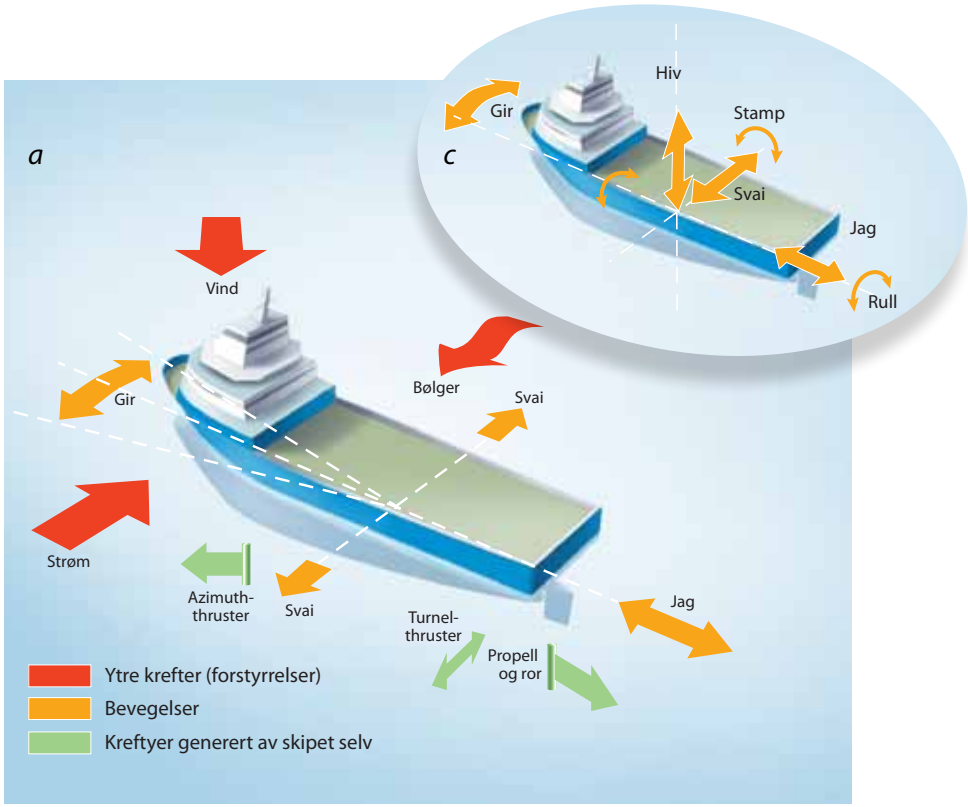
a. Forstyrrelser (ytre krefter), induserte bevegelser og egengenererte krefter for et DP-skip med kompensasjon av gir, svai og jag. (Kongsberg Maritime). *Posisjon måles både av radar og akustiske sensorer montert på havbunnen med tilbakekopling til regulatorer som gir styresignaler til både forover- og sideveis propellmotorer. I tillegg nyttes foroverkopling av signaler fra vindmålere på skipet og beregnede verdier av saktevarierende støm og bølgeinduserte bevegelser.*

b. Saktevarierende og bølgeinduserte begelser av skip eller flytende plattformer. *Det er bare den saktevarierende bevegelsen (grønn graf) som det kompenseres for i et DP-system*

c. Komplett oversikt over de seks mulige, svingende bevegelsene i et fartøy: tre rettlinjede og tre dreiende. De dreiende forårsakes av momenter.

Hydrodynamiske krefter

Et fartøy vil være utsatt for forstyrrelser fra bølger, vind og strøm. Målet for et DP-reguleringssystem er å kompensere for disse forstyrrelsene og kunne endre posisjon og orientering om ønskelig.



De totale bevegelsene deles opp i:

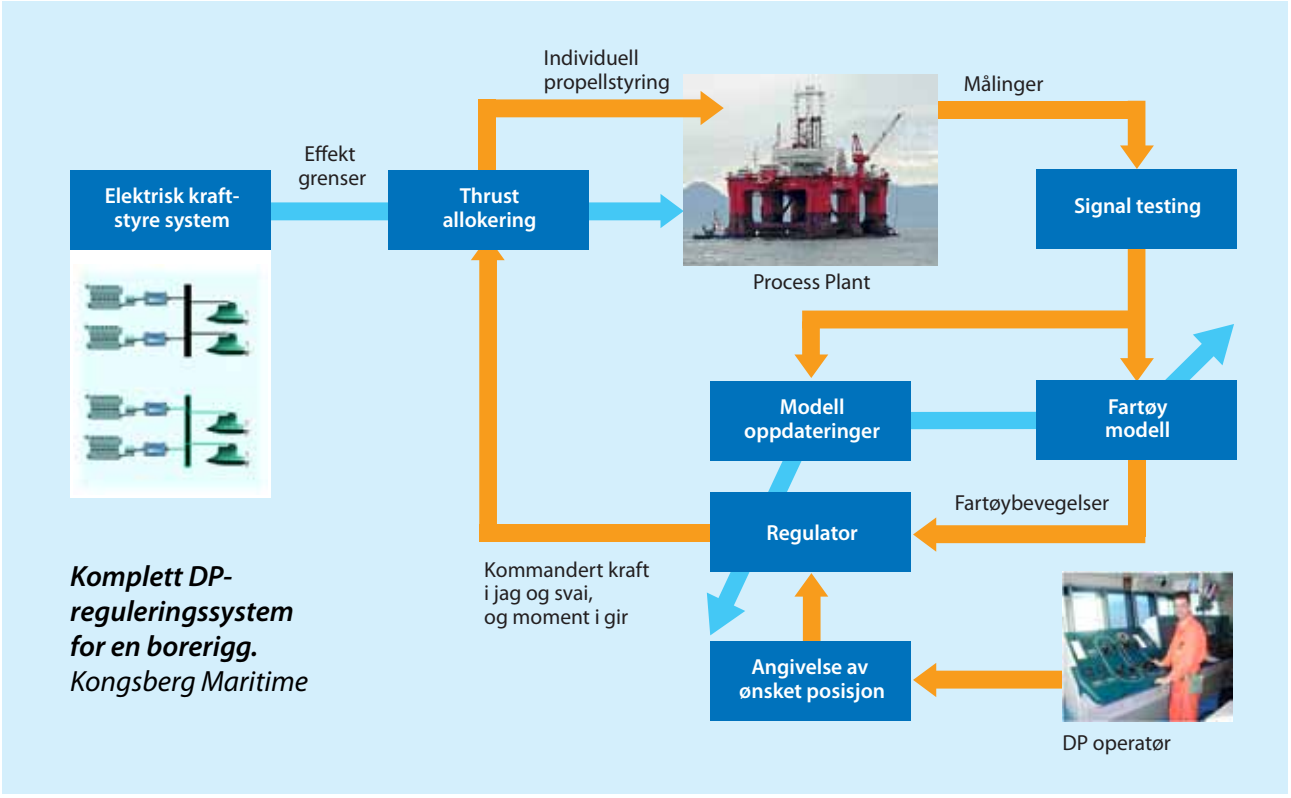
- Bølgeindusterte bevegelser forårsaket av bølgelaster.
- Saktevarierende bevegelser forårsaket av vind, strøm og bølgedrift.

I forbindelse med dynamisk posisjonering (DP) og autopiloter er det ikke ønskelig å kompensere bølgekrefter da de er store og hurtigvarierende. Forsøk på å kompensere disse vil medføre stor slitasje av styremaskiner og propeller i tillegg til stort energiforbruk. I DP-og autopiloter er det derfor *ønskelig å kun kompensere de saktevarierende bevegelsene*. Dette betyr at vi bør filtrere ut de bølgeinduserte bevegelsene fra målingene før de benyttes av regulatoren.

I forbindelse med bevegelsesdemping av hurtiggående fartøy og rulledemping av skip er det derimot bølgeinduserte bevegelser som forsøkes dempet ved hjelp av flaps. Rulling er en dreiebevegelse om en horisontal akse i skipets lengderetning. Dette er en spesielt ubehagelig bevegelse for passasjerer og mannskap. Du kan lese mer om slik regulering på side 8-17.

DP-reguleringssystem for borerigg

Utover selve **regulatoren,** som kan baseres på tilbakekopling og foroverkopling, er det flere andre funksjoner som må på plass i reguleringssystemet, se nedenfor.



Komplett DP-reguleringssystem for en borerigg.
Kongsberg Maritime

Signaltesting: Alle målesignaler må testes for feil før de benyttes. Typiske signalfeil kan være bortfall, drift, høy varians, sprang/uteliggere og frys. I tillegg er det ofte forstyrrelser på signalene som må filtreres bort.

Fartøymodell: I avanserte reguleringssystemer benyttes matematiske modeller, oppdatert av målinger av prosessen, til å estimere tilstander som posisjon og hastighet. Disse benyttes da av regulatoren. Ved kortvarig bortfall av målinger kan estimerte tilstander benyttes til å vinne tid for å avklare situasjonen.

Angivelse av ønsket posisjon: Settes av DP–operatøren. For at DP–systemet ikke skal utsettes for store sprang i ønsket posisjon, benyttes referansemodeller som glatter ut settpunktene til regulatoren.

Modelloppdateringer: Avhengig av last om bord og varierende værtilstander er det nødvendig å oppdatere fartøymodellen og regulatoren. Dette kalles for adaptiv regulering – der systemet oppdaterer seg automatisk.

Thrust allokering: Sørger for at beregnet kraft i jag og svai og moment i gir omdannes til kommandosignaler for hver enkelt thruster eller propell. Er det mange ulike propeller som er installerte, kan dette oppnås på mange måter. For å gjøre dette med minst mulig kraftforbruk når effektgrensene er satt av det elektriske kraftstyresystemet (også kalt Power Management System), benyttes avanserte optimaliseringsmetoder.

Undringsoppgave:

Som det framgår av DP–skipet på forrige side, kompenseres det bare for bevegelsene gir, svai og jag. Hvorfor er det generelt vanskelig å kompensere for rull og stamp og ekstra vanskelig, nesten umulig, å kompensere for "hiv" i et DP-system?

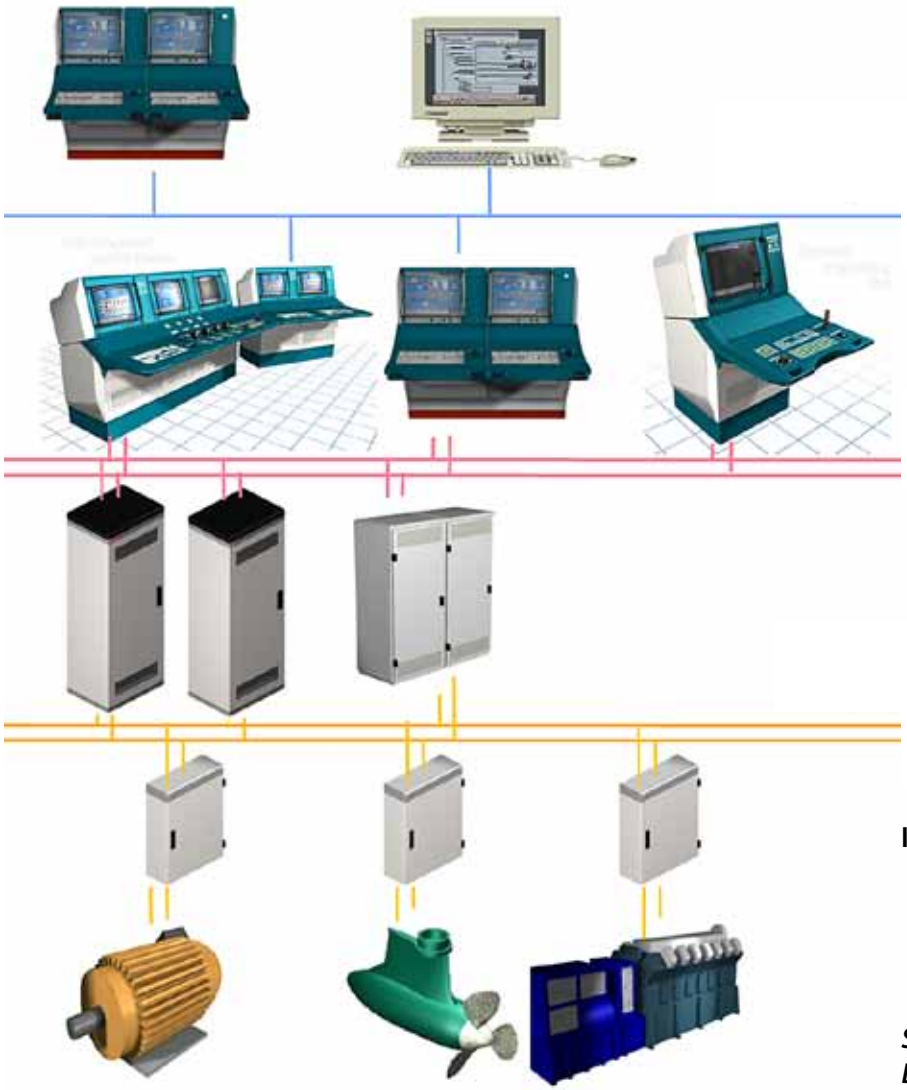
Reguleringssystemer for holding av skip eller plattform i fast posisjon

Datasystemer og automatisering

Store reguleringssystemer krever dataoperatør

Realisering av marine reguleringssystemer skjer ved bruk av datamaskiner. Legg merke til at de fleste reguleringssystemer krever tett interaksjon med en operatør som bestemmer referansene og aktiverer ulike reguleringsfunksjoner som for eksempel holding av posisjon, endring av posisjon, målfølging av for eksempel en ROV, start og stopp av motorer osv. I tillegg overvåker operatøren systemet ved å sjekke tidstrender av viktige signaler og eventuelle alarmer.

Overvåkingen skjer ofte på en egen datamaskin kalt operatørstasjon, mens selve regulatoren med tilhørende logikk for håndtering av funksjoner ligger på egne datamaskiner, ofte omtalt som "controller". Det har i den senere tid også blitt vanlig med distribuerte Input/Output (IO)-controllere som kommuniserer via feltbuss til motorer, propeller, ventiler osv. I disse gjennomføres ofte lokal styring av pådragsorganene.

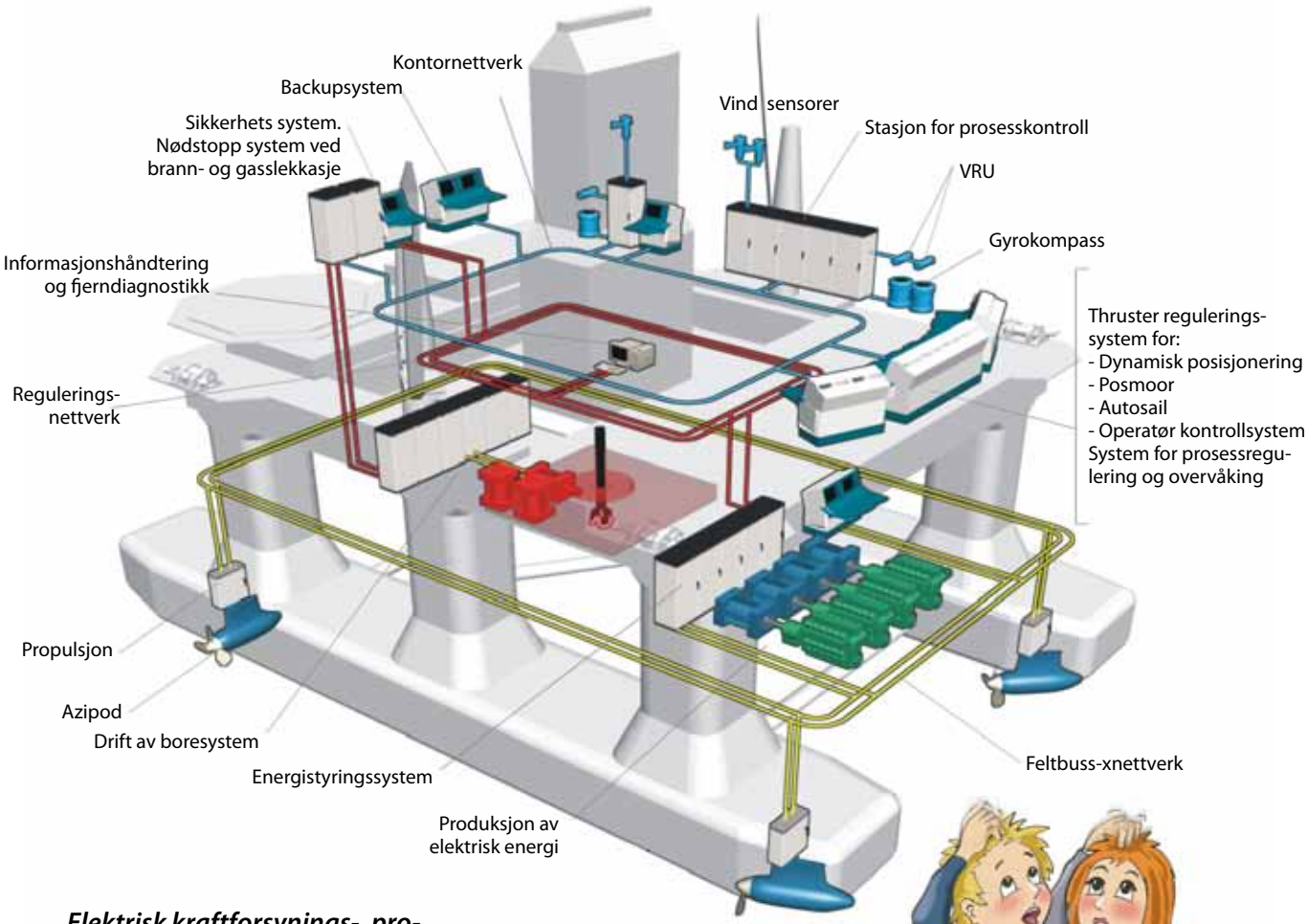


Sentralt utstyr i nettverkene for DP-boreriggen på høyre side

Store reguleringssystemer krever godkjenning fra Det Norske Veritas

Vi pleier ofte å karakterisere kompleksiteten i reguleringssystemene ut fra antall IO–signaler og funksjonalitet. Antall IO–signaler kan variere fra 1000-2000 opp til 30 000-50 000 signaler på de mest avanserte cruiseskipene og offshorefartøyene.

Det er da lett å skjønne at det stilles store krav til design, testing og operasjon av komplekse automatiseringssystemer. Siden mange av disse er viktige for sikker og god drift av fartøyet, stilles det krav til disse fra myndigheter og klasseselskaper. Det Norske Veritas er et verdensledende klasseselskap som lager standarder og regler for skip og rigger, inkludert marine reguleringssystemer.



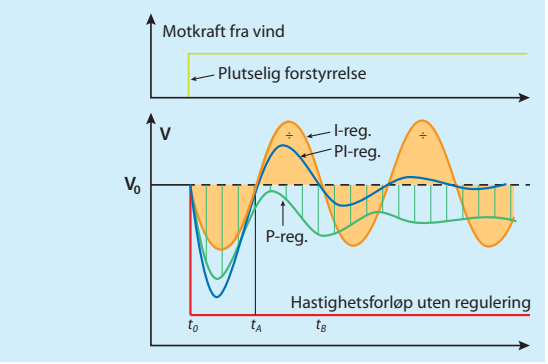
Elektrisk kraftforsynings-, propulsjons- og automasjonssystem på en DP-borerigg (ABB)

Undringsoppgave:

Hvilke to systemer om bord tror du har størst behov for elektrisk energi?
Hvilke fargekoder er brukt for systemet som produserer den elektriske kraften?

Reguleringssystemer for skip i fart

Hastighetsregulering. Litt om regulatorer



Pia og Ivar eksperimenterer med regulering av båtfarten på dorgefiske

– – – Ønsket fartsforløp

Fartsforløp uten regulator

Virkelig fartsforløp når Pia arbeider som P-regulator. *Hun øker da med mellomrom det opprinnelige pådraget med et tillegg som er proporsjonalt med fartsfeilen $v_0 - v_P$, vist med grønne, vertikale linjer.*

Virkelig fartsforløp når Ivar arbeider som I-regulator. *Dette forutsetter at han da med mellomrom justerer pådraget proporsjonalt med oppsummerte, totale fartsfeil forut for pådragsjusteringen. Ivar må dermed hver gang vurdere arealet mellom virkelig og ønsket fartsgraf. Ved t_A har båten oppnådd sin opprinnelige fart. Ikke uventet fører en slik reguleringsmetode til at pådraget da har blitt for stort. Ivar må derfor begynne å redusere pådraget igjen. Ved t_B er situasjonen blitt den samme som ved t_0, og Ivar må starte forfra igjen.*

Virkelig fartsforløp når Pia og Ivar arbeider samtidig .

Se også oppgave 8-11.

Foran har vi hovedsakelig sett på hvordan skip og plattformer kan holdes i ro uten bruk av ankere, men vi skal nå bruke resten av kapitlet på anvendelse av reguleringsteknikk i seilende fartøyer. Vi vil da først se nærmere på reguleringssystemer for å holde konstant hastighet og fast kurs (autopilot), og deretter systemer for bevegelsesdemping av hurtiggående fartøy. Vi vil samtidig komme litt inn på regulatorteori. Foran, på side 8-9, har vi nemlig brukt uttrykk som PID-regulator og proporsjonal (P), integral (I) og derivat (D) tilbakekopling, uten å forklare nærmere hva disse ordene egentlig betyr. Vi vil her forsøke å bøte litt på dette.

Eksempel: Regulering av hastighet på dorgebåt

Vi bruker dette som et eksempel på hvordan virkemåten for en PID-regulator kan forklares på en "populær" måte og lar våre to "undringselever" (Pia og Ivar) prøve seg som dorgefiskere. Under dorging er det meget viktig å holde konstant og riktig hastighet på båten slik at agnet holder en bestemt høyde over sjøbunnen.

Hastighetsregulering med proporsjonalregulator (P-regulator)
Først er det Pia som prøver seg som fisker. Båten er utstyrt med lesbar fartsmåler. Hun finner fort en passende fart og holder denne konstant. Plutselig blåser det imidlertid opp med kraftig vind rett mot båten som dermed raskt får en redusert fart. Pia følger derfor med på fartsmåleren og forsøker hele tiden å øke pådraget *proporsjonalt med differensen mellom ønsket og avlest fart.* Hun jobber dermed som det vi kaller en P-regulator. Dette gir båten et fartsforløp som skissert. Pia slår seg til ro med at sluttfarten blir mindre enn ønsket, fordi hun ser at denne tross alt er blitt bedre enn om hun ikke hadde regulert pådraget i det hele tatt. Dessuten vil hun ikke belaste motoren for mye.

Fartssregulering med integralregulator (I-regulator). Neste dag vil Ivar prøve seg. Også han opplever den samme, plutselige vinden og får dermed den samme fartsreduksjonen på båten. Ivar regulerer imidlertid pådraget på en helt annen måte enn Pia. Han øker pådraget stadig inntil farten har kommet opp igjen på ønsket verdi. På en måte oppsummerer, integrerer, han alle forangående fartsfeil og øker pådraget proporsjonalt med denne totalverdien. Denne metoden gir imidlertid et pådrag som er blitt for stort når farten, når den opprinnelige verdien (ved tidspunktet tA). Båten vil fortsette å øke farten og den vil bli for høy hvis Ivar ikke foretar seg noe. Han må derfor begynne å redusere pådraget igjen, og videre fartsforløp blir som vist på figuren. Pådraget bestemmes av de arealer som fartsfeilene har generert til enhver tid.

Fartsregulering med PI-regulator. Det kan synes som om I-regulatorer ikke er noen god løsning når de brukes alene. Målet med reguleringen var å holde farten tilnærmet konstant. Middelverdien er som ønsket, men de store svingningene er uheldige. Brukes de to metodene samtidig, blir imidlertid resultatet tilfredsstillende, som den blå grafen på figuren viser. Da har vi altså tenkt oss at Pia og Ivar betjener sine pådragsorganer samtidig, men basert på hver sin metode,

Hastighetsregulering med PID-regulator. Enda bedre hadde resultatet blitt hvis vi kunne tenkt oss at Pia og Ivar tok med seg en tredje person, Dora. Hun skulle i så fall ha hatt som oppgave å regulere pådraget først og fremst når båtens hastighetstap skjedde *raskt*. Dora var matematiker og skjønte fort at hun da måtte finne ut hvor "hastighetsgrafen" hadde det bratteste forløpet. Dette var umiddelbart etter at vinden satte inn. Dora tenkte seg hvordan den deriverte av grafen ville forløpe og ga på pådrag som var proporsjonalt med den deriverte. En slik regulator med derivatvirkning (D-virkning) i tillegg til P- og I-virkningene kaller vi en PID-regulator. Den vil arbeide enda raskere og bedre enn PI-regulatoren.

Matematisk formulering av PID-regulatoren

En virkelig PID-regulator arbeider som illustrert i figurer til høyre. I prinsippet beregner den signalet til pådragsorganet som funksjon av reguleringsavviket $e = v - v_0$ etter følgende ligninger

Pådrag = nominelt pådrag + pådrag fra P-ledd + I-ledd + D-ledd

$$u = u_0 + K_p \cdot e + K_i \cdot \int_0^t e \cdot dt + K_d \cdot \dot{e}$$

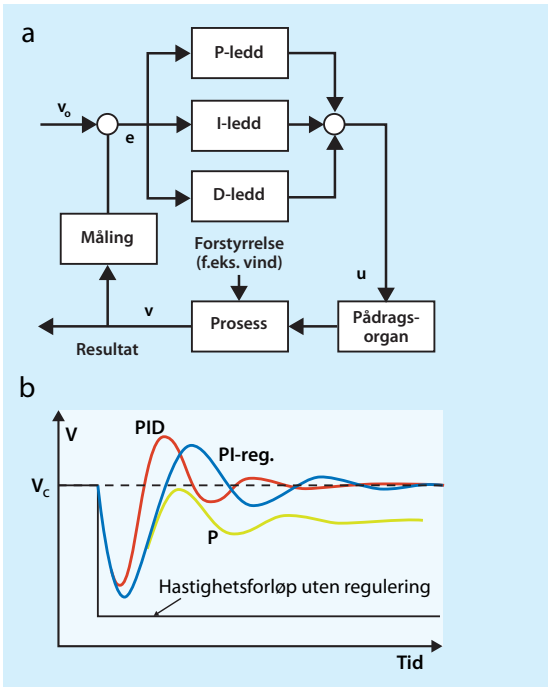
u, u_0 og e: Forklart i figuren øverst til høyre
K_p, K_i og K_d: Konstanter som finnes ved prøving og feiling
$\int_0^t e \cdot dt$ = integralet av reguleringsavviket over en viss integraltid. Dette er et uttrykk for *summen* av *reguleringsavvikene* (mellom virkelig og ønsket verdi, for eksempel båthastigheten) i løpet av en viss tid
$\dot{e}$ = den tidsderiverte av reguleringsavviket. Skrivemåte med prikk i stedet for "de/dt" brukes ofte i teknikken. Dette leddet sørger altså for en regulering etter hvor raskt endringen i reguleringsavvikene opptrer

De tre leddene P, I og D i en PID-regulator ivaretar hver sin karakteristiske funksjon. **P-leddet** gir ut et pådrag som er proporsjonalt med det reguleringssavviket som til enhver tid mottas. Dersom forstyrrelsen skjer som et sprang, er avviket størst i begynnelsen, og P-leddet gir relativt raskt ut en kompensering for dette. Selv om sluttresultatet ikke gir null i reguleringsavvik, har tross alt P-leddet **relativt raskt** og effektivt "gjort unna" den vesentligste delen av reguleringsarbeidet.

I-leddet har en tregere funksjon, men det er dette leddet som sørger for et **tilfredsstillende sluttresultat,** nemlig et reguleringsavvik som er nesten lik null. Årsaken til at I-leddet er tregere, er at det skal integrere, altså "summere" alle avvik. Det må derfor "vente på" å få med de siste avvikene, selv om disse er små og betyr lite i sluttsummen.

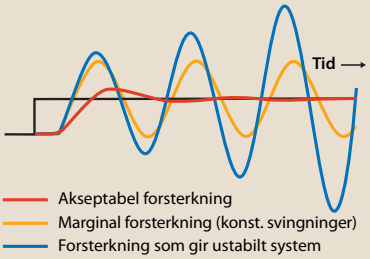
Som det framgår ovenfor, har **D-leddet** en såkalt derivatvirkning. Det regulerer pådraget etter den tidsderiverte av reguleringsavviket, altså hvor **fort avviket forandres**. PID-regulatoren arbeider derfor raskest av alle.

Stabilitet. Tilbakekopling inngår i de fleste reguleringssyemer, men metoden kan resultere i ustabilitet, se "boks" i margen



a. Blokkdiagram for en PID-regulator med tilbakekopling
I figuren betyr:
v_0 = ønsket utgangsverdi (referanse)
v = resultat (utgang fra prosessen)
e = v-v_0 = reguleringsavvik

b. Sammenligning av pådragsrespons fra P-, PI- og PID-regulatorer på en tenkt, sprangvis motvindsforstyrrelse av en båts hastighet. *Vi tenker oss at båten med motor reagerer meget raskt på endringer i vind og pådrag*



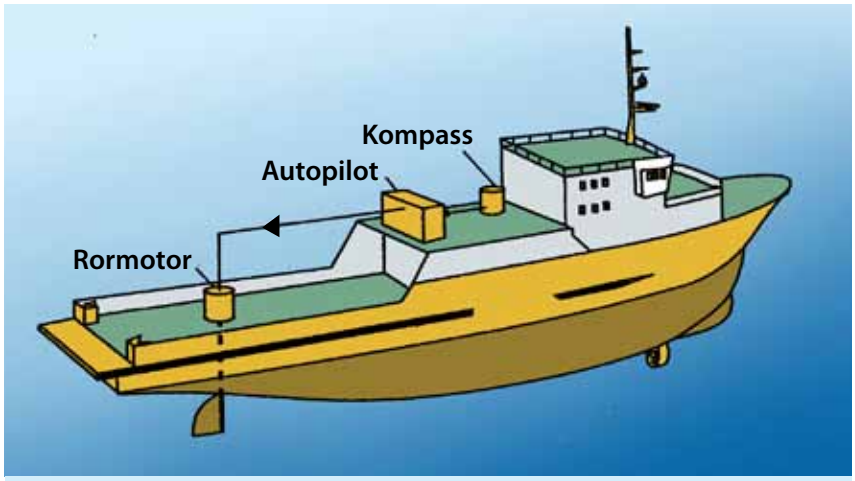
Med **ustabilitet** mener vi at systemets utgangssignal begynner å svinge med voksende amplitude som vist ovenfor. Dette kan skyldes at det blir brukt for store forsterkninger i systemet eller at det er for store tidsforsinkelser i dette. Det er som regel lett å lage stabile, men trege systemer. *Utfordringen er å lage reguleringssystemer som er både stabile og raske.*

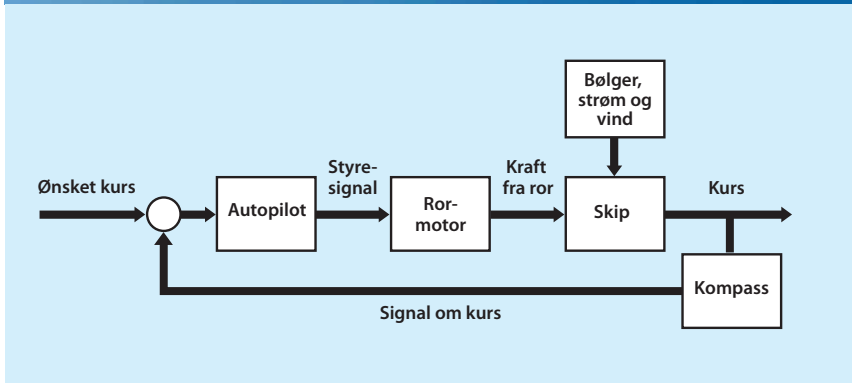
Reguleringssystemer for skip i fart

Automatisk styring av fartøyer (autopilot)

Eksempel på seilingsrute for autopilot med datamaskin. *En rekke GPS-baserte kontroll-punkter programmeres. Autopiloten sørger for at skipet sikter seg inn mot det nærmeste punktet. Når skipet begynner å nærme seg dette, vil autopiloten sørge for at det begynner å sikte mot neste punkt.*

Automatisk styring av seilskip var en av de første oppgaver som ble forsøkt løst ved hjelp av reguleringsteknikk. Under stabile strøm- og vindforhold ble et lite "styreseil" med mekanisk forbindelse til rorkulten brukt til å påvirke roret slik at fartøyet automatisk holdt en tilnærmet fast kurs.





Holding av fast kurs. Et autopilotsystem i dag benytter seg av et kompass der avviket mellom ønsket og virkelig kurs påvirker en kurs-regulator (autopilot) som styrer en rormotor. Kompasset kan være et magnetkompass, men er oftest et gyrokompass.
Avanserte skip er i dag utstyrt med datamaskinbaserte systemer som sørger for å holde riktig kurs, men som også følger med i det totale trafikkbildet og varsler når det oppstår fare for kollisjon eller andre farlige situasjoner.

Programmerte seilingsruter. I dag er gjerne autopilotsystemene datamaskinbaserte. Da kan detaljerte seilingsruter programmeres inn for navigasjon i kompliserte farvann eller for å unngå farvann med uheldige værforhold.

Sammen med radarer kan datamaskinene også holde rede på kursene til andre fartøyer og varsle når det oppstår fare for kollisjoner eller eller andre farlige situasjoner.

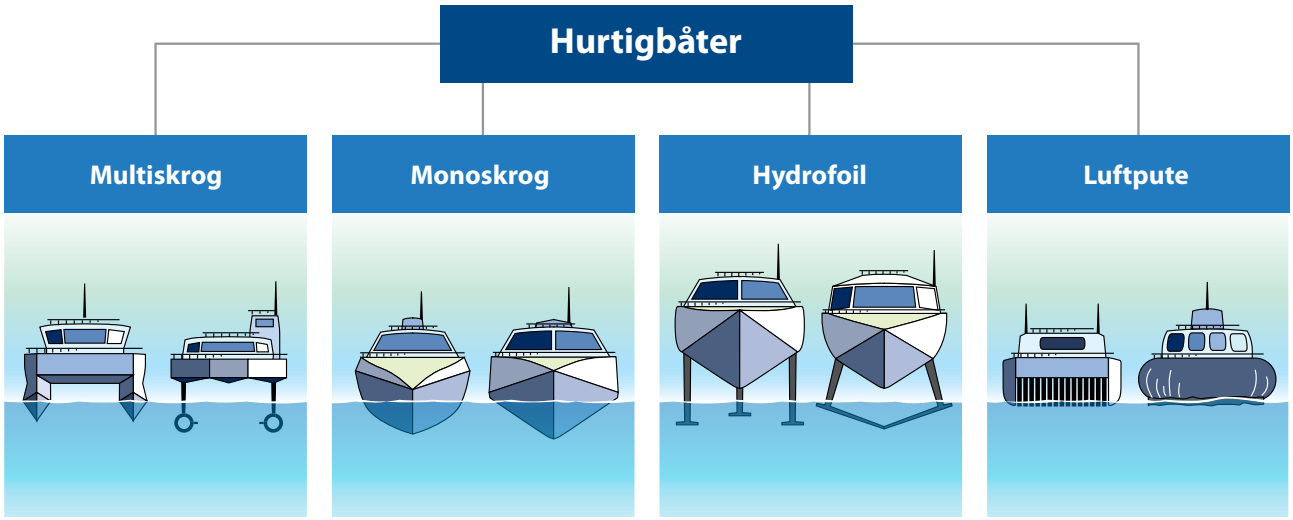
Undringsoppgave:

Vi undrer oss på hvordan vi kan lage et blokkdiagram for informasjonsflyten i et system for manuell styring av båten på side 8-14 når denne skal holde konstant hastighet

Reguleringssystemer for skip i fart

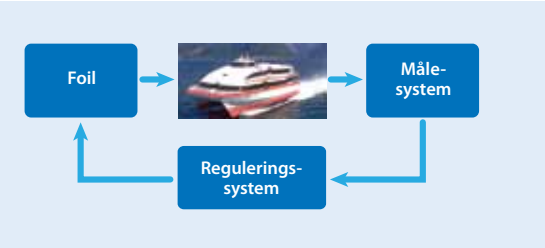
Bevegelsesdemping i hurtiggående fartøyer

Oversikt over typer hurtiggående fartøyer. En sammenstilling av de forskjellige typer hurtiggående fartøyer er vist nedenfor. Vi har beskrevet slike fartøyer tidligere, se sidene fra 3-18 til 3-23, og det skulle ikke være nødvendig å karakterisere dem nærmere nå.



Oversikt over typer hurtiggående fartøyer

Hvorfor er det nødvendig med bevegelsesdemping? Hurtiggående fartøyer er vanligvis relativt små. De vil derfor lett utsettes for store bevegelser. Dessuten brukes de først og fremst til transport av passasjerer, noe som medfører ekstra krav til komforten. Slike fartøyer blir derfor alltid utstyrt med reguleringssystemer for bevegelsesdemping. Det er særlig de vertikale akselerasjonene forårsaket av hiv, rull og stamp som man forsøker å redusere.



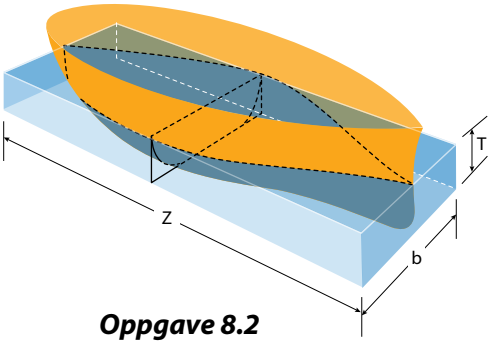
Bevegelsesdemping av ettskrogsfartøyer og katamaraner. Disse utstyres med regulerbare foiler langs skroget. Man måler fartøyets akselerasjoner, og et reguleringssystem sørger for regulerende aktivering av foilene, som prinsipielt vist til høyre. Det brukes gjerne PID-regulatorer.

Regulerbare foiler brukes også for andre typer fartøyer enn de hurtiggående, for eksempel på cruiseskip og andre skip hvor det stilles ekstra krav til demping.

Demping av hydrofoilfartøyer. Her blir reguleringssystemene svært avanserte. Det kreves rask respons, og de ulike foilene må reguleres i forhold til hverandre slik at fartøyet ikke blir ustabilt. Det må være to parallelle sensorer for å øke evnen til å håndtere feil.

Luftputefartøyer. Som tidligere beskrevet, bruker slike fartøyer vifter til å blåse inn luft mellom skrogene og skjørtene foran og bak. God bevegelsesdemping i bølger oppnås ved å regulere trykket i luftputa. Dette gjøres ved å åpne og lukke ventiler plassert på gunstige steder langs luftputa.

Oppgaver



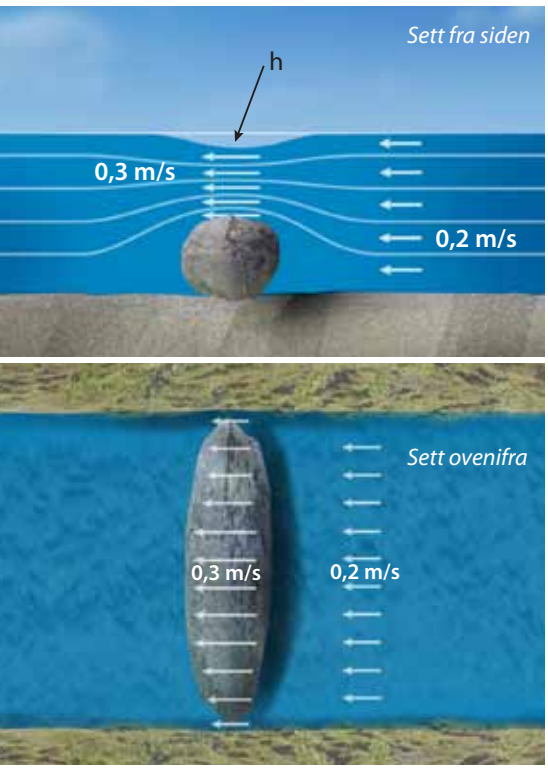
Oppgave 8.2

Definisjon av begrepet blokk-koeffisient Cb (se side 2-4)

$C_b = \nabla / (Lpp \cdot B \cdot T)$

De forskjellige skipstyper har sine karakteristiske blokkoeffisienter. For eksempel oppgir [8.3] for full-lastede skip følgende verdier for C_b

ULCC (se side 9-22): 0,85
Supertanker (se side 9-22): 0,825
Andre tankskip: 0,80
Bulkskip: 0.775-0,825
Vanlige lasteskip: 0,70
Passasjerskip: 0,625
Containerskip: 0,565



Illustrasjon til oppgave 8.4 d

Oppgave 8.1

a) Hva er forskjellen mellom styring og regulering av en prosess?
b) Hva mener vi med et autonomt skip?
c) Forkortelsen DP-er et begrep som er mye brukt i havromsteknologien. Hva er dette en forkortelse for? Forklar nærmere hva vi mener med begrepet.

Oppgave 8.2

a) Hva er forskjellen mellom styring og manøvrering av et skip?
b) To skip, A og B, har begge et volumdeplasement på 30 000 m^3. Skip A har lengde, bredde og dypgang på henholdsvis 177,4 m, 29,6 m og 9.8 m. Skip B har lengde og bredde på henholdsvis 167,2 m og 20,9 m, og en blokkoeffisient på 0,82. Marker A og B som punkter i diagrammet på side 8-4. Hvilket skip har best retningsstabilitet?
c) Hva slags skip tror du A og B kan være?

Oppgave 8.3

Det vises til side 8-5 om virkninger som skip utsettes for når de kommer inn på grunt vann (som er fullt åpent sideveis). Analyser av en rekke slike tilfeller har gjort det mulig å etablere følgende "tommelfingerregel" for hvor mye dypgangen da øker. Den maksimale økingen (squat) kan tilnærmet beregnes slik:

Maks. squat = $C_b \cdot v^2/100$ [m], gjelder for H/T = 1,1 -1,4

Her er:
C_b = skipets blokkoeffisient, se side 2-4. Hvis $C_b > 0,70$ vil maksimal squat opptre ved baugen, $C_b < 0,70$ gir maksimum squat akterut og $C_b \sim 0,70$ gir jevn squat langs hele skipet
v = skipets hastighet relativt til vannet, innsatt i knop

Du skal nå beregne hva som skjer med en supertanker som seiler med en fart på 10 knop gjennom Øresund hvor vanndybden er ca. 17 m. Skipets blokkoeffisient er 0,83, og dypgangen er normalt 14 m.
a) Vis at forholdet H/T er innenfor gyldighetsområdet for formelen.
b) Beregn økt dypgang (squat), som altså opptrer ved baugen.
c) Hvor stor er H/T for "Allure of the Seas" i dette farvannet? Dypgangen finner du på side 9-30.

Oppgave 8.4

a) Forklar hvorfor et skip vil få større dypgang ved stor enn ved liten fart, også når det er på dypt vann.
b) Forkar hvorfor trykkfordelingen under et skip blir som vist på side 8-5
c) Hvorfor blir det mye større undertrykk ved en gitt fart på grunt vann enn på dypt vann?
d) Beregn dynamisk trykkreduksjon langs strømlinjene i en bekk hvor strømningsastigheten øker fra 0,2 til 0,3 s, som vist på figur. Oppgi trykkreduksjonen i Pa. Hvor stor senking (h) av overflaten svarer dette teoretisk til? I virkeligheten er nok senkingen betydelig mindre enn vist. Hvorfor?

Oppgave 8.5
a) Er det noen forskjell på en propell og en thruster?
b) Hvorfor er konvensjonelle ror alltid plassert bakerst på et skip?

Oppgave 8.6 (vanskelig, passer kanskje best som gruppearbeid)
Det vises til side 8-6. Vi har foran, på sidene 3-14 og 3-29, beregnet total framdriftsmotstand for et skip med volumdeplasement på ca. 28 000 m^3 og dimensjonert en passende propell. Nå skal vi se nærmere på dette skipets ror. Nødvendige data er satt opp i margen. Gruppen skal beregne sideveis "løftkraft" på roret når dette er svingt 15 grader. Gjennomfør beregningene i følgende rekkefølge:
a) Bruk medstrømsfaktoren w til å beregne propellens framgangshastighet i vannet og generert skyvekraft fra propellen.
b) Bruk ligningen for skyvekraft midt på side 8-6 til å etablere en annengradsligning hvor hastighetsøkingen fra propellen (Δv) er ukjent. Løs ligningen, og bestem tilnærmet hastighet forbi roret (v_{ror}).
c) Løfttall og "løftkraft" for roret
d) Beregn propellens slipp i forhold til stille vann

Oppgave 8.7
a) Beregn kraft mot et skip fra vind med hastighet 18 m/s rett mot skipet. Skipets frontareal er 240 m^2. Bruk vindmotstandstall 0,6 og lufttetthet 1,2 kg/m^3
b) Bruk formel fra side 3-27 til å beregne nødvendig turtall på propellen for at skipet skal holde seg i ro. Nødvendige data for propellen er gitt i margen.
c) Senere øker reguleringssystemet propelltallet med 6 %. Hvor mange prosent har vindens hastighet rett mot skipet da øket med?

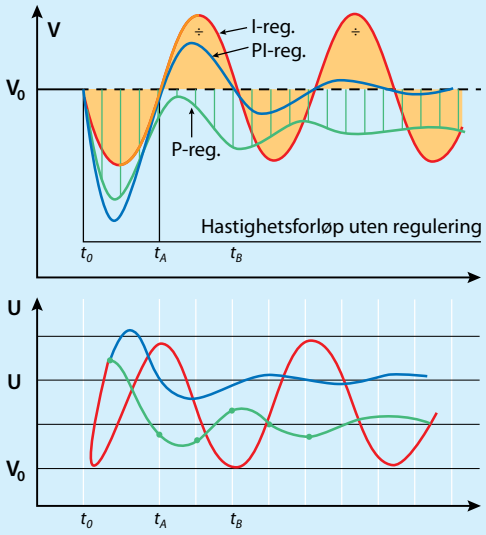
Oppgave 8.8
a) Forklar hva vi mener med tibakekopling i et reguleringssystem
b) Besvar "undringsoppgaven" på side 8-9

Oppgave 8.9
a) Hvorfor kompenseres det bare for saktevarierende bevegelser i et DP-reguleringssystem?
b) Besvar "undringsoppgaven" på side 8-11

Oppgave 8.10
a) Besvar "undringsoppgaven" på side 8-13

Oppgave 8.11
Nederste figur til høyre viser pådragsresponsen fra de P-, I- og PI- regulatorer som skjematisk er omtalt på side 8-14.
a) Det framgår at responsen fra I-regulatoren er mye større når den arbeider alene enn når den inngår i et PI-system. Kan du forklare det?
b) Hva er hovedhensikten med å ha med en I-regulator i systemet?

Data til oppgave 8.6
Hastighet: 20 knop
Rorutslag: a = 15 grader
Totalmotstand (tauingsmotstand):
$R = 1312\ kN$
Skrogvirkningsgrad: 1,0
Erfaringsformel for rorareal:
$A_{ror} = k \cdot L_{pp} \cdot T\ [m^2]$
Vanlige verdier for containerskip:
$k = 1{,}2\text{-}1{,}7\ \%$
Lengde: $L_{pp} = 167\ m$,
Dypgang: $T = 7{,}6\ m$
Areal på ror: $18\ m^2$ $(k=1{,}5)$
Høyde på ror: $s = 6{,}0\ m$
Midl. kordelengde ror: $c_m = 3{,}0\ m$
Medstrømsfaktor: $w = 0{,}20$
Skrogvirkningsgrad settes 1,0
Propelldiameter: $D_p = 6{,}0\ m$
Propellstigning: $S_p = 0{,}75 \cdot Dp$
Propellturtall: $n_p = 150\ o/min$



Referanser

8.1 Asgeir Sørensen: Marine Control Systems. Propulsion and Motion Control of Ships and Ocean Structurens. Lecture notes. Report UK-13-76. Department of Marine Technology, NTNU. Trondheim 2013

8.2 Jens G. Balchen, Trond Andresen, Bjarne Foss: Reguleringsteknikk. Institutt for teknisk kybernetikk, NTNU. 2003

8.3 Klaas van Dockum: Ship Knowledge. A Modern Encyclopedia. Gth Edition, 2010 Dokmar, Enkhuizen, The Netherlands@

8.4 Dr C. B. Barrass: Ship Design and Performance for Masters and Mates. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford. 2004

Forfattere:
Tobias King, Leif Lundby og Vilmar Æsøy

Skip og skipsfart

Havromsteknologi

Innhold

Innledning....2
Glimt fra utviklingen av norsk skipsfart gjennom hundrevis av år
- Forhistorisk tid og vikingtid....4
- Middelalder og "nyere tid"....6
- "Moderne" tider, mellomkrigstid og ny krigstid....8
- Veksttider og marinteknologiske tider....10

Utviklingen siden 1775 belyst med statistikker....12
Verdens transportbehov....14
Skipet – av enorm betydning for verden....16
Skipsfart og maritim virksomhet – av like stor betydning for Norge....19
Korte beskrivelser av skipstyper
- Skip for frakt av flytende last....22
- Skip for frakt av bulklaster....25
- Skip for frakt av stykkgods....26
- Serviceskip for offshorevirksomheten....28
- Skip for frakt av passasjerer og biler....30
- Fartøyer for det norske sjøforsvaret....33

Et skip blir til – hvem gjør hva?....36
Norskbygde service/spesialskip på alle hav....38
Miljøutfordringer i skipsfarten....40
Oppgaver....42
Referanser....44

NTNU
Institutt for marin teknikk

9

Vi har tidligere (se figur side 7-3) påpekt at mesteparten av norsk verdiskaping egentlig skjer på havet. Denne verdiskapingen kommer fra tre hovedvirksomheter:

- ***Skipsfart***
- ***Olje- og gassutvinning***
- ***Fiskeri og havbruk***

Vi starter her i kapittel 9 med å se nærmere på norsk skipsfart og dagens skipstyper. De øvrige hovedvirksomhetene følges opp i etterfølgende kapitler.

I de foregående kapitlene har vi stort sett tatt for oss grunnleggende, disiplinorientert stoff fra fysikken, som statikk og dynamikk (både for faste legemer og væsker), bølgebevegelser, termodynamikk, osv.). I de etterfølgende kapitlene vil vi se nærmere på anvendelsesorientert stoff, det vil si hvordan vi utnytter disse kunnskapene til å bygge opp teknologiske systemer for bestemte formål (transport på havet, olje- og gassutvinng til havs, fangst og oppdrett av fisk).

Virksomhetene på havet er av enorm betydning for det norske samfunnet

De tre nevnte virksomhetsområdene er av største viktighet for det norske samfunnet. Dette gjelder også selv når hvert enkelt område vurderes for seg. Og det gjelder ikke bare for økonomi, sysselsetting og verdiskaping i landet. Betydningen er enda mer omfattende, og er bestemmende for bosettingen langs den lange kysten vår. Vi kan til og med si at norsk levemåte og hele den norske identiteten er påvirket av vår kontakt med havet. Og 75 % av befolkningen bor langs kysten.

Skaper virksomheter også på land. Vi må ikke bare tenke på alle aktivitetene som foregår ute på havet. På fastlandet har det vokst fram en lang rekke virksomheter til støtte for disse. Vi har rederier, oljeselskaper, klasseselskaper, offentlige tilsynsorganer, verftsindustri, leverandørindustri for mekanisk, elektrisk og elektronisk utstyr til skip, plattformer og fiskebåter, maritime konsulentfirmaer, maritime undervisnings- og forskningsvirksomheter, osv. Til sammen danner disse bedriftene det vi ofte kaller en maritim klynge. Slike virksomhetsklynger er ofte mer dynamiske enn øvrige deler av næringslivet og den norske maritime klyngen er blant de mest komplette i hele verden. Vi skal se nærmere på denne klyngen senere i kapitlet.

I verdenstoppen innen marin vitenskap og havromsteknologier. En konsekvens av all den virksomheten som er beskrevet foran, er at Norge etter hvert har fått en lederposisjon når det gjelder teknologisk utvikling knyttet til utnyttelse av havet. Dette skyldes ikke bare det store omfanget av virksomhetene. Utviklingen har hele tiden vært støttet opp av lange historiske tradisjoner. Før vi går over til å se på dagens skipsfart, er det derfor på sin plass å beskrive kort hva norsk skipsfart har betydd i tidligere tider.

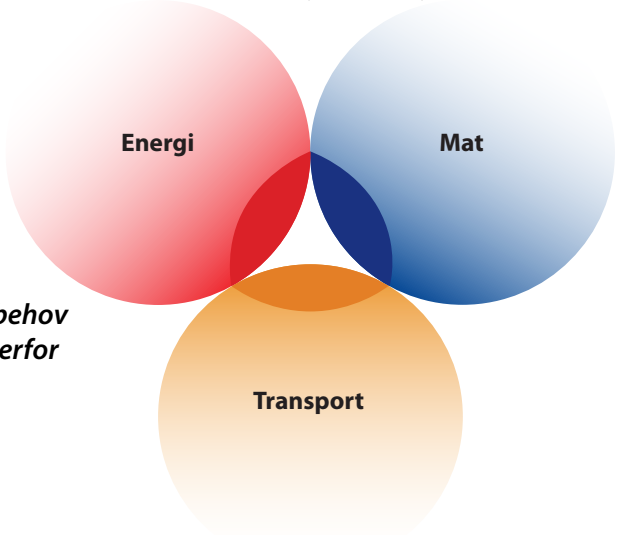
Norske bidrag er av betydning også for resten av verden

I tillegg til å få sikret at det globale klimaet forblir akseptabelt, står jordkloden overfor tre avgjørende problemer hvor norske havromsvirksomheter i betydelig grad kan bidra til løsninger i framtiden. Verden trenger nemlig:

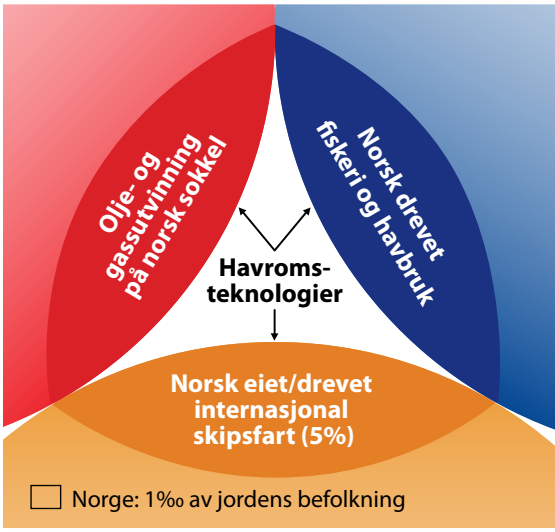
Skip og skipsfart

- energi i stadig økende omfang, (se figur 7-2). Olje- og gassutvinning på norsk kontinentalsokkel er i denne forbindelse av stor betydning og denne vil øke ytterligere etter hvert som teknologier for fangst og lagring av CO_2 utvikles. Dessuten ligger det store reserver av fornybar energi i norske havområder.
- mat til en stadig voksende befolkning. Her kan norsk fiskeri og havbruk bidra i betydelig grad.
- transport av mat og energi. Begge disse ressursene er ujevnt fordelt på jorda, og må transporteres dit hvor behovene eksisterer. Det er bare skipsfart som kan gjøre dette billig og miljøvennlig nok, og norskdrevet, internasjonal skipsfart bidrar betydelig.

Miljøutfordringer. Som nevnt representerer miljøutfordringene et fjerde problem. Også her må Norge kunne bidra i betydelig grad, noe som vil bli dokumentert senere i kapittel 9 og etterfølgende kapitler.



Tre fundamentale behov som verden står overfor



Skjematisk illustrasjon av norske bidrag til dekning av fundamentale behov i verden. Disse bidragene kommer fra havromsteknologier. *Når det eksempelvis gjelder transportbehovet, utgjør det norske bidraget ca. 5 % (se side 13).Dette er 50 ganger større enn hva Norges folketall på 1‰ skulle tilsi.*

MÅL

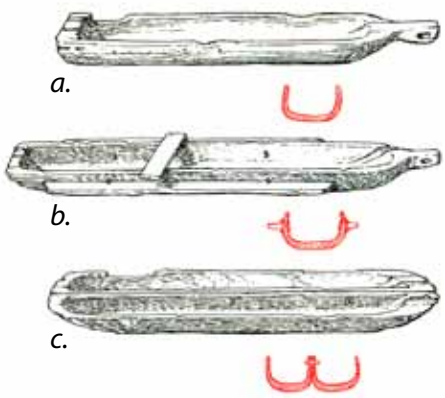
Etter å ha studert dette kapitlet skal du:

- ha fått et innblikk i de viktigste historiske trekk fra norsk skipsfart gjennom tidene
- ha fått oversikt over de vanligste typer av skip, hva som karakteriserer disse og hvilke skipsfartsmarkeder de betjener
- ha fått oversikt over de største miljøutfordringer skipsfarten står overfor i framtiden og klasseselskapenes innsats for miljø og sikkerhet
- kunne beregne brenselsforbruk og utslipp av CO_2 for et skip i fart
- kjenne til hva vi mener med en maritime virksomhetsklynge og de viktigste aktører i en slik klynge

Bruk Internett

Se innledningen på forrige side. Her nevnes at 75% av den norske befolkningen bor langs kysten. Apropos denne opplysningen: Hvilken idrettsgren tror dere har gitt Norge flest sommerolympiske gullmedaljer gjennom tidene? Bekreft eller avkreft gjetningen ved bruk av Internett.

Glimt fra en kontinuerlig utvikling av norsk skipsfart gjennom hundrevis av år



Stokkbåter fra steinalderen. Stabilitet var viktig allerede den gang. *Fra [9.2]*
a) De første stokkbåtene ble uthulet av trestammer. Stabiliteten ble dårlig, men kunne forbedres:
b) Ved bruk av "utriggere"
c) Ved bruk av to skrog; "Katamaraner" eksisterte altså allerede i steinalderen.

Skinnbåt
Steinalderens skinnbåter kan ha sett ut omtrent som denne grønnlandske umiaken. De kan også ha hatt en meie på undersiden, for å kunne trekkes opp på land uten at skinnet ble skadet. Fra [9.2].

Helleristning fra bronsealderen
Både stokkbåter og skinnbåter fikk etter hvert større dimensjoner, med plass til både flere padlere og større last. Her ser vi en stokkbåt eller skinnbåt med et mannskap på åtte, som hever padleårene i været. Kanskje har de nettopp vunnet en "regatta"? Fra [4].

Forhistorisk tid (ca. 10 000 f. Kr.—ca. 700 e.Kr.)

Et maritimt samfunn vokste fram langs en unik kyst, utrolig lang og med en skjærgård av utallige øyer. Hvis den "strekkes ut", er den like lang som halvparten av ekvator. Skjærgården skjermer farvannene innenfor, slik at disse gir rike muligheter for fiske og fangst av sjøpattedyr, samt utvikling og bruk av båter og redskap. Landet får navn etter kysten, Nordvegr, som betyr veien mot nord. Nabolandene oppkalles derimot etter folkene som bor der. *Vi skjønner at kysten, sjøen, og dermed også båten, alltid har betydd noe spesielt for Norge. Sjøen og båten bandt de lokale samfunnene langs kysten sammen og muliggjorde kontakt med andre samfunn.*

Jegere lokkes til kysten. De første spor etter mennesker finner vi fra ca. 9500 f.Kr. i Finnmark og fra ca. 9000 f.Kr. i Rogaland. Det var trolig vandrejegere som fant som fant kysten beskrevet ovenfor nærmest ideell for bosetting. Dermed ble også fiske etter hvert en like viktig del av livsgrunnlaget som jakt. Det var først i yngre steinalder (ca. 4000—1500 f.Kr.) at jordbruk og fedrift ble tatt opp sør i landet. De første menneskene kan ha kommet både vestfra, sørfra og østfra. Nordsjøen var den gang tørt land, skilt fra Norge av Norskerenna. Denne måtte derfor krysses med båter om sommeren (eller på isen om vinteren). Båtene kan ha vært skinnbåter eller stokkbåter.

De første båtene. De barske værforholdene langs kysten medførte at flåter ikke var så godt egnet til fiske og fangst som båter. Båten ble derfor sentral i de bosetningene som vokste fram. Den kunne lages enten ved uthuling av trestammer eller skinnkledning på et skjelett med spanter. Det er delte meninger om det var slike stokkbåter eller skinnbåter som kom først. Kanskje var begge typene i bruk parallelt inntil utviklingen gjorde det mulig å erstatte skinnkledningen med plankekledning.

Bronsealderen ga stor øking i sjøfarten. Produkter laget av det nye materialet, bronsen, ble svært ettertraktet. Disse måtte handles i andre land. Sjøfart med frakt av varer til og fra Norge økte kraftig. Først og fremst ble tørket skrei og pelsvarer byttet mot ferdige bronseprodukter, som våpen, redskap og smykker. Bronsealderen omfatter perioden 1500 f.Kr.—500 f.Kr. og ble avløst av jernalderen.

Med jernet kom nye, store framskritt. Jernalderen defineres til også å omfatte vikingtiden men vi ser først på perioden før vikingtiden (ca. 500 f.Kr.—ca. 700 e.Kr). Nordmennene lærte seg tidlig å framstille jern selv. De ble også flinke til å utnytte dette nye materialet. For eksempel gjorde klinknagler av jern og forbedret verktøy det mulig å bygge større fartøyer. Disse ble nå utført med spanter, som ble "kledd" med planker, lagt delvis over hverandre og klinket sammen i overlappingen. Båtene ble rodd. Nå ble også roret tatt i bruk, i form av en bred åre som alltid var festet på høyre side.

Vikingtid (ca. 700—ca. 1050)

Etter ca. 700 skjedde det store og dramatiske forandringer i det samfunnet som er skissert foran. Befolkningen økte og nye gårder ble ryddet. Jernalderen varte egentlig gjennom hele vikingtiden og betydningen av jernet som materiale ble forsterket gjennom hele perioden. Nordmennene ble flinke både til å framstille og bearbeide jernet, særlig når dette ble utnyttet til våpen og redskaper. Vi kan faktisk snakke om en teknologisk revolusjon på mange områder i denne tiden. Det var tilfelle også for båtbyggingen, som resulterte i utviklingen av vikingskip og ekspansjon av skipsfarten. *Vikingtiden fullførte på en måte Norvegrs etablering som et "ekte" maritimt samfunn i Europa og gjorde landet til en stor sjøfartsnasjon.*

Vikingskipene var suverene i sin tid. Etter hvert økte båtene i størrelse, samtidig som de ble utført med mast. Dermed kunne de både seiles og ros, selv om effektiviteten på seilene nok var dårlig. Teknikken med klinkbygging ble forbedret og ga både sterkere og tettere konstruksjoner. Mulighetene for utprøving av de nye konstruksjonene var glimrende i en rekke lokalsamfunn langs den unike, norske kysten. Samtidig var det god kommunikasjon med andre land. Den nye skipsbyggingsteknologien og stadig økende kunnskap om skipsfart, gjorde etter hvert Norge til en stormakt på sjøen. De første vikingskipene var lange, smale og relativt lave. De var datidens raskeste skip, lette å manøvrere og dermed overlegne som krigsskip. I samtiden ble de kalt langskip eller draker. Det mest kjente langskipet omtalt i Snorres kongesagaer er nok "Ormen Lange".

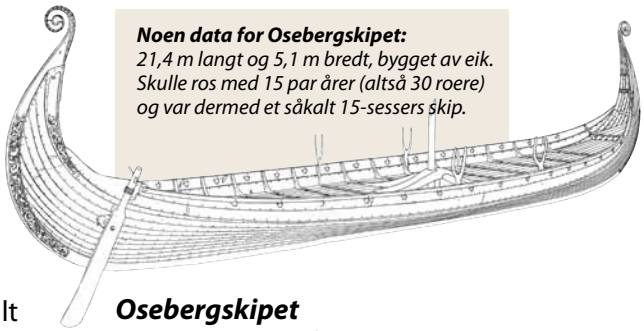
Økt handel viktigste resultat av vikingtoktene. De raske langskipene ble nærmest ideelle for plyndringstokter til England og Nord-Frankrike. Men enda viktigere var det at toktene med tiden ble mer preget av handelssamkvem. De resulterte også i en ikke ubetydelig utflytting av nordmenn, som følte at de maritime lokalsamfunnene hjemme var i ferd med å bli overbefolket. Alt dette krevde en litt annen type skip, som var bredere og høyere enn langskipene. Mot slutten av vikingtiden ble det derfor utviklet en variant av vikingskipene som ble kalt knarrer (se figur neste side).

Fisk og fiskevarer alltid viktige handelsvarer for Norge. Handelsvirksomheten baserte seg i hovedsak på tørrfisk fra Lofoten. Det må derfor samtidig ha vært betydelig båtfart langs norskekysten i denne tiden. I tillegg til England og Nord-Frankrike ble også Island etter hvert et viktig marked.

Undringsoppgave:

Hvor lang var "Ormen Lange" omtrent? Osebergskipet viser at hver roer hadde 90 cm til disposisjon i lengderetningen. Beregn lengden av roernes "seksjon" og legg til 40 % totalt for å ta hensyn til skipskonstruksjonen forut og akterut.

Kvalsund-båten fra 600/ 700 -tallet (modell).
Denne elegante båten funnet på Sunnmøre viser at det allerede før vikingtiden var mulig å ferdes relativt trygt langs kysten vår, og kanskje også over åpne havstrekninger. Båten var 18 m lang og ble rodd med ti par årer. Den kunne delvis seiles, men var uten mast. Vi ser av tverrsnittet ovenfor at den nå hadde fått en liten kjøl. Kvalsundbåten var en slags forløper for vikingsskipene.

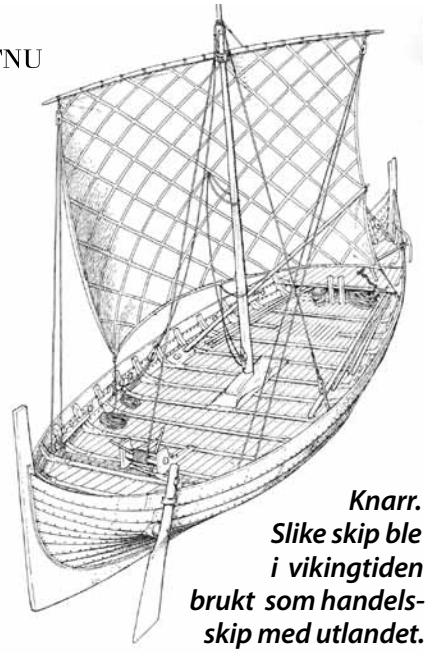


Noen data for Osebergskipet:
21,4 m langt og 5,1 m bredt, bygget av eik. Skulle ros med 15 par årer (altså 30 roere) og var dermed et såkalt 15-sessers skip.

Osebergskipet
Skipet ble gravd fram i 1904 nær Tønsberg. Det ble trolig bygget på 1000-tallet. Med sine 15 sesser var dette egentlig et lite skip, nærmest en lystjakt for ferder langs kysten.

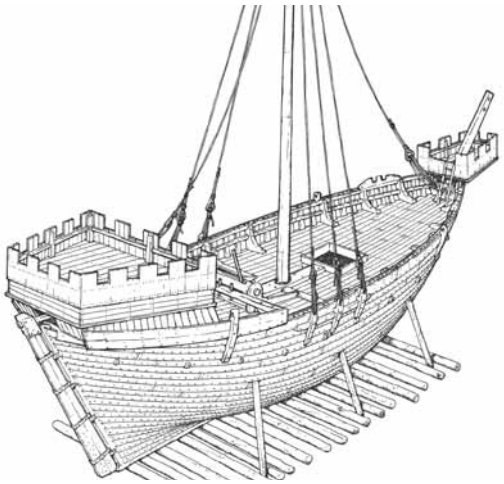
Snorre: "Det var 34 rom på Ormen Lange. Hodet og kroken var helt forgylte; og det var like høyt til relingen som et havskip. Det er det beste skip som har vært bygd i Norge og det som har kostet mest".

Ormen Lange, den berømte draken til Olav Tryggvason
Krigsskipene (langskipene) var store, som oftest på 20 sesser, men det fantes også skip på både 25 og 30 sesser. "Ormen Lange" var på 34 sesser. Fra Snorre, [9.9].



Knarr. Slike skip ble i vikingtiden brukt som handelsskip med utlandet. De fortsatte som frakteskip langs kysten i middelalderen. *Fra [9.2]*

En knarr var mindre, men bredere og mer høybordet enn et langskip, men ellers bygget på samme måte (klinkbygget kjølskip). Etter hvert ble sideror byttet ut med stavnror.



Kogge. Utover på 1200-tallet ble koggene den dominerende typen havgående handelsskip. *Fra [9.2]*

Koggene var flatbunnet, brede og kunne ta stor last. De var lette å seile, bl.a. fordi roret relativt tidlig ble utformet som stavnror. Utover på 1400-tallet ble skipene etter hvert rigget opp med flere master og flere seil på hver mast. Klinkbyggingen ble erstattet med såkalt kravellbygging, hvor planker ble spikret eller boltet direkte på et solid spantskjelett, laget på forhånd. Ved klinkbygging ble spantene lagt inn etter at skallet var bygget opp. Skrogene ble nå mye mer solide og skipsstørrelsene kunne økes.

Middelalder (ca. 1050—ca. 1500)

Utviklingen i vikingtiden hadde gjort Norge til en stormakt på sjøen og hadde vært så gjennomgripende for hele samfunnet at landet befestet sin storhetstid gjennom ytterligere 250 år, fram til ca. 1300. Handel og sjøfart økte så kraftig at historikere har kalt det en "handelsrevolusjon". Dette betydde mye for byene, særlig for Bergen. Byens meget strategiske beliggenhet gjorde den etter hvert til et handelssenter og Nordens største sjøfartsby.

Men så ble landet rammet av to ulykker: Svartedauen avfolket samfunnet (1349) og tyske hanseater utnyttet raskt "tomrommet" til å ta kontroll over norsk handel og utenriksfart, basert på bruk av egne skip. Begge deler ødela for bygging av norske, havgående handelsskip. Likevel overlevde Norge som maritim nasjon i denne epoken, takket være kystfarten. Denne gikk hele tiden "på norsk kjøl" med fiskevarer til Bergen. Herfra ble de sendt videre med hanseatenes egne skip til utlandet.

Arven fra vikingtiden ga videre framgang. Etter vikingtiden satt Norge med en stor flåte av krigsskip (langskip) og en hær som var klar til å bemanne disse ved behov. Nordmennene bygget etter hvert også opp en flåte av handelsskip, basert på knarrer og kogger. Handelsskipene var tyngre og bredere, kunne ta mer last og var bedre egnet til seiling enn krigsskipene.

Sterke konger innså betydningen av sjøfart og handel og skaffet landet herredømme over stadig nye områder i og rundt Nordsjøen. Norgesveldet nådde sin største utstrekning under kong Håkon IV Håkonsson i 1260-årene. Hjemme vokste både folketall, kjøpmannsstand og bybefolkning. Mange ville gjerne fare i skipsferd. Dette ble etter hvert så populært at det på 1200-tallet måtte innføres en lov som nektet deler av befolkningen å reise ut. Loven skulle sikre landet nok arbeidskraft.

Nedgangstider mot slutten av 1200-tallet. Det var flere årsaker til disse: Norge ble trukket inn i nordisk-tysk maktspill, politikk og økonomi begynte å spille større rolle og tyske kjøpmenn vant innpass. Verken kongemakt eller kirke i Norge var våkne nok. Svartedauen ble en katastrofe og nesten enda verre ble det at hanseatene klarte å skaffe seg monopol på all import til Norge av korn og salt, samtidig som de fikk lov til å føre norske varer i retur.

Norsk skipsbygging ble lagt i ruiner. Hanseatene brukte sine egne skip (kogger) og behovet for de norske havgående handelsskipene forsvant nesten fullstendig. Dessuten hadde svartedauen tappet landet for både arbeidskraft og teknologisk kompetanse. Begge deler førte til at bygging av norske, havgående skip praktisk talt døde ut, selv om disse egentlig var like gode som hansakoggene rent skipsteknologisk sett. Heller ikke var hanseatene flinkere til å drive sjøfart.

Det maritime Norge reddes av fiskerier og kystfart. Fiskevarer ble mer og mer etterspurt i utlandet og fiskeriene vokste i omfang. Fiskeværene ble i senmiddel-alderen en stadig viktigere del av bosettingen i landet. Dette bidro til at Norge beholdt kontrollen over kystfarten ned til Bergen, hvor det ble foretatt omlastning til hansakoggene. I kystfarten ble det hovedsakelig brukt mindre, klinkbygde, norske båter. Disse var stort sett knarrer, med mindre modifikasjoner. Ved overgangen til 1500-tallet kom jekter (se figur neste side), og såkalte jakter.

Nyere tid [1] (ca. 1500—1814)

På 1500-tallet økte befolkning og byer kraftig i Europa, noe som sammen med innføring av pengehusholdning, ga kraftig oppsving i handel og vareetterspørsel. Også i Norge vokste folketallet. Samtidig oppsto det en "ny" næringsvei i Norge: sagbruksdrift ved hjelp av vannsag. Behovet for trelastvarer var stort ute i Europa, særlig i Nederland. Da hanseatene etter hvert mistet sitt herredømme over norsk utenrikshandel, kom norsk handel og skipsfart seg på 1500-tallet langsomt opp av bølgedalen fra senmiddelalderen. Men fortsatt gikk unødvendig mye på fremmed kjøl.

På 1600-tallet overtok nederlendere, som hadde blitt en stormakt til havs, mye av den posisjonen som hanseatene tidligere hadde hatt. Det var stadig kriger mellom de europeiske stormaktene, men norske redere var flinke til å unytte behovet for nøytral skipstonnasje som oppsto i krigstidene. Dette ga ekspansjon for norsk skipsfart, selv om tap pga. kapringer også kunne være store. Særlig var perioden fra 1680—1700 så positiv at den har blitt kalt den første storhetstid for norsk skipsfart. Den kan også kalles for den "første gullalderen".

Også på 1700-tallet opplevdes en lignende storhetstid under de stadige kriger mellom Frankrike og England som oppsto etter 1778 ("gull-alder nr. 2"). Men dette varte bare så lenge Danmark/Norge kunne holde seg nøytrale (se nederste avsnitt).

Jekt. *Jekt på vei til Bergen med fisk og trelast. Skipstypen oppsto omkring 1500. Den holdt seg nesten uforandret i mer enn 300 år og dominerte i denne tiden kysttrafikken. Jektene ble klinkbygd og var uten dekk.*
De førte bare ett stort råseil.
På 1700-tallet fikk jektene konkurranse fra såkalte jakter. Disse var mindre, men hadde dekk og førte både stagseil og gaffelseil. Fra [9.1]

Fløyte. *Norskbygget, havgående handelsskip fra begynnelsen av 1800-tallet. Skipstypen ble utviklet på 1600-tallet. Nordiske fløyter ble mye brukt til transport av tømmer. De hadde lasteporter både forut og akterut. Seilføringen var relativt enkel og krevde lite mannskap. Fra [9.1]*

Fiskeriene stadig av stor betydning. En nær umettelig etterspørsel etter norsk tørrfisk ute i Europa ga en vedvarende sysselsetting i fiskerinæringen som fikk stor betydning for landet. Fiskeriene ble stort sett drevet med åpne båter med mannskaper på fire-seks mann. Sildefisket fikk en kraftig oppgang på 1500-tallet.

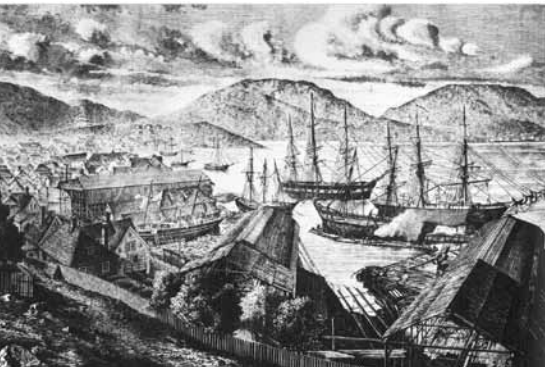
Skipsutvikling og skipsbygging. Alle vesentlige forutsetninger for bruk av seil ble egentlig utviklet allerede i middelalderen. Det siktes da til overgangen til stavnror og flere master med flere seil på hver mast. Videre kom flere dekk, kanoner om bord, osv. Utviklingen i de følgende tre hundre årene gikk derfor mest i retning av stadig økte skipsstørrelser og mer avansert seilføring. Et vrimmel av nye fartøytyper så dagens lys, for eksempel pinass, fløyte, katt, galiot, pinke og kreiert. Også orlogsskip (krigsskip) ble det mange typer av. I Norge ble det særlig bygget fregatter. Et svensk krigsskip er vist på side 2-2. Generelt hadde norsk skipsbygging en god periode på 1700-tallet. I 1777 var hele 85% av tonnasjen norskbygget, særlig fra verft i Bergen og på Sørlandet.

Framstilling av utstyr til skipene var også betydningsfull sysselsetting for landet. Spesielt gjaldt dette utstyr som var nødvendig om bord for at skipene kunne opereres som forutsatt, for eksempel tauverk, seil, pumper, anker, kanoner, inventar, osv.

1807-14, med krig mellom England og Frankrike, var en av de verste perioder som nordmenn har opplevd. Danmark/Norge valgte da å alliere seg med Napoleon, og fikk Englands mektige flåte mot seg. Den norske utenriksflåten led enorme tap og utenrikshandelen stoppet helt opp. Den engelske flåten ødela til og med norsk kystfart og innenrikshandel. Det norske folket opplevde meget vanskelige tider. Ved freden i 1814 måtte Danmark avstå Norge, som gikk i union med Sverige.

1) Historikere kaller gjerne tiden etter middelalderen for nyere tid

Bark Pallas av Tvedetrand, bygget i 1881 på skipsverft utenfor byen. *Fra [9.5].*
For norske treseilskip var 1870-årene den aller beste delen av en ny gullalder. Både skipsbyggingen og lønnsomheten var da på topp. I denne tiden var barkene de viktigste handelsfartøyene i de nordiske handelsflåtene. På 1880-tallet ble konjunkturene dårligere og konkurransen fra dampskipene meldte seg for alvor. Katastrofene kom i 1890-årene med en lang rekke konkurser. Seilskipsepoken døde deretter ut etter en eventyrlig periode på 50 år.



Dekkes skipsverft i Bergen i 1866. *Fra [9.1].*
Dekke var en foregangsmann både som skipskonstruktør og som skipsbygger. Den første norske klipperen ble konstruert og bygget her. Også dampskip ble bygget. Alle de største verftene i Norge ble etter hvert drevet av skipskonstruktører med utdanning, for eksempel fra et orlogsverft i Norge eller utlandet. Illustrasjonen studeres best ved å forstørre opp interessante utsnitt.

Mot moderne tider (1814-1918)

Den industrielle revolusjon ga sterk øking i vareproduksjonen i verden. Sammen med befolkningsøking førte dette til at transportbehovene vokste. Disse behovene kunne bare dekkes ved hjelp av sjøtransport. Fra 1850 ble det dessuten mye friere konkurranse på havene. Norske redere utnyttet raskt de muligheter som bydde seg, som så mange ganger før. Dette ga norske, "hvite" seil enda en gullalder i 1850-85 (nr. 3). Nå dreide det seg ikke lenger bare om seiling til og fra Norge, men også mellom andre land. Norsk skipsfart ble for alvor internasjonal.

Konjunkturene skifter fort i skipsfarten. Mot slutten av århundret opplevde norsk skipsfart sterke nedgangstider, med mange konkursbegjærte rederier og dårlig vedlikehold av seilskipene. Særlig gjaldt dette rederiene langs Sørlandskysten, som ikke hadde satset tidlig nok på overgang fra seilskip med treskrog til skip med stålskrog og dampmaskiner. Rederier i Oslo og Bergen hadde derimot vært mer våkne. De kom seg helskinnet gjennom krisetiden og bidro til en jevn oppbygging av en dampskipsflåte i den første delen av 1900-tallet. En god del av disse ble bygget ved norske verft.

Under verdenskrigen 1914-18 seilte den norske utenriksflåten inn enorme fraktinntekter, men resultatet var inflasjon og spekulasjon i landet. Flåten led også store tap av både sjøfolk og skip (se illustrasjon på side 9-12/13).

Seilskipenes glansperiode. Konkurransen fra dampskipene ga behov for raskere seilskip. Dette førte til at disse ble utført med skarpe bauger, samt slanke og lave skrog. Samtidig ble kunnskaper om seilføring, vindforhold og havstrømmer viktigere. Brigg, bark, fullrigger og klipper så dagens lys, bare for å ha nevnt noen nye skipstyper. Klipperen var kanskje den mest elegante av alle. Den var også den raskeste (se oppgave 9.1). Samtidig var det viktig å seile billig. En av grunnene til at norsk skipsfart ekspanderte utover på 1800-tallet, var at hyrer og andre driftskostnader var forbausende lave sammenlignet med konkurrentenes.

Bergen, et senter for avansert norsk skipskonstruksjon og bygging. Nordmennene klarte også å bygge skipene billigere enn andre. Særlig hadde Bergen en rekke kjente skipskonstruktører. I motsetning til tidligere ble skipene nå bygget etter tekniske tegninger, samtidig som konstruktørene hadde fått en viss utdanning fra USA og orlogsverft i Sverige og Horten. Den mest berømte skipskonstruktøren på denne tiden var nok Annanias Dekke., som arbeidet i Bergen fra 1850 og utover. Ved et lokalt verft fikk han der konstruert og bygget den første norske klipperen, fullriggeren Hebe. En annen kjent skipskonstruktør fra denne tiden var Colin Archer (se side 2-5).

Sterk eksportøking av klippfisk, tørrfisk og saltsild på 1800-tallet. Fiskeriene foregikk fortsatt i stor grad med åpne båter som ble rodd, men båter med dekk begynte å komme fra midten av århundret. Mot slutten av perioden begynte båtene dessuten å bli motoriserte med små semidieselmotorer og dieselmotorer.

Mellomkrigstid og ny krigstid (1918-45)

Etter noen vanskelige år etter verdenskrigen 1914-18 satset framsynte, norske redere på tankskip for frakt av råolje og andre spesialskip. Nesten alle skipene var motorskip, det vil si at de ble utstyrt med dieselmotorer. Resten av verden "sverget til" dampmaskineri, enten i form av stempeldampmaskiner eller de mer økonomiske dampturbinene (se side 7-10/11) som ble utviklet utover på 1900-tallet. *Dieselmotorene var imidlertid enda mer økonomiske i drift. De norske rederne, som baserte seg på skip med dieselmotorer allerede på 1930-tallet, tjente stort på dette og opplevde nok en gullalder (nr. 4) i årene før 2. verdenskrigen (se illustrasjon side 9-12). Den verdenskjente engelske storavisen "The Times" kalte, i et stort oppslag i 1938, den norske utenriksflåten for "Norges flytende imperium", altså en verdensmakt på havet.*

Ved siden av denne kloke satsingen på moderne motorskip og tankfart, karakteriseres mellomkrigstiden av at norske redere også utviklet linjefart, altså faste ruteopplegg, til alle viktige europeiske og oversjøiske markeder.

Under verdenskrigen 1939-45 ble 1028 norske handelsskip satt inn på de alliertes side, drevet av organisasjonen Nortraship. De gikk særlig med olje fra USA til England. Både tap av sjøfolk og skip var meget store (se illustrasjon på side 9-12).

Også fiskeflåten gjennomgikk en stor, teknologisk utvikling, blant annet med overgang til dieselmotordrift. Norge var dessuten en stor aktør i hvalfangsten i Antarktis, men dessverre på bekostning av overbeskatning av blåhvalen.

Dronning Maud (1925). Hurtigruteskip bygget ved Fredrikstad Mek.Verksted

Belpareil (1926). Tungløfteskip f.eks. for frakt av lokomotiver mellom utelandske markeder

Stella Polaris (1927). Helårs cruiseskip

Venus (1931). I sin tid verdens hurtigste motorskip

Black Prince (1938). Norsk skipsbyggings stolthet før krigen

Noen kjente norske skip fra mellomkrigstiden. *Fra [6]*

Nordiske land først ute med bruk av dieselmotorer til skipsdrift. For drift av norske skip passerte dieselmotoren dampmotoren allerede i 1935. Dette skyldtes ikke bare at brenselsforbruket var vesentlig lavere (se side 7-11), men også at dieselmotoranlegg tok betydelig mindre plass og var mindre arbeidskrevende enn dampmotoranlegg. Historiens første skip med dieselmotor kom i 1912. Det var skipet "Selandia" som ble utstyrt med to firetakts diesemotorer, hver med 660 kW. Både skip og motor var bygget av Burmeister & Wain i København. I Sverige var Gøtaverken et tilsvarende viktig verft, også med egen motorproduksjon. Skipsmotorer ble relativt tidlig bygget også i Norge, her på lisens ved Aker mekaniske verksted, som generelt ble et sentralt verft for bygging av tankskip i Norge.

Sveiste stålskrog i stedet for klinkede. Da man gradvis gikk over fra treskrog til stål mot slutten av 1800-tallet, kom først de såkalte komposittskipene. Disse hadde hud av tre på spanter av stål. Cutty Sark, som vel er det mest berømte eksempel på en klipper, ble bygd på denne måten allerede i 1869. Senere kom så skrog som i sin helhet var bygd av jern, og fra 1890-årene av stål. Skrogplatene ble da klinket sammen, men i mellomkrigstiden kom etter hvert helsveiste skrog. De norske verftene hadde lenge store problemer med overgangen fra tre til stål, men ble i 1930-årene et slags foregangsland på sveiseteknologi i skipsbyggingen. Andelen av nye skip som ble bygd ved norske verft i mellomkrigstiden var ikke så stor som den kunne vært. Skipsstørrelsene hadde økt betydelig og verftene hadde ikke store nok beddinger.

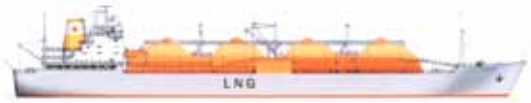
Undringsoppgave:

Hva er den mest karakteristiske forskjellen mellom et dampskip og et motorskip sett utenfra?
Er noen av skipene ovenfor et dampskip?

Bergensfjord (1956). Et av de berømte passasjer-skipene på Amerikalinjen

Sunward(1966). Et av de første norske cruiseskip i Karibien

Venator (1973). Skip for frakt av flytende naturgass



Noen kjente norske skip fra vekst-perioden etter siste verdenskrig.
Fra [9.6].

Containerskipet Toyama, 1972.
I sin tid det største og hurtigste skip i den norske handelsflåten, toppfart 30 knop, 2600 containere.

Veksttider (1945-74)

Gjenoppbyggingen av handelsflåten etter krigen tok bare noen få år. Nortraship bidro med økonomisk overskudd fra krigstiden, det var god tilgang på billig overskuddstonnasje og det ble også investert betydelig i nye skip.

Industrilandene opplevde i de neste 25 år en økonomisk vekst uten sidestykke i historien og behovet for skipstonnasje steg enormt. Den norske handelsflåte var hele tiden "på hugget".
I 1965 hadde den kommet opp på den største andel av verdensflåten noen gang, over 10 %. Særlig fikk tankskipsflåten gode tider. Spesielt økte fraktratene for olje enormt under krigen i Midt-Østen i 1967. Suez-kanalen ble stengt og tankskip som forsynte Europa med olje måtte ta veien rundt Sør-Afrika.
Vi kan si at norsk utenriks skipsfart opplevde enda en "gullalder" (nr. 5) i perioden 1955-74, og denne slo alle tidligere rekorder. Dette skjønner vi blant annet av grafene på side 9-12/13.

1960-årene kjennetegnes for øvrig av en teknologisk revolusjon innen skipsbygging og skipsfart. Særlig økte skipsstørrelsene betraktelig, og aller mest for tankskip. Dette var tilfelle også for skip som ble bygget i Norge. Den første norskbygde 100 000-tonneren kom i 1965. Effektivisering av lasthåndtering og automatisering av maskinrommene er andre viktige stikkord fra denne perioden.
Det norske Veritas betydde mye for denne utviklingen.

Frakt av gass. Det var tankskipene for frakt av råolje som ble ryggraden i den norske flåten. Verdens stadig økende energibehov medførte imidlertid stor etterspørsel også etter gass, både propan og metan (se side 7-26). Norske ingeniører var tidlig ute med utvikling av skip som kunne frakte slike gasser i flytende form, såkalte LPG- og LNG-skip. Disse skipene var teknisk sett meget avanserte (krevde bl.a. nedkjøling til -162 °C). Moss/Rosenberg i Kværner-gruppen bygde slike skip med kapasitet på 100 000 m^3 i slutten av 1960-årene, noe som ble et kvalitetsstempel for norsk skipsbygging.

Gjennombrudd for containerskip og Ro-Ro-skip. Slike skip er nærmere beskrevet på sidene 9-26/27. Disse nye laste/losse-prinsippene betydde en betydeligeffektivisering av godshåndteringen i havnene. Samtidig holdt skipene stor fart (se bildetekst til containerskipet Toyama). Norge samarbeidet med andre nordiske land, som var tidlig ute med å ta i bruk disse metodene.

Biltransportskip. Norske redere var tidlig ute med "rene" biltransportskip. Det første kom i 1964.

Cruiseskip. Cruisefarten er kanskje det beste eksempelet på den enestående konkurranseevnen norsk skipsfart har hatt gjennom årene, og som vi fortsatt har. Norge ble etter hvert verdensledende, se sidene 9-30/31.

Marinteknologiske tider (1974 - 2010)

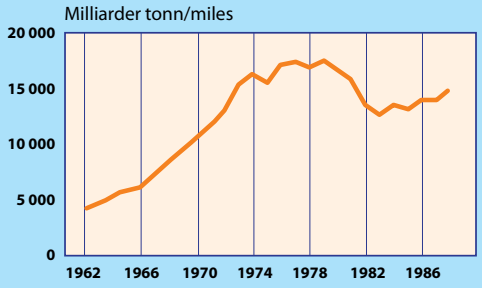
I årene1974-75 stagnerte verdensøkonomien, samtidig som bygging av tidligere bestilte, store tankskip likevel fortsatte. Dette resul-terte i at den nevnte gullalderen ble avløst av det som ofte kalles "skipsfartskrisen 1974—87", med katastrofale nedgangstider for norsk skipsfart. Noen har sogar karakterisert krisen som en nær døden-opplevelse.

Men også denne krisen overlevdes. De maritime næringene i Norge hadde i tidens løp blitt solide og robuste. Dessuten kunne mye teknologisk virksomhet flyttes over til landets nyeste næring, olje- og gassutvinningen i Nordsjøen. Skipsfarten på sin side gikk for halv maskin. Også myndighetene hjalp til, med næringspolitiske virkemidler. Fra 1988 gikk det oppover igjen, men med nye konjunktursvingninger rundt tusenårsskiftet (bl.a. Asiakrisen). Utviklingen for norsk skipsfart i denne tiden kan beskrives på to måter: Stor satsing på avanserte spesialskip, og sterk fokus på kvalitet i alle ledd i verdikjeden. Den samme beskrivelsen kan i grunnen brukes også for dagens status, men vi bør da legge til at miljøspørsmål stadig har blitt av voksende betydning innenfor kvalitetsbegrepet, samt at offshoreflåten har blitt superviktig!

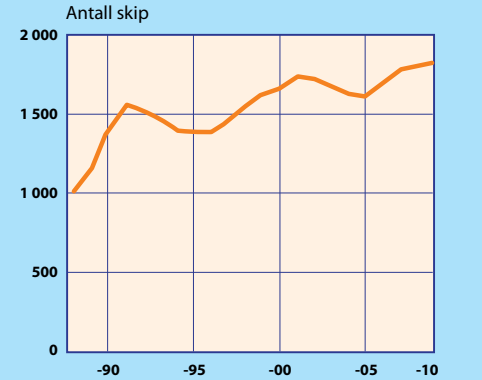
Nye maritime næringer gir "flere bein å stå på". En historisk oversikt over olje- og gassutvinningen er gitt på side 10-2/3. For øvrig kom enda ny næring til i løpet av den perioden vi nå ser på, nemlig havbruk. Dette vil altså si oppdrett av fisk i lukkede merder. Igjen er det den unike, norske kysten som skaper grunnlaget, med utallige muligheter for å finne gode plasseringer av merder. Foreløpig er kun laks og ørret egnet for denne typen oppdrett, som begynte i 1971 (se side 12-8/9). I tillegg til skipsfarten medførte all denne virksomheten og verdiskapingen på havet en enorm bredde, som gir grunnlag for den litt uvanlige betegnelsen "marinteknologiske tider" på denne siste epoken.

Fiskeriene har forandret karakter. Nye behov for nærsjøtransport. I de foregående oversiktene har vi pekt på at kysttrafikk og fiskerier i lange perioder har vært viktige deler av de maritime virksomhetene i Norge. Også her har det selvsagt skjedd store forandringer, både når det gjelder båt- og redskapsteknologi. Dette kommer vi nærmere tilbake til i kapittel 12, men meget kort kan utviklingen beskrives som overgang fra kystfiske til havfiske og fra sesongfiske til helårsfiske. Mye av den gamle sjøveisfrakten med fiskeprodukter er etter hvert blitt overtatt av landeveistransport.

Høyteknologiske tider (2010-)
Som nevnt ovenfor, har utviklingen for norsk skipsfart blitt mer og mer teknologisk preget, samtidig som det er blitt satset stort på kvalitet og miljøbevissthet i alle sammenhenger. Denne utvikingen har i stor grad vært drevet fram av behov også i olje- og gassnæringen, og har vært så sterk at verdiskapingen i den tradisjonelle utenriksflåten ("handelsflåten") i dag er forbigått av serviceflåten for offshore-virksomheten. Også denne flåten etterspørres på de "syv hav", samtidig som den skal løse nye store og krevende nye oppgaver på norske hav. Du kan se mer om dette på side 9-21 og 9-38/39. *Norsk skipsfart har nå gått inn i en ny æra, "gullalder nr 6".*



Verdens sjøgående handel 1962-88, målt i 10^9 tonn · miles.
Fra [9.1].



Antall skip i norskeid utenriksflåte.
Fra [9.8].

Undringsoppgave:

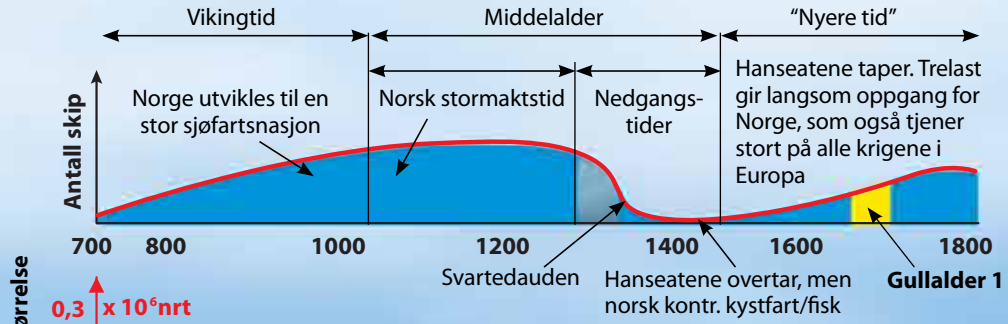
Hvor stor var gjennomsnittlig størrelse på et skip i den norske utenriksflåte i 2009?
Kan finnes ved å kombinere grafen ovenfor med den øverste grafen på side 8-13.

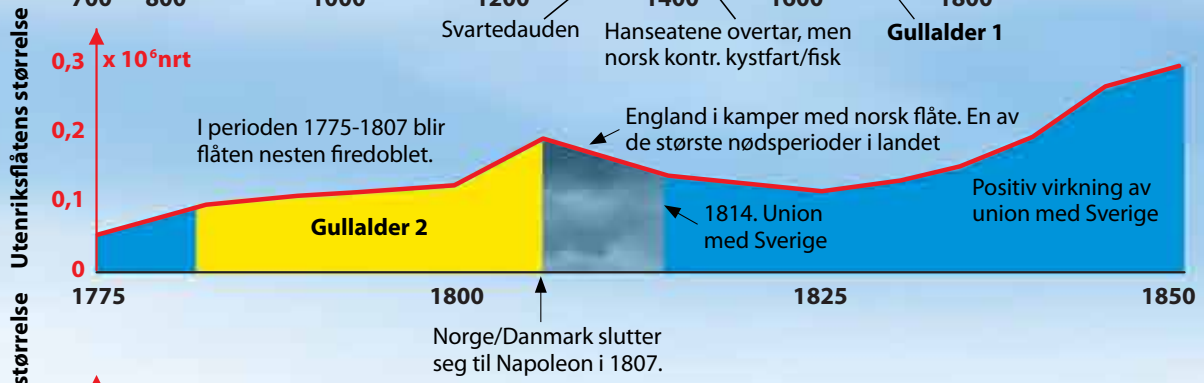
Utviklingen av Norges utenriksflåte/handelsflåte siden 1775.

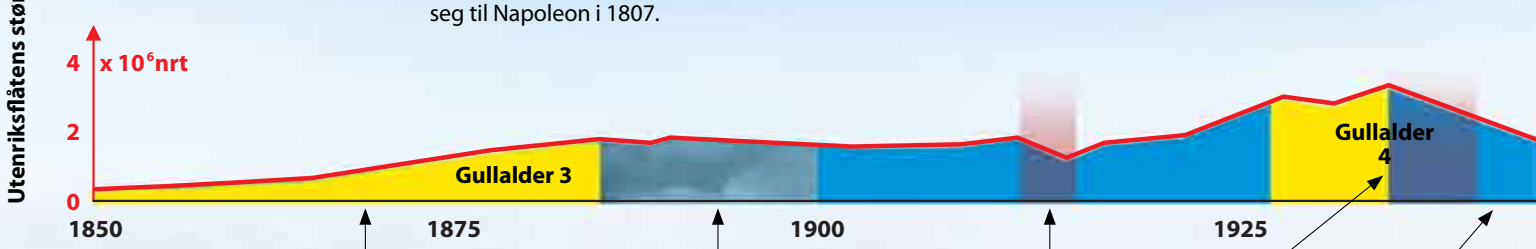
"For 150 år siden seilte lille og fattige Norge opp blant verdens største sjøfartsnasjoner og rangerte i 1875 som verdens tredje største, etter Storbritannia og USA". Fra [9.5], Dag Bakka jr.
De historiske glimtene som foran er belyst, viser hvordan skipsfarten har vært et maritimt eventyr for Norge gjennom århundrer. Kanskje det mest forbløffende av alt er hvordan norsk skipsfart gang etter gang har vært i krise, men likevel reist seg mot nye gullaldre. Eller er kanskje ikke dette så rart? Er det derimot det virkelige kjennetegnet på en "ekte" maritim nasjon med lange, grunnsolide tradisjoner? Den stadige vekslingen mellom kriser og gullaldre ser vi nedenfor.

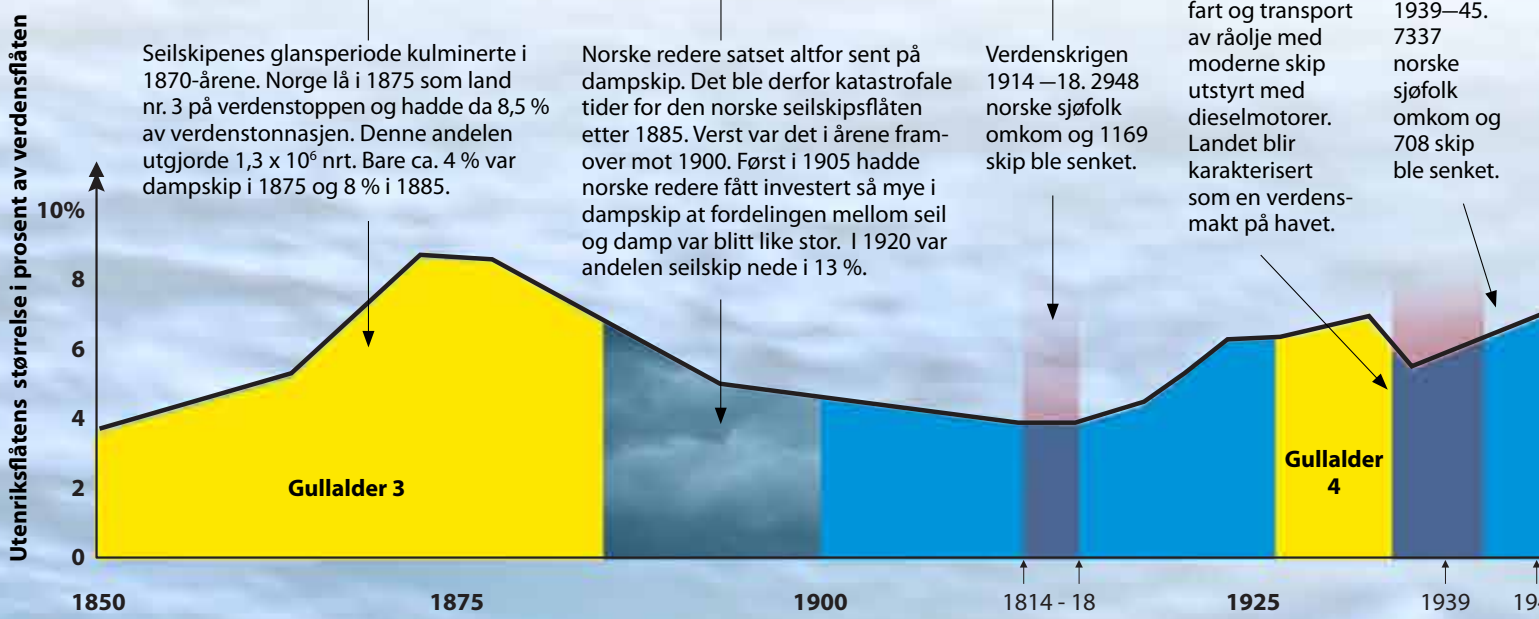
Måling/angivelse av et skips lasteevne
Dette kan gjøres på to forskjellige måter:

1. Ved hjelp av skipets deplasement, det vil si fortrengt væskemengde målt i masseenheter [tonn]. Maksimal lasteevne kaller vi i så fall skipets dødvekt [dvt, dwt], se også side 2-4. Denne angivelsen er brukt i grafen fra 1950 og videre.
2. Ved hjelp av skipets innvendige volum. Disse ble tidligere opp målt i brutto eller netto registertonn [brt, nrt], som på tross av den uheldige ordbruken var et rent rommål.
   [1 registertonn = 2,83 m^3]. Dette er en gammel målemetode, og gyldig for de historiske grafene nedenfor. Se oppg. 9.2 for dagens rommål (brutto- /nettotonn, bt/nt).

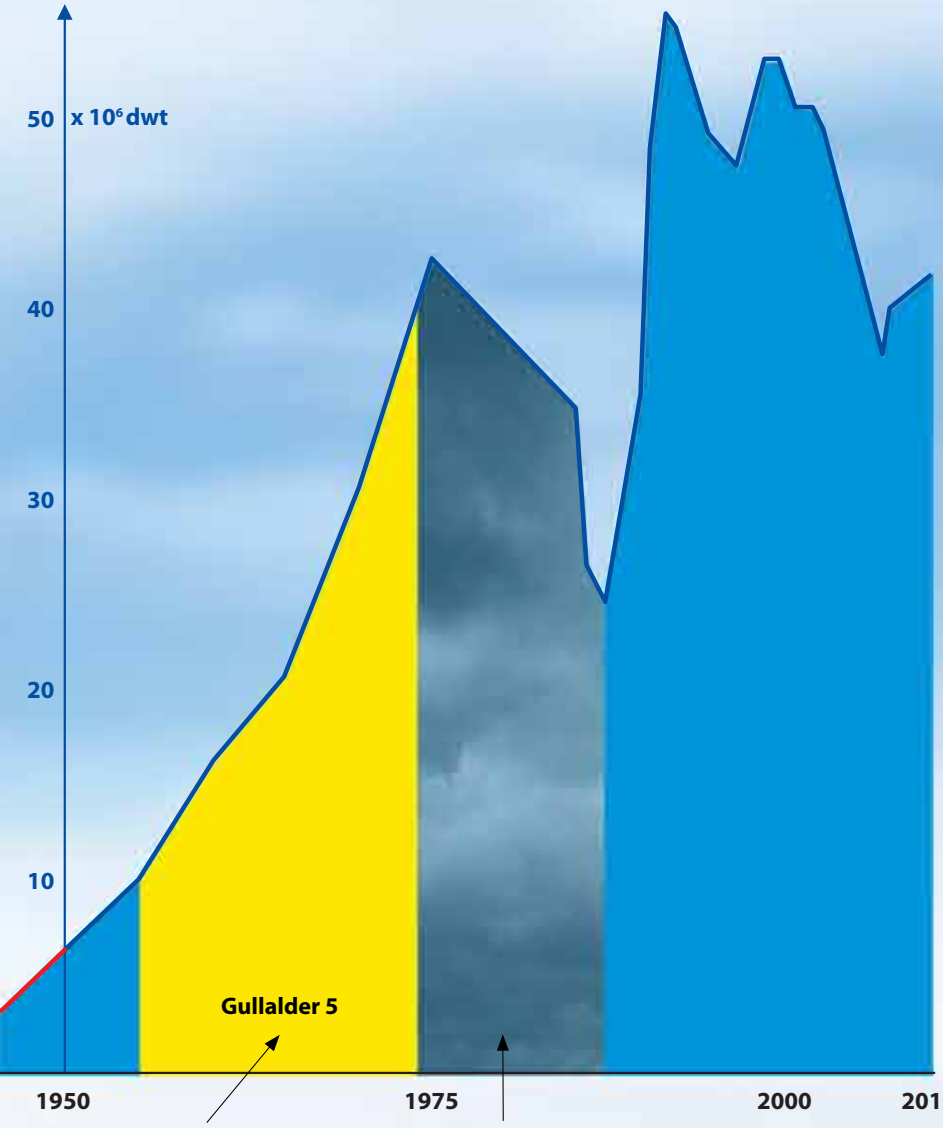








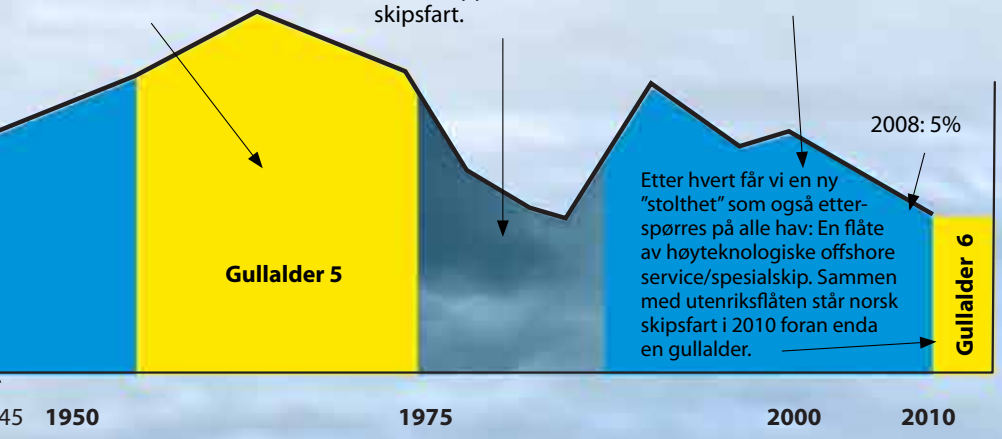
Et maritimt eventyr !



Skipsteknologisk revolusjon på 1960-tallet: Skipsstørrelsene øker og skipene blir mer spesialiserte og avanserte. Lasthåndteringen effektiviseres. Norske redere og skipsfartsmiljøer er hele tiden "i front" og opplever en gullalder som vel er den største av alle.

Verdensøkonomien stagnerer og det oppstår en veldig overkapasitet av skipstonnasje, særlig tanktonnasje. Perioden 1974—87 kalles "skipsfartskrisen" og rammer Norge meget hardt, så hardt at den har blitt karakterisert som en nær døden-opplevelse for norsk skipsfart.

Også nær døden-opplevelsen overleves De maritime næringer er robuste, og den nye olje- og gassnæringen etterspør også skipsteknisk kompetanse i stor grad. Fortsatt satses det på spesialskip samtidig som det fokuseres på kvalitet og miljø.



Det er mer enn tonnasjen som teller. Norges internasjonale maritime posisjon kan beskrives slik:

- *Et av verdens største maritime næringsmiljøer*
- *Verdens 5. største handelsflåte etter Hellas, Japan, Tyskland og Kina, med ca. 2000 skip på totalt 41 mill. tdw, det vil si ca. 5 % av verdensflåten*
- *96 000 sysselsatte i maritim næringsklynge (se side 9-21)*
- *60 000 sjøfolk seiler på norske skip*
- *Verdensledende rederier i noen nisjer*
- *Verdens største innen maritim offshore*
- *Det Norske Veritas er verdens nest største klasseselskap og klassifiserer mer enn 16 % av verdensflåten.*
- *To av verdens ledende shippingbanker*
- *Flere av verdens ledende meglerfirma*
- *Norske forsikringsinstitusjoner og meglere forsikrer 20 % av verdensflåten*
- *Europas største verftsgruppe ledes fra Norge*
- *Verdensledende jnnen maritim forskning. Oppdatert fra [9.5] i 2010*

Utvikling av Norges utenriksflåte i årene 1775-2010.
Skipsstørrelser er målt i:

- *Netto registertonn [nrt] for årene 1775—1950 (røde grafer)*
- *Dødvekttonn [dwt] for årene 1950-2010 (blå graf og skala)*

Se definisjoner på side 9-12.

Relativ størrelse på Norges utenriksflåte i årene 1850-2010, målt i prosent av verdensflåten.
Denne grafen er i grunnen mer interessant enn grafen ovenfor. Vi ser at den norske andelen har ligget på 5—10 % i mesteparten av denne tiden. Dette kan kanskje synes beskjedent, men er egentlig eventyrlig når vi tenker på at lille Norge kun har hatt mindre enn 1 ‰ av jordas befolkning i denne tiden og dessuten har vært et fattig land i europeisk målestokk.

Verdens transportbehov

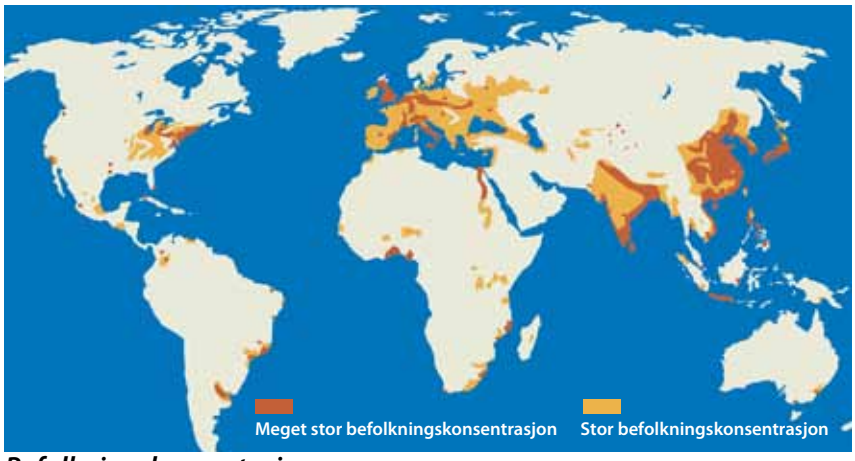
Bosetning av verdens befolkning
Bosetningen i verden er svært ujevnt fordelt. Mer enn 60 % bor i Europa (EU) eller i de ti største landene: Kina, India, USA, Indonesia, Brasil, Russland, Pakistan, Japan, Bangladesh og Nigeria. Europa samlet ligger på tredjeplass på denne lista. Det framgår tydelig av øverste figur at befolkningstettheten generelt er størst i Sørøst-Asia, Sør-Asia, Europa og den nordøstlige delen av USA.

Fordeling av utnyttbare ressurser
De fossile energiformene råolje og naturgass er blant de mest ettertraktede ressursene på planeten. Midterste figur viser hvor de største forekomstene er.

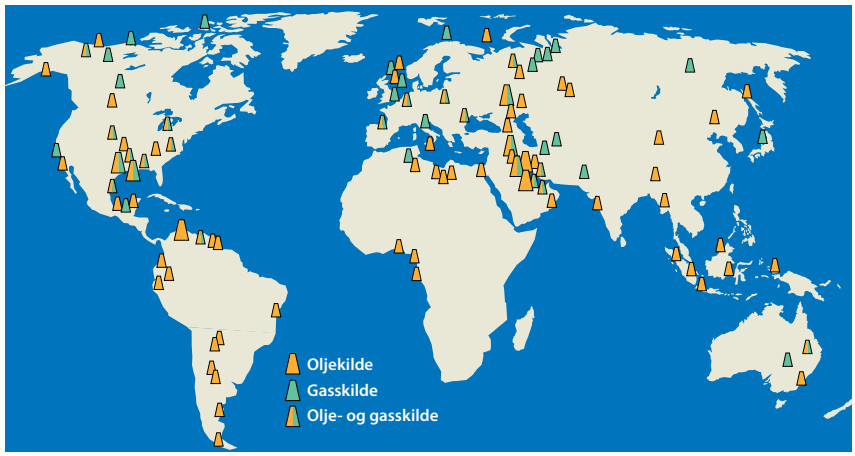
Enorme transportbehov pga. ujevn fordeling av befolkning og ressurser
Det framgår tydelig av de to første figurene at naturgass og råolje produseres i områder som ligger langt fra de stedene hvor befolkningstetthetene og dermed behovene er størst. Riktignok blir både naturgass og råolje ofte transportert i rør, men som oftest er sjøveis transport den eneste muligheten. Den nederste figuren viser de transportveier som da er mest aktuelle.

Geografisk fordeling av folk og ressurser

Vår verden har en ujevn geografisk fordeling av både folk og ressurser. Stort sett befinner både energien, maten og de andre råvarene seg langt unna de store folkekonsentrasjonene. Råolje og naturgass er et godt eksempel på dette (se figurene nedenfor). De tre største eksportørene er Saudi-Arabia, Russland og Norge, mens de tre største importørene er USA, Japan og Kina. *Slikt blir det et stort transportbehov av.*



Befolkningskonsentasjoner



Fossile energiressurser (råolje og naturgass)

Transportveier for råolje og gass

Oversikt over sjøtransportbehovene

Vi deler gjerne verdens sjøtransportbehov inn i følgende kategorier:

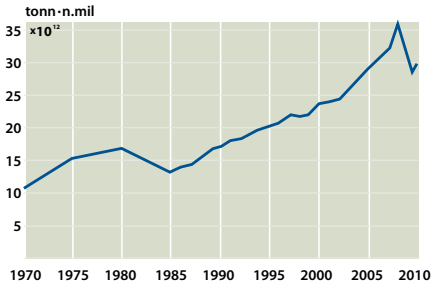
- Energi
- Råvarer til foredling og industriproduksjon
- Matvarer
- Fabrikerte og halvfabrikerte varer
- Persontransport

Omfanget av de enkelte kategoriene framgår av øverste figur til høyre. Grafen nedenfor viser hvordan den totale sjøbårne handelen har utviklet seg. I framtiden vil verdens transportbehov øke videre i takt med befolkningsveksten og bedringen av levestandard. Store deler av verden har opplevd en øking i levestandarden de siste årene. I for eksempel Kina er ekstrem fattigdom redusert fra 60 til 15 % de siste 20 årene. Med bedring av levestandarden øker etterspørselen av varer og dermed øker også transportbehovet.

Oversikt over verdens behov for sjøtransportarbeid

Energitransport. Denne utgjør ca. 50 % av verdens behov for sjøtransport, hvis vi måler dette i transportarbeid. Verdens energibehov er enormt og vil fortsette å vokse (se figur side 7-2). I dag frakter skip 37 % av verdens råoljeforbruk, 28 % av kullforbruket til forbrenning og 24 % av naturgassforbruket.

Oppfinnelsen av LNG-tankeren (Liquefied Natural Gas) på 60-tallet har gjort at transport av naturgass med skip har blitt mer enn fordoblet på 30 år og denne formen for energitransport ventes å øke i framtiden. Du kan lese mer om LNG-skip på side 9-10 og side 9-23.



Verdens sjøbårne handel 1970-2010, målt i transportarbeid [tonn · n.mil]
Den sjøbårne handelen har blitt tredoblet de siste 25 årene.

Råvaretransport. Råvarer til foredling og industriproduksjon utgjør ca. 30 % av sjøtransporten i verden. Som nevnt tidligere skapes transportbehovet av den store distansen mellom råvarekildene og industriområdene. Hoveddelen av all bulkgods transportert sjøveien er jernmalm og kull, men også varer som mineraler, sand, bauxitt, skrapjern, tømmer og kjemikalier fraktes med bulkskip. Les mer om bulkskip på side 9-25.

Matvaretransport. Transport av matvarer til mennesker og dyr består hovedsakelig av korn, men også ris, mais, kjøtt, fisk, frukt, grønnsaker o.l. transporteres Mange land i verden, inkludert Norge, har et klima og en geografi som kun gjør det mulig å produsere bare et begrenset utvalg av mat-varer. Takket være skipsfarten kan nordmenn nyte produkter som bananer fra Sør-Amerika og vin fra Spania, og på samme måte kan resten av verden glede seg over norske fiskeprodukter.

Transport av fabrikerte og halvfabrikerte varer. Slike varer inkluderer alt fra elektronikk til joggesko og biler. Selv om dette utgjør kun ca. 10 % av verdens sjøtransport, utgjør det om lag 75 % av den samlede lastverdien. Sentralt i denne handelen står containerskipet og *containeriseringen* som du kan lese mer om på side 9-26.

Persontransport. På interkontinentale strekninger har flyene tatt over persontransporten, men på kortere distanser er fergetrafikk et konkurransedyktig alternativ både på pris og miljøbelastning. På sjøstrekninger, som over Skagerak, den Engelske kanal og det Baltiske hav fungerer fergetrafikken som broer mellom landenes veisystemer. Innenlands er fergetrafikken en nødvendighet for opprettholdelse av kystsamfunn og samferdsel over store elver og fjorder.

Viktig definisjon for sjøtransport
Et velbrukt mål for transport til sjøs er tonn • n.mil eller tonn • km, altså produktet av transportert mengde (i tonn) og transportert distanse (i nautisk mil eller km). Denne størrelsen kalles ***transportarbeid****, og er i mange tilfeller mer beskrivende å bruke enn bare transportert mengde målt i tonn. Når lasten måles i volumenheter, må omregning til tonn foretas vha. lastens tetthet.*

Skipet – av enorm betydning for verden

Verdensflåten

Det er skipet som får verden til å fungere som ett økonomisk system. Verdens økonomier er tett sammenbundet og nesten alle land er avhengige av å handle med hverandre for å opprettholde sin samfunnsstruktur. Etterspørsel av kull i Asia dekkes fra Australia, etterspørsel av energi i Nord-Amerika dekkes fra Midt-Østen, etterspørsel av elektronikk i Europa dekkes fra Asia, og det finnes utallige flere eksempler på hvordan skipet har vevd verden sammen.

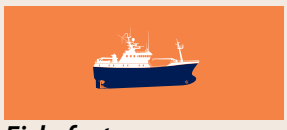
Det er bare skipet som kan dekke verdens behov for transport mellom kontinentene. Skipets store lastekapasitet i forhold til andre transportalternativer som tog, fly eller lastebil, gjør sjøtransport til både det mest kostnadseffektive og miljøvennlige framkomstmidlet. Vi kan godt si at skipet er motoren i dagens globaliserte verden. Det frakter så godt som alt av varer, og størrelse eller antall er sjelden en hindring.

Vi ser av figuren midt på forrige side at verdens sjøbårne handel i 2010 er kommet opp på mer enn 50 000 milliarder tonn · km. Det er vanskelig å forholde seg til et så stort tall. Kanskje forteller det oss mer at det i dag finnes 100 000 skip i verden, og at det kreves nesten 50 000 lasteskip for å tilfredstille transportbehovet.

Sammensetning av verdensflåten. *Fra [9.10]*

a. Fordelt etter antall skip av forskjellige hovedtyper. Vi ser at antall lasteskip utgjør omtrent halvparten av verdensflåten. Skipene er illustrert med typiske relative størrelser.

b. Fordelt etter samlet bruttotonn for de forskjelige hovedtyper. Legges tonnasjen til grunn, utgjør lasteskipene ca. 90 % av verdensflåten. Se oppgave 9.5 angående måling av tonnasje i bruttotonn.

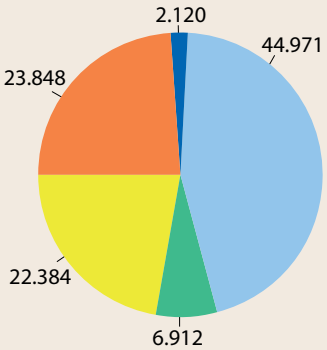


Fiskefartøy

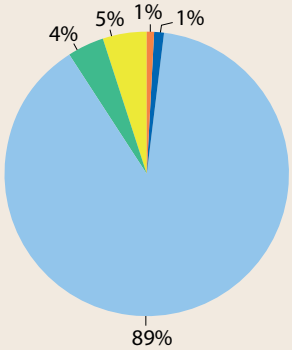
Serviceskip

Passasjerskip

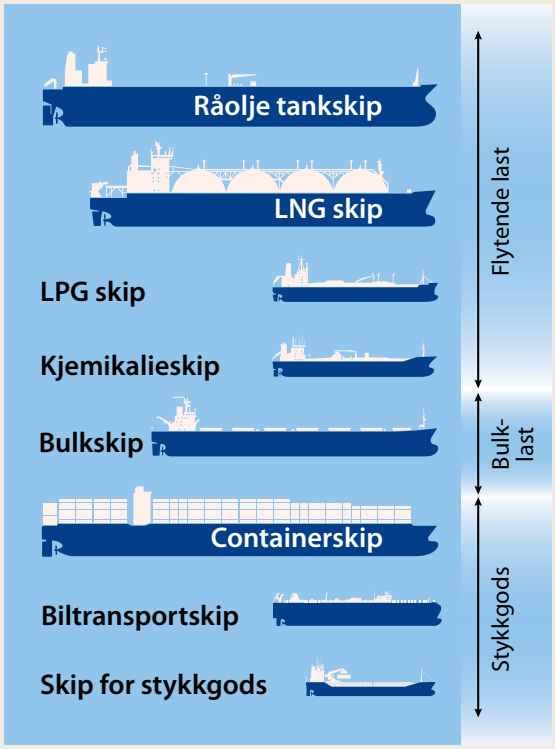
Andre



a) Antall skip



b) Bruttotonnasje

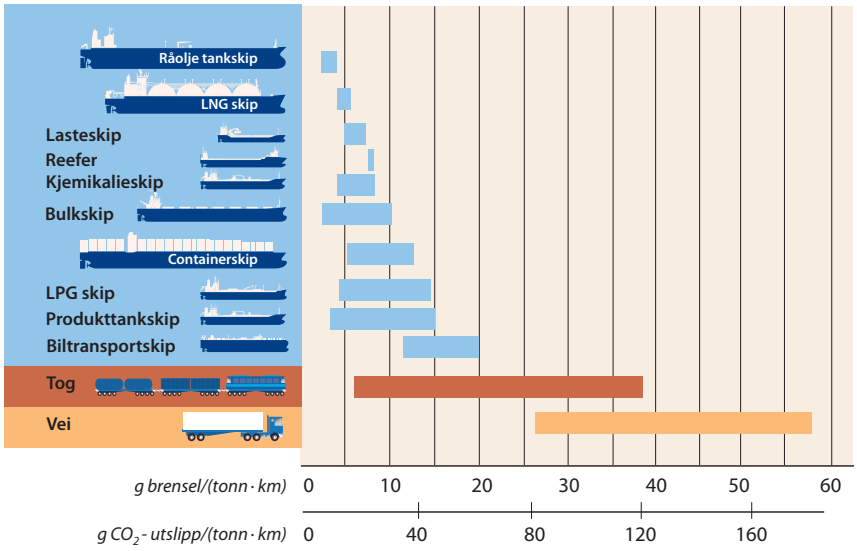


Lasteskip (illustrert med typiske relative størrelser)

Skipet – det mest energieffektive transportmidlet

Hva er det som bestemmer et skips energieffektivitet? Nødvendig energi til transportarbeidet må hentes fra motorens brensel. Som mål for energieffektivitet er det derfor naturlig å bruke motorens brenselsforbruk pr. enhet transportarbeid, altså g/(tonn • km). Denne størrelsen er i figuren nedenfor illustrert for forskjellige skipstyper. Vi ser at det er store variasjoner i energiforbruket for de enkelte typer. Dette skyldes variasjoner i de faktorer som påvirker dette forbruket. Disse faktorene kan deles inn i to hovedgrupper, og omfatter blant annet:

- **Framdriftsmotstanden** (se side 3-12/13). Denne bestemmes bl.a. av:
  - Skipets fart (normal fart og fartsprofil under transporten)
  - Skipets dimensjoner og form (f.eks. lengde/bredde-forholdet)
  - Skipets virkelige deplasement under transporten, avhengig blant annet av lettskipsvekten og dødvekten (i hvilken grad maksimal lasteevne er utnyttet)
- **Motorenes brenselsforbruk** (se side 7-19/20), bestemmes bl.a. av:
  - Propulsjonsvirkningsgrad
  - Motortype (totakt, mellomhurtig/ hurtig firetakt eller gassturbin) og tilhørende brenselsforbruk, se figur side 7-20)
  - Motorenes driftsprofil (i hvilken grad de kjøres på andre belastninger enn den normale, for eksempel pga. værforholdene).



Energi- og miljøeffektivitet for skip, jernbane og lastebil, målt i henholdsvis g brenselsforbruk og g CO_2-utslipp, begge deler uttrykt pr. enhet transportarbeid (tonn · km). Fra [9.10]

Figuren er basert på gjennomsnittsverdier etter analyser av en lang rekke transportoppdrag innen de enkelte kategorier. Årsaken til at det opptrer så store variasjoner innen hver enkelt skipstype, og fra den ene skipstypen til den andre, skriver seg fra større eller mindre variasjoner i de faktorer som er listet opp ovenfor til venstre.

Det er stort sett de samme faktorer som er av betydning også når det gjelder transport på vei, men driftsprofilen betyr da mye mer, grunnet større fartsvariasjoner underveis. Vogntog kan derfor nesten aldri bli like energieffektivt som skip. Likevel kan gunstig infrastruktur mht. havner og veinett ofte medføre at vogntog foretrekkes på kortere strekninger.

Som det framgår av figuren kan derimot jernbane i enkelte tilfeller være like energieffektivt som skip. Igjen er det oftest infrastrukturen som avgjør hvilken transportform som foretrekkes.

Figuren ovenfor er ikke egnet til å ta ut nøyaktige verdier for et enkelt transporttilfelle. I stedet kan det da gjøres beregninger som nedenfor.

Eksempel 9.1. Beregn brenselsforbruk og CO_2-utslipp pr. enhet transportarbeid for det samme skipet som er behandlet på sidene 3-14 og 7-19. Fart v= 20 knop = 37 km/h, volumdeplasement = 28264 m^3, last = 19000 tonn, motoreffekt P_e=15900 kW, spesifikt brenselsforbruk 180 g/kWh, hjelpemotorenes forbruk =15 kg/km, CO_2-utslippsfaktor = 3,2 g/g (se neste side).

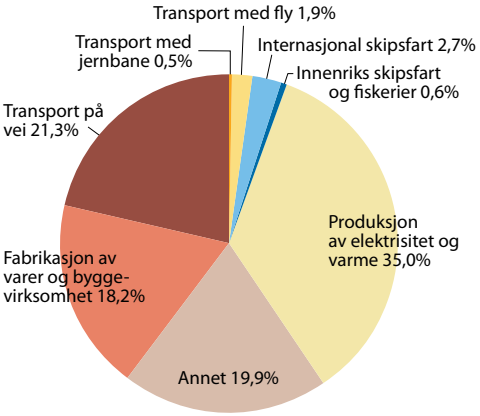
Løsning: Brenselsforbruk pr. km: $B = b_e \cdot P_e/v$ (se side 7-20)

$B = 0{,}180$ g/kWh · 15900 kW/37 km/h+15 kg/km= 92,4 kg/km

Brenselsforbruk og CO_2-utslipp pr. km og pr. tonn last

$B' = 92400$ g/km / 19000 tonn = **5 g / (tonn · km)**

CO2 = 5 g / (km · tonn) · 3,2 g/g = **16 g / (tonn · km)**



Totale CO_2-utslipp fra skipsfarten i verden, sammenlignet med totale utslipp fra andre globale virksomheter. Fra [9.10]

Skipet – også det mest miljøvennlige transport-midlet

CO_2-utslipp er proporsjonalt med brenselforbruket. Se gjerne side 7-27, hvor det er forklart hvordan en motors CO_2-utslipp henger nøye sammen med dens brenselsforbruk. For hvert kg dieselbrensel som forbrenner, dannes det ca. 3,2 kg CO_2. Hvis vi kjenner en motors brenselsforbruk, for eksempel i g /kWh, kan vi altså finne motorens CO_2-utslipp ved å multiplisere med faktoren *3,2 g CO_2 /g brensel*. Ved å utstyre figuren på forrige side med to skalaer, kan vi bruke denne både til vurdering av transportmidlenes energieffektivitet og deres miljøvennlighet. Figuren forteller dermed at skipet ikke bare er det mest energieffektive, men generelt sett også det mest miljø-vennlige transportmidlet vi har.

Relativt små, totale CO_2-utslipp i forhold til totale utslipp fra andre aktiviteter i verden. Vi kan dokumentere også på en annen måte at skipet, på tross av det enorme sjøtransportarbeidet det utfører, spiller en relativt beskjeden rolle i det samlede CO_2-utslippet for hele jordkloden. Figuren til venstre viser nemlig at skipsfart bare utgjør 3,3% av dette samlede CO_2-utslippet (når innenlandsk sjøtransport og fiskeridrift inkluderes). Dette betyr imidlertid ikke at vi skal være tilfreds med "tingenes tilstand". Tvert imot må også *skipsfarten bidra med miljøbesparende tiltak i framtiden*. Vi skal i slutten av dette kapitlet komme tilbake til hvilke muligheter man her diskuterer. Disse må omfatte både ytterligere forbedring av energieffektivitet og bruk av alternative, mer miljøvennlige brensler. Alt dette gir mange interes-sante utfordringer for framtidige ingeniører.

Andre skadelige utslipp til luft. Det er CO_2 som dominerer når det gjelder skadelige utslipp fra skip. Av andre skadelige utslipp kan nevnes svoveloksider (SO_X), nitrogenoksider (NO_X) og partikler. Slike utslipp er først og fremst av betydning i kyst- og regional trafikk. De holdes i dag innenfor visse, tillatte grenseverdier, som imidlertid stadig skjerpes. Vi kommer tilbake til dette på side 9-40 og følgende.

Sammendrag

Sjøtransporten er drivkraften i verdensøkonomien, og det vil den fortsette å være i overskuelig framtid. Skipsfart er en forutsetning for global varehandel, og uten denne varehandelen ville leve-standarden vår kun vært en brøkdel av det den er i dag. Skips-farten står for 95 % av verdenshandelen, men likevel "kun" for ca. 3 % av verdens CO_2-utslipp.

Generelt sett er skipet det mest energieffektive og dermed også det mest miljøvennlige transportmidlet for verdenshandelen.

Fortsatt må miljøteknologi være i fokus når verdensflåten fornyer seg. Innsatsen vil da særlig rette seg mot teknologi for å forbedre energieffektiviteten ytterligere, og for å ta i bruk alternative brensler (se side 9-40 og påfølgende sider). Uansett vil skipet være sentralt når vi i framtiden skal kombinere økt levestandard med lavere CO_2-utslipp.

Skipsfart og maritim virksomhet – av enorm betydning for Norge

Norsk skipsfart i dag

Kunnskap og kompetanse står sentralt. Som det framgår av den historiske oversikten først i dette kapitlet, går den norske sjøfartskulturen tilbake til "tidenes morgen". Skipet og skipsfarten har gjennom alle tider vært av enorm betydning forlandet (se sidene 9-12/13), og er det fortsatt.

Å bruke sjøen som transportvei kan være veldig krevende. Dette har vi sett i de foregående kapitlene som omhandler fysikken man må kunne for å designe, bygge og operere et skip. Derfor har kunnskap og kompetanse alltid vært av stor betydning for maritim virksomhet. Vi skal på de neste sidene vise hvordan dette i dag gjelder mer enn noen gang. Først skal vi likevel starte med å se nærmere på dagens norske skipsflåte.

Norges utenriksflåte, den femte største i verden. Oversikt over antall skip og lastekapasitet fordelt på skipstyper er vist på neste side. Utenriksflåten, som også kan kalles den internasjonale flåten, består hovedsakelig av skip som frakter varer utenfor Norge. Disse kan være borte fra hjemlandet i årevis. Omtrent en halvpart (målt i lastekapasitet) er registrert i norske skipsregistre og seiler dermed under norsk flagg. Den andre halvparten er registrert i andre lands skipsregistre og seiler altså under et eller annet utenlandsk flagg. Likevel eies og opereres disse av norske rederier og må regnes med i den norske flåten. Denne om-fatter da 1760 skip på til sammen i nær av 40 mill. tonn dødvekt. Dette er den femte største flåten i verden. Egentlig er den enda større, fordi det finnes rederier som er registrert i utlandet med både skip og hovedkontor, men som likevel kontrollerer virksomheten fra Norge.

Satsing på høyteknologiske og miljøvennlige skip. I forbindelse med de statistiske dataene for utenriksflåten er det verdt å merke seg at den norske flåten i økende grad går bort fra de største oljetankerne og bulkskipene, og over til mer kompliserte og høyteknologiske skip. Særlig gjelder dette for skip som brukes i olje- og gassutvinningen, for eksempel offshore supplyskip. Tradisjonelt måles et lands flåtestørrelse i lastekapasitet, og de fleste statistikker dreier seg om det. Utviklingen i den norske flåten avtar i lasekapasitet i forhold til andre land, men målt i verdiskaping er den stadig økende. Dette kommer vi tilbake til på side 9-21. Slik teknologisk utvikling gjelder ikke bare offshore serviceskip, men også for noen andre nisjer bl.a LNG-skip og passasjerskip). Vi skal videre merke oss at konkurransen med lavkostland generelt har medført økt satsing på teknologi som fremmer effektivitet og sikkerhet. Videre er det verdt å merke seg at norsk skipsfartsnæring generelt fokuserer sterkt på miljøteknologi. Også dette kommer vi senere tilbake til i flere sammenhenger.

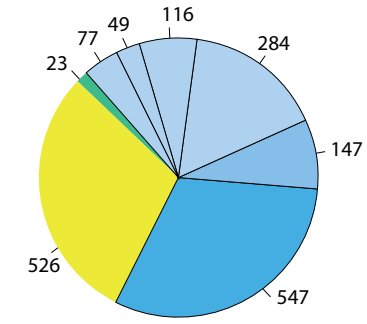
Småskipsflåten er også viktig for landet. Oversikt over den norske småskipsflåten er vist i det oransje feltet på neste side. Flåten omfatter stort sett fartøy som seiler innenriks, men også landene rundt Nordsjøen og Østersjøen er interessante markeder. For nærsjøfarten var

Land	Nasj. flagg	Utenl. flagg	Totalt
Hellas	49,3	117,2	166,4
Japan	11,6	126,6	138,2
Tyskland	12,8	67,8	80,6
Kina	30,8	36,2	67,1
Norge	13,7	32,7	46,4
USA	9,9	34,8	44,7

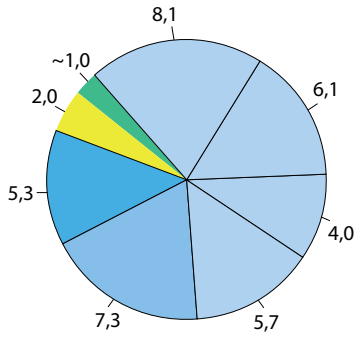
Skipsflåter for verdens ledende sjøfartsnasjoner per 1. juli 2006, målt i mill. dwt . Fra [9.8]

Verdiskaping – definisjon og måling

Vi skal senere i dette kapitlet vurdere nærmere den betydning som maritim virksomhet har for landet, og trenger en metode for å gjøre dette skikkelig. Begrepet verdiskaping er da godt egnet. Verdiskapingen i en bedrift beregnes enkelt ved å ta bedriftens omsetning og trekke fra de varer og tjenester som den har kjøpt fra andre bedrifter (og som bestemmer verdiskapingen i disse). På denne måten unngås dobbelttelling av varer og tjenester og det blir enkelt å sammenligne verdiskaping mellom næringene. Nødvendige data framgår av det regnskap bedriften leverer til myndighetene. Metoden krever at bedriftene samles i relevante grupper (se side 9-21). Verdiskaping beregnet på denne måten gir samtidig et godt bilde på den samfunnsmessige betydning av de enkelte næringers virksomhet, og kan sammenlignes med begrepet BNP.



Antall skip



Lasteevne

Norsk småskipsflåte pr. 2010
Den omfatter fartøyer som eies/ drives av rederier tilsluttet enten "Rederienes landsforening" eller "Fraktefartøyenes rederiforening". Fartøyene har lasteevner på 500–10 000 tdw.

Lastebåter
28 tankfartøy
64 brønnbåter (transp. lev. fisk)
82 bulkfartøy (selvlossere)
55 stykkgodsfartøy
9 container/palle- fartøy
14 fryseskip

Transport av passasj./biler
13 hurtigruteskip
78 hurtigbåter
185 ferger (for riksveinettet)

Servicefartøy
83 slepefartøy
5 seismikkfartøy
40 redningsskøyter
9 andre

Totalt: 665 fartøy

Norsk fiske / fangst-flåte er av betydelig omfang og blir omtalt nærmere på s. 12-16/17

Norsk militærflåte beskrives kort på side 9-33/34/35

Norsk utenriksflåte per des. 2010. Fra [9.8]
Omfater skip som eies /drives av rederier som er medlemmer av Norges Rederiforbund

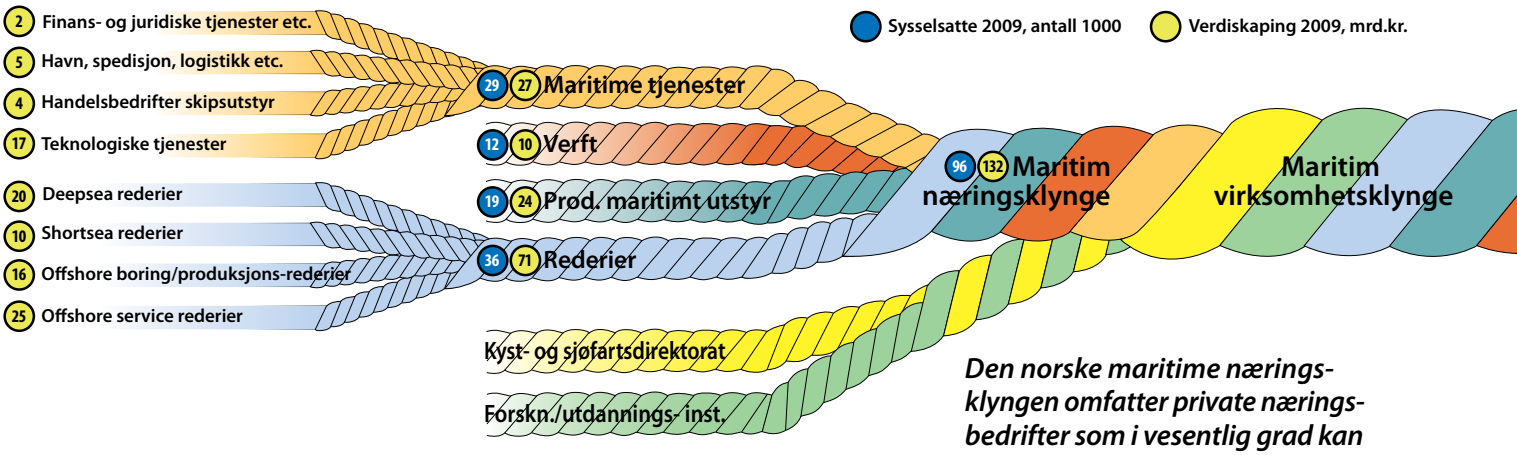
		Antall skip	Laste-evne (mill. dwt)
Råoljetankskip	Flytende last	77	8,1
Offshore produksjons- og skytteltankskip	Flytende last	49	6,1
LPG og LNG-skip	Flytende last	116	4,0
Kjemikalie- og produkttankskip	Flytende last	284	5,7
Bulkskip	Bulk last	147 [1)]	7,3
Containerskip	Stykkgods	547	5,3
Biltransportskip	Stykkgods		
Skip for generell last	Stykkgods		
Offshorerelaterte spesialbåter	Service	526	2,0
Cruise-skip og internasj. ferger	Passasjer	23	~1,0 [2)]
Sum		1769	39,5

1) Inklusiv 12 kombinasjonsskip (OBO, Oil/Bulk/Ore)
2) Omregnet fra skipsstørrelse oppgitt i bruttotonn

lenge skip på 2-3000 tdw de mest typiske, men i dag er ca. 4000 tdw mer vanlig for tank- og containerskip, og opptil 10 000 tdw for bulkskip. Det er mer lønnsomt med større enheter. De viktigste varene som transporteres med småskipsflåten er:
- flytende produkter (råolje, bensin, kjemikalier og vegetabilske oljer)
- råvarer til industrien
- matvarer og fabrikerte varer

For øvrig skjønner vi av tabellen til venstre at skip/fartøy for transport av mennesker og biler utgjør en svært viktig gruppe. Det samme må også sies om alle servicefartøyene langs vår lange kyst. Disse er ikke bare av stor generell betydning, men gir også verdifullt supplement til de offshorerelaterte fartøyene som er ført opp under utenriksflåten.

Fiskeflåten må ikke glemmes. Fiskeflåten er også av betydelig omfang og driver en virksomhet som er svært viktig for landet, særlig for eksportindustrien. Vi kommer tilbake til alt dette i kapittel 12.



Den norske maritime næringsklyngen omfatter private næringsbedrifter som i vesentlig grad kan relateres til maritim virksomhet. *Grupperinger og data er hentet fra [9.11]. En komplett maritim virksomhetsklynge omfatter i tillegg innsats fra offentlige institusjoner.*

Den norske, maritime næringsklynge

Maritim næring - mye mer enn bare skipsfart. Ifølge [9.11] var det 4271 aktive bedrifter som i det vesentlige drev med maritimt relatert virksomhet i Norge i 2009. Disse kan inndeles i fire hovedgrupper, som vist i figuren ovenfor: maritim tjenesteyting, verft, rederier og produksjon av maritimt utstyr. Rederiene videreinndeles i fire undergrupper:

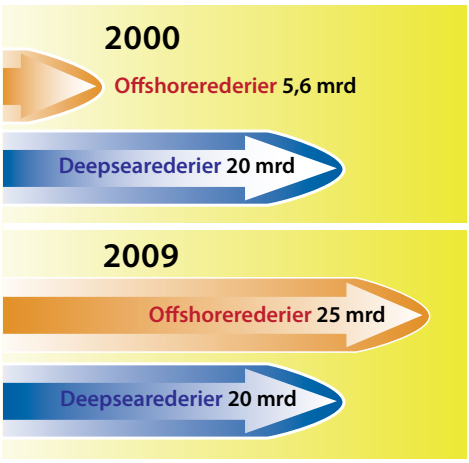
- **Offshore service**
- **Offshore boring og flytende produksjon**
- **Shortsea** (småskipsflåten)
- **Deepsea**

Disse, mer enn 4000 næringslivsbedrifter, utgjør det vi kaller den norske, *maritime næringsklyngen*. Denne stod for en verdiskaping på 132 milliarder kroner i 2009 og sysselsatte nesten 100 000 mennesker. I tillegg til dette gjør offentlige myndigheter en betydelig innsats gjennom finansiering av undervisning og forskning m.m. Den *komplette maritime virksomhetsklyngen* er derfor større enn selve næringsklyngen, og er en av de mest omfattende i verden.

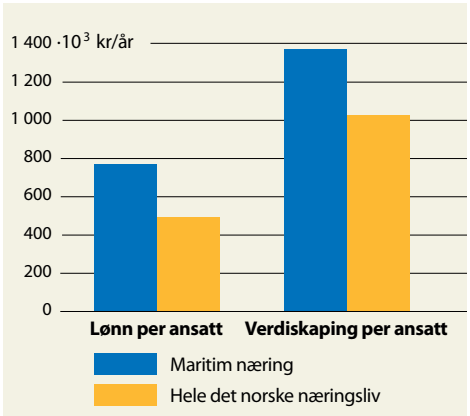
Den maritime næringen er den nest største næringen i Norge, etter olje- og gassnæringen. Riktignok har både landbasert bygg/anleggs- og handelsvirksomheten noe større verdiskapinger, men dette er næringer som stort sett er skjermet for en så sterk internasjonal konkurranse som den maritime næringen utsettes for. De gir heller ikke på langt nær så store eksportverdier som den maritime næringen gjør.

Offshorerelaterte grupper ekspanderer mer enn de øvrige. Tradisjonelt har det vært den velkjente utenriksflåten som har vært bærebjelken i den maritime næringen. Som vi ser av figuren til høyre, er det ikke slik lenger. Nå er det den høyteknologiske offshoreflåten som ekspanderer, samtidig som den konvensjonelle flåten stagnerer, både på grunn av liten teknologisk utvikling og utflytting av rederier. En annen gruppe som er i sterk vekst er den utstyrsproduserende industrien, som etter hvert har blitt den nest største bransjegruppen i næringsklyngen.

Maritim næring – først og fremst en kunnskapsbasert næring, som krever stor kompetanse hos de ansatte. Dette resulterer i vesentlig høyere lønnsnivå enn i norsk næringsliv generelt. Produktivitetsnivået og dermed verdiskapingen pr. ansatt er også vesentlig høyere enn gjennomsnittet for hele det norske næringslivet.



Den høyteknologiske offshoreflåten ga i 2009, for første gang, større verdiskaping enn den "stolte", konvensjonelle utenriksflåten *("deepsea"-flåten), som i lange tider har vært drivkraften i den norske, maritime næringen. Denne har nå stagnert noe.*



Kompetanse og innovasjon i den maritime næringen sammenlignet med gjennomsnittet for hele landet.

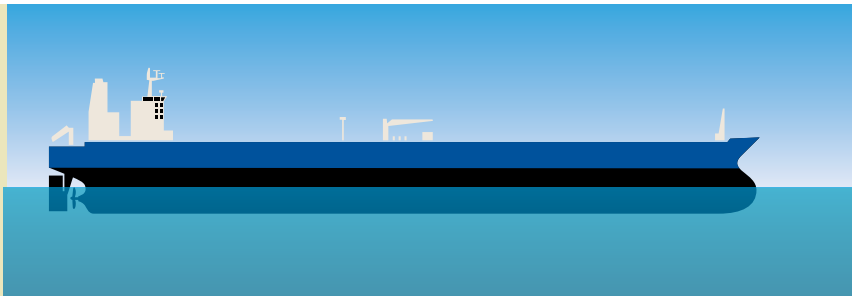
Kort beskrivelse av skipstyper

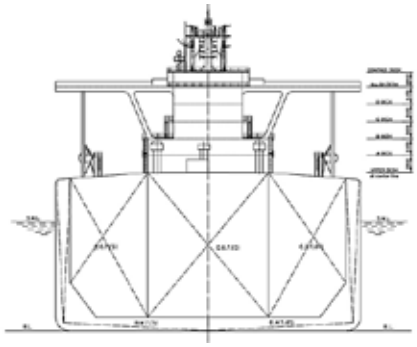
Skip for frakt av flytende last

Det er mange typer flytende laster som skal fraktes rundt omkring i verden: råolje, foredlede produkter av råolje, nedkjølt metan og propan (LNG og LPG, se side 10-9), kjemikaler, flytende næringsstoffer osv. Alt dette krever skip utstyrt med tanker. Grovt sett kan disse grupperes som det framgår av øverste del av tabellen på side 9-20: råoljetankskip, gasstankskip, produkttankskip og kjemikalietankskip. Korte beskrivelser av disse hovedtypene er gjort nedenfor.

Råoljetankskip

Eksempel på data for et slikt skip (VLCC)
Lasteevne: 310 000 DWT
Total lengde: L_{oa} = 340 m
Lengde/bredde-forhold: L_{oa}/B = 5,7
Prosjektert hastighet: 15 knop
Type hovedmotor: saktegående totakter
Hovedmotoreffekt: 28 MW
Nummerering i figur side 3-19: 1





Typisk midskipsseksjon for et stort tankskip.
Lasteseksjonene blir adskilt av to langskipsskott og er omringet langs skipssidene og bunn av et dobbelskrog som minsker risikoen for lekkasje ved ulykker.

Utføres med dobbeltbunn. Dette er den type tankskip som i tonnasje utgjør den største andelen av den norske utenriksflåten. Tankskipsfarten er vital for verdens energiforsyning, som påpekt tidligere. Typiske ruter for denne farten er vist på side 9-14. Felles for alle tankskip er at de er fyldige og saktegående i forhold til for eksempel containerskip.

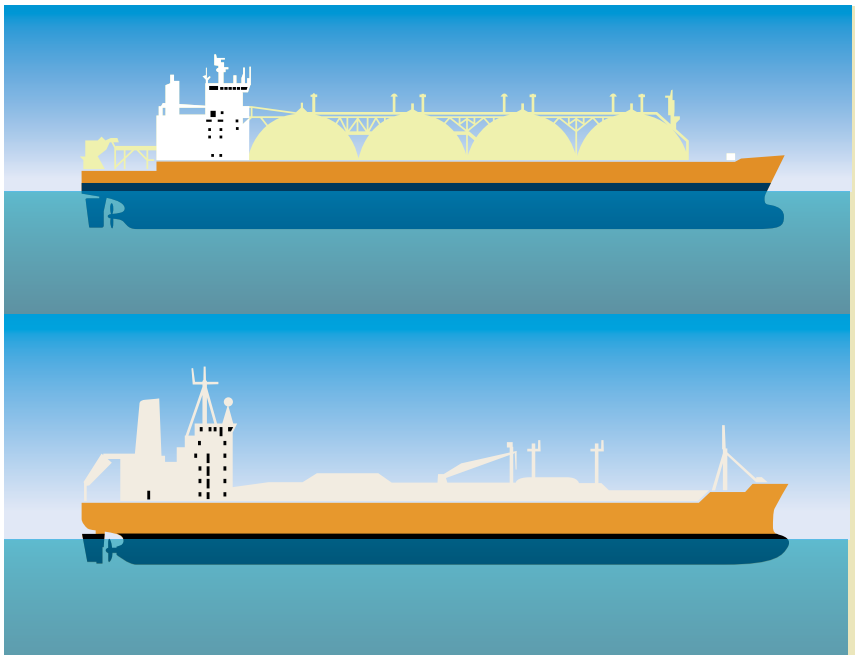
De siste årene har tankskipsulykker ført til alvorlige miljøødeleggelser, som i 1989 da den 300 meter lange "Exxon Valdez" gikk på grunn i Alaska og slapp ut rundt 40 millioner liter råolje. Slike ulykker har ført til sterk fokus på risikoen ved denne transportformen. I dag har de fleste tankskip dobbeltskrog og det er strenge regler for lasting, lossing og rensing av tanker.

Blant annet på grunn av frie væskeoverflaters uheldige virkninger på stabiliteten (se side 2-19) blir skroget delt opp i flere tanker (se side 6-21). Det stilles strenge krav til rekkefølgen som tankene skal lastes og losses i for å unngår for store langskips bøyemomenter (se kapittel 6) og krengevinkel. En annen ting som kjennetegner tankskipene, er at både lasting og lossing skal skje så raskt som mulig. Dette krever et pumpemaskineri av betydelig størrelse.

Frontlines VLCC "Front Shanghai"

Hva menes med supertankere? De fleste oljetankskip er av størrelse Aframax (fra uttrykket Average freight rate assessment), med lastekapasitet på mellom 80 000 og 120 000 tdw og Suezmax med kapasitet 120 000 - 160 000 tdw. Dette er de største skipene som kan gå gjennom Suezkanalen med last. Men det finnes større skip: VLCC (Very Large Crude Carrier) er skip med lastekapasitet 200 000—320 000 tdw og ULCC (Ultra-Large Crude Carrier), som har kapasitet på over 320 000 tdw. Til sammen finnes det ca. 500 skip i disse to gruppene i verden og det bygges stadig fler av dem. Dette er de største mobile konstruksjoner som mennesker har laget. Det aller største skipet som har seilt var den norskeide supertankeren Knock Lewis på 565 000 tdw.

Gasstankskip (LNG-skip og LPG-skip)



Eksempel på data for et LNG-skip
Lasteevne: 85 000 DWT
Total lengde: L_{oa} = 290 m
Lengde/bredde-forhold: L_{oa}/B = 5,9
Prosjektert hastighet: 20 knop
Hovedmotor: én saktegående totakter
Hovedmotoreffekt: 27 MW
Nummerering i figur side 3-19: 2

Eksempel på data for et LPG skip
Lasteevne: 55 000 DWT
Total lengde: L_{oa} = 225 m
Lengde/bredde-forhold: L_{oa}/B = 6,3
Prosjektert hastighet: 16 knop
Hovedmotor: én saktegående totakter
Hovedmotoreffekt: 13 MW
Nummerering i figur side 3-19: 3

Sterkt økende transportbehov. Antall gasstankskip øker stadig i verden, og det antas at behovet for transport av gass vil fordobles i løpet av det neste tiåret. Dette skyldes bl.a. at gass som brensel, som nevnt flere ganger foran, er betydelig mer miljøvennlig enn olje grunnet lavere CO_2-utslipp (se bl.a. side 7-29). Avstandene mellom gassforekomster og gassbrukere er så store at skipstransport ofte er eneste alternativ.

Strenge sikkerhetstiltak. Fordi gass har liten tetthet ved normale temperaturer og trykk, må den i praksis transporteres enten under høyt trykk (CNG), eller så lave temperaturer at gassen har gått over i væskeform (LNG eller LPG), se side 10-9. Gassens volum kan i begge tilfellene reduseres til mindre enn 1 % av det opprinnelige volumet. Energiinnholdet blir stort pr. volumenhet, og et skip med for eksempel lastekapasitet 80 000 m^3, frakter da like mye energi som ble frigjort i 30 atombomber av størrelse som dem sluppet over Hiroshima. Vi forstår da at sikkerhetsforskrifter for en gasstanker blir ekstremt strenge.

Det finnes 300 LNG-tankskip i verden, og tallet er stadig voksende. Gassen fra Snøhvitfeltet transporteres vha. slike skip (se side 10-35).

Kuletankskip og membrantankskip. Frakt av LNG krever at lasten holdes på –163 °C under transporten. Dette stiller eksepsjonelt store krav til konstruktiv utforming. Gasstankskip blir derfor svært kostbare å bygge. Det er i prinsippet to konsepter å velge mellom, med tanker utformet enten som kuler eller prismer (se figurer til høyre). Som vi skjønner av figurteksten, er bruken av kuleform en norsk oppfinnelse. Denne vakte i sin tid stor oppmerksomhet rundt om i verden. For nybygginger er det imidlertid en tendens til å foretrekke membrankonseptet. Årsaken er at tanker formet som prismer gir bedre volumutnyttelse av skroget enn kuleformede tanker. Dette gir både mindre byggekostnader og mindre avgifter per volumenhet last i havner og ved passering av Suez-kanalen. På den annen side er kuletanker mer robuste mot påkjenninger, for eksempel fra bevegelser av væsken i tanken (tankene fylles aldri helt fulle).

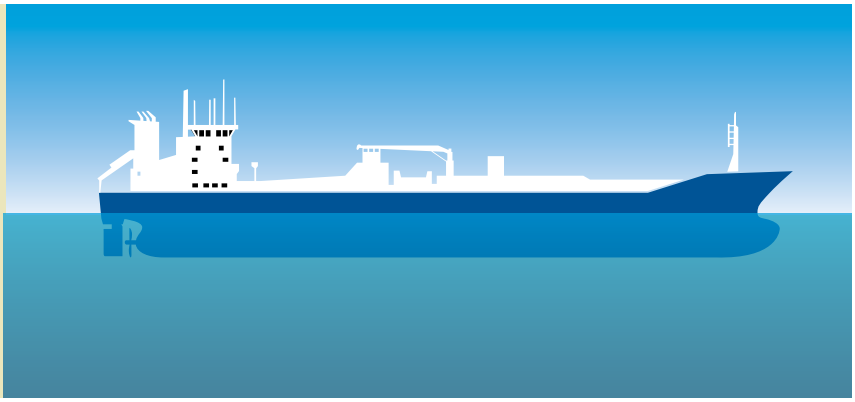
To konstruktive løsninger for transport av LNG i skip: Moss-Rosenberg-konseptet med kuletanker og konsept fra Gaz Transport & Technigaz med metallmembran med ca. 1 mm tykkelse. Fra [9.14]
Hver kuletank er utført med en flens rundt "ekvator", lagret opp på en sylindrisk ring som overfører lastkreftene til tverrskipsrammene. Slike kuletankskip ble utviklet ved NTNU/Sintef-miljøet, noe som i sin tid ble betraktet som en stor ingeniørbragd. I membrankonseptet bygges derimot de prismatiske tankene opp av en ca. én mm tykk, tett metallmembran som støttes opp av isolasjonsmaterialet. Her er det dermed isolasjonen som overfører lastkreftene, i motsetning til i kuletankkonseptet. For LPG-skip foretrekkes gjerne løsningen med prismatisk formede tanker.

Forskjell mellom LNG- og LPG-skip. Mens LNG i hovedsak er flytende metan, er LPG er en betegnelse som brukes om flytende propan (se side 10-20). Propan blir flytende allerede ved -42 °C, noe som forenkler tankkonstruksjonen på flere måter. Likevel er også LPG-skip meget kostbare, men de er normalt mindre enn LNG-skipene.

CNG-skip. Det finnes også konsepter for skip som frakter gass i komprimert form (se side 10-21), men disse er foreløpig på utviklingsstadiet.

Produkttankskip og kjemikalieskip

Eksempel på data for et slikt skip
Lasteevne: 50 000 DWT
Total lengde: L_{oa} = 180 m
Lengde/bredde-forhold: 5,7
Prosjektert hastighet:15 knop
Hovedmotor: én skategående totakter
Hovedmotoreffekt: 13 MW
Nummerering i figur side 3-19: 4



Produkttankere kan frakte et vidt utvalg av væsker, som for eksempel bensin, andre destillasjonsprodukter av råolje, kjemikalier og vegetabilske oljer. De har derfor et større antall tanker enn de vanlige tankskipene. *Kjemikalietankerne* (parcel tankers) kjennetegnes ved at de har et ytterligere større antall tanker for å holde de ulike stoffene fra hverandre. Strengt tatt er det ingen andre forskjeller mellom disse to typene. Det er pålagt strenge sikkerhetsprosedyrer for lasting og lossing av slike skip.

Produksjons- og skytteltankskip for offshorevirksomheten

Produksjons- og lagerskip for Nornefeltet. Skipet brukes der sammen med et skytteltankskip som frakter oljen til en mottaker.
Se figur og beskrivelse side 10-37 og "boks" nederst på side 9-28. Produksjonsskipet har en lengde på 260 m og en bredde på 41 m. Skipet kan rotere fritt om en sylindrisk konstruksjon ("turret") som er forankret med tolv ankerliner til sjøbunnen (se side 10-36). I sylinderen er det plass til 24 stigerør. Prosessanlegget om bord har en kapasitet pr. døgn på 32 000 Sm^3 olje, 6,7 mill. Sm^3 gass og 115 000 m^3 vann for injeksjon på feltet. Oljelageret i skroget har et volum på 115 000 m^3, tilsvarende drøyt fire dagers produksjon. Olje lastes fra produksjonsskipet til skytteltankere via et lastesystem i akterenden på skipet. Gassen blir sendt i land via en rørledning.

Som det vil framgå flere steder i kapittel 10, for eksempel på side 10-29, brukes skip for en rekke formål i olje- og gassutvinningen til havs. Enda flere typer serviceskip vil bli nevnt på side 9-30, men også tankskip er uunnværlige, både for produksjon og lagring på feltet samt videretransport til land. Et godt eksempel er produksjons- og skytteltankskip som brukes bl.a. på Nornefeltet. Skytteltankskipet skiller seg lite fra vanlige råoljetankskip. Produksjonsskipet er vist ovenfor og beskrevet i figurteksten.

Beskrivelse av skipstyper

Skip for frakt av tørre bulklaster

Eksempel på data for et slikt skip
Lasteevne: 120 000 DWT
Lettskipsvekt: 30 000 tonn
Lengde : L_{pp} = 270 m
Bredde: B = 40 m
Blokkoeffisient: C_b = 0,85
Prosjektert hastighet: V = 15 knop
Maskineri: To langsomme totaktere
Nummerering i figur side 3-19: 5

Bulkskipet kjennetegnes ved at det frakter laster som stort sett er homogene masser (bulklaster). Eksempler på slike bulklaster er korn, kull, jernmalm, bauxitt, andre malmer og tømmer.

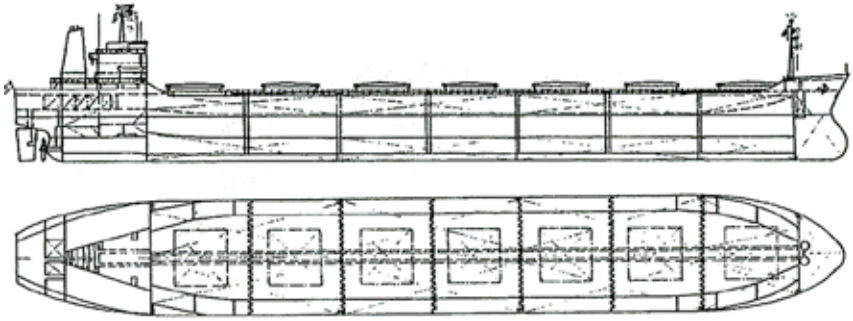
Havets arbeidshester. 40 % av verdensflåten og nesten 20 % av den norske utenriksflåten består av bulkskip. Bulkskipene varierer fra små skip med egne kraner om bord for lasting/lossing i små havner, til store skip med lastekapasitet på opptil 400 000 tonn.

Bulkskipet har en enkel konstruksjon i forhold til de fleste andre skipstyper. Lasten lastes og losses med kraner gjennom store luker i dekket, og som oftest prioriteres stor last foran høy hastighet. Skipene kan deles inn i tre hovedtyper, som er kort beskrevet nedenfor.

Rene bulkskip (bulk-carriers). Disse har ett dekk med lasterom som går fra borde til borde, altså over hele skipets bredde.

Malmskip. (ore-carriers). Malmskipene skiller seg fra de rene bulkskipene ved at lasten er samlet mer mot midten av skipsrommene. Dette kommer av at malmlast er svært tung og ikke trenger store rom for å få en samlet vekt som tilsvarer skipets bæreevne. Sideveis begrenses rommene av langskipsskott, og en indre bunn legges i god høyde over kjølen for at lasten ikke skal bli liggende nær bunnen av skipet og forårsake dårlige sjøegenskaper.

Kombinasjonsskip. I skip for transport av malm og annen tung last vil det bli tomrom mellom sideskottene i lasterommene og skipssiden, samt under den høye dobbeltbunnen. Ofte er de tomme rommene innredet for å føre lettere laster når skipet ikke frakter den tunge lasten. De kan for eksempel nyttes til olje. Slike skip kalles kombinasjonsskip, og de betegnes som OBO-skip (oil, bulk and ore). I enkelte tilfeller er et skip beregnet spesielt på kombinasjonen olje og malm. Disse kalles gjerne for OO-skip.



Typisk utforming av et bulkskip

Størrelser av bulkskip:

- *"Handysize": 10-40 000 tdw*
- *"Handymax": 40-60 000 tdw*
- *"Panamax": 60-80 000 tdw*
- *"Capesize": > 80 000 tdw*

Capesize-skip er for store for Panamakanalen og må seile rundt Kapp Horn. I Suezkanalen kan dypgangen ikke overskride 18,91 m, ellers må det seiles rundt Kapp det Gode Håp. For skip som ikke kan passere noen av de to kanalene, kommer gjerne et stort sprang i størrelsene. De får ofte lastekapasiteter på over 150 000 DWT. Store skip har nemlig vesentlig bedre transport-effektivitet enn mindre skip.

Beskrivelse av skipstyper

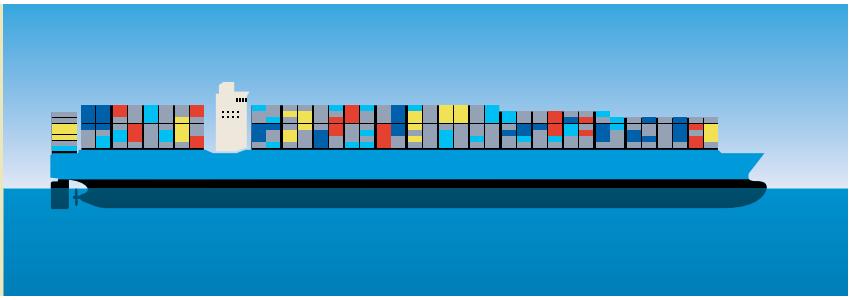
Skip for frakt av stykkgods

Rotterdam havn, Europas største havneanlegg *(postofrotterdam.com)*

Med stykkgods mener vi last som blir fraktet i større eller mindre enheter, ofte med en eller annen form for emballasje. Det finnes en mengde forskjellige skipstyper innen denne gruppen, alt etter hvilken sort last de i hovedsak er beregnet for, hvilke laste- og lossemetoder som er mest hensiktsmessig, osv.Ikke alle disse typene vil bli beskrevet her, men vi skal ta for oss et containerskip og et Ro-Ro-skip.

Containerskip

Eksempel på data for et slikt skip
Lasteevne: 5000 TEU
Total lengde: L_{oa} = 295 m
Lengde/bredde-forhold: L_{oa}/B = 9,2
Prosjektert hastighet: 22 knop
Hovedmotor: én saktegående hovem.
Hovedmotoreffekt: 40 MW
Brenselsforbruk: 2 - 4 g/(tonn-km)
Nummerering i figur side 3-19: 6



Så lenge det er plass til en vare i en container, kan den transporteres med et containerskip. Denne metoden for å frakte et vidt utvalg av varer har gitt containerskipet sin suksess.

Containerskip tilhørende det danske rederiet Maersk Line, som er verdens største container-skipsrederi, (se maersk.com). *Rederiet vil i 2011-2020 få levert ti stykker av verdens største containerskip på 18 000 TEU.*

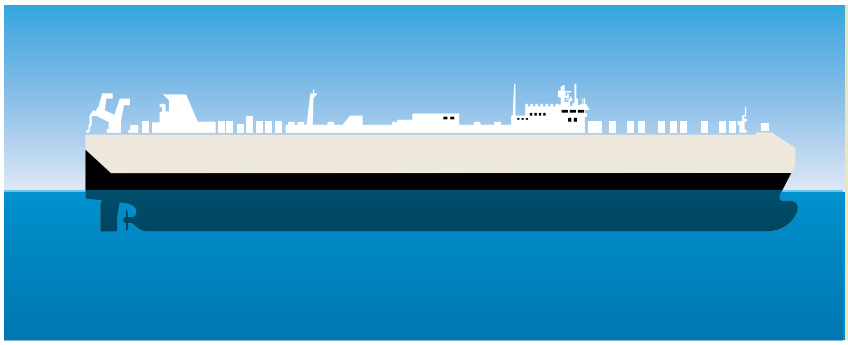
Et norskbygd containerskip (Ulstein) som kan leveres i flere varianter (950, 1200, 1800 og 2500 TEU)
Containere har to standardiserte hovedstørrelser på 20x 8x8,5 fot og 40x8x8,5 fot. En 20 fot lang container omtales som 1 TEU og størrelsen på containerskip beskrives med lastekapasiteten målt i antall TEU. Containerne stables i høyden både under dekk og på dekk. Vertikale skinner og vaiere holder containerne på plass.

Containeriseringen. Siden en internasjonal standard for container-størrelse (TEU) ble innført på 1960-tallet, har stadig mer last blitt ført i containere. Disse har blitt så velbrukte og effektive at de har blitt et symbol på global verdenshandel. Det finnes containere for de aller fleste vareslag. En container kan ta opptil 30 tonn last som lastes opp av avskiper og tas ut av mottaker. Løfting og håndtering av containere skjer med spesialutstyr og går raskt. En container lar seg lett laste mellom skip, tog, lastebiler og lektere, og under hele transporten forblir lasten innpakket og beskyttet mot vær og vind.

Overgangen til containere har fått navnet "containerization" på engelsk. De neste 25-50 årene ventes en øking i containerhandelen på hele 300-500 %. Containerskipene vil kunne ta 18000 TEU pr. skip. Skipets dypgang ventes da å bli begrenset av dybden av Malacca-stredet i Sørøst-Asia (21 m). Flaskehalsen i logistikkjeden er i dag innlandstrafikken og spesielt havnene, der både kraner og havnebassenger ikke helt holder følge med den økende skipsstørrelsen.

De fleste containerskip er på under 4000 TEU, tilsvarende ca. Panamax, mens de største skipene som seiler mellom kontinentene hittil har tatt opptil 13 500 TEU.

RoRo-skip



Data for skip brukt i eksempel
Lasteevne: 27000 DWT / 7700 ceu
Lengde : L_{pp} = 230 m
Bredde: 32,2m (Panamax)
Prosjektert hastighet: V = 19,5 knop
Maskineri: Én langsom totakter
Nummerering i figur side 3-19 : 7

Navnet "Ro-Ro-skip" kommer fra det engelske uttrykket "roll on, roll off". På disse skipene ruller lasten av og på skipet, gjerne via lasteramper akterut. Den vanligste lasten er personbiler, lastebiler, jernbanevogner og maskiner av ulike slag, men også annen last som kan trilles om bord, eksempelvis containere "på hjul".

Ro-Ro-skipet er kjent for sitt spesielle utseende. Skipet er høyt. Det består av mange dekk, der lastenhetene kan bli oppbevart så tett inntil hverandre som mulig. De største Ro-Ro-skipene, med en lengde på over 200 m, har en lastekapasitet på opptil 7000 biler. Typisk hastighet for et Ro-Ro-skip er 18-20 knop.

De norske rederiene Leif Høegh & Co og Wilh. Wilhelmsen (i samarbeid med Wallenius Lines Stockholm og Eukor Car Carriers Seoul) har de største Ro-Ro-flåtene i verden. De spesialiserer seg på PCTC-er (Pure Car and Truck Carrier) og PCC-er (Pure Car Carrier). En PCTC kan, i motsetning til en PCC, regulere høyden mellom dekkene for å få plass til høyere last, for eksempel lastebiler.

"Høegh New York", Ro-Ro-skip for biler og annen rullende last. *De største bilskipene kan ta opp-til 7000 biler, mer enn ti ganger så mange som vist på dette bildet. Fra [9.5]. Foto Leif Høegh & Co.*

Beskrivelse av skipstyper

Serviceskip for offshorevirksomheten

Skip som brukes i olje- og gassutvinningen

Skip for leting etter olje/gass:
- *Seismikkskip (se side 10-6)*
- *Borefartøyer/rigger (side 10-7).*
  - *Halvt nedsenkbare borerigger*
  - *Oppjekkbare borerigger*
  - *Boreskip*
  - *Borelektere (for grunt vann)*

Serviceskip for offshorevirksomheten:
- *Forsyningsskip (se neste side)*
- *Ankerhåndteringsskip (se side 10-29)*
- *Slepebåter*
- *Skip med "moon pool" (åpning i bunnen) for blant annet:*
  - *Undersøkelse av havbunnen*
  - *Oppmåling av havbunnen*
  - *Diverse arbeid på havbunnen*
  - *Utsettelse av ROV og oppfølging av ROV-relatert arbeid)*
- *"Konstruksjonsskip" (for installasjonsarbeid på havbunnen)*
- *Kranfartøyer (se side 8-2)*
- *Rørleggingsfartøyer (se side 10-22)*
- *Skip for brønnstimulering (utstyrt med pumper og tanker for å sette ekstra trykk på reservoarene)*
- *Stand-by-skip (beredskapsskip)*

Skip for produksjon og ilandføring av olje og gass:
- *Produksjonsskip (FPSO-skip, "Floating Production/ Storage/Offshore loading",se sidene 9-24 og 10-36)*
- *Skip for lagring og omlasting til tankskip (FSO-skip, "Floating Storage/Offshore loading")*
- *Bøyelastere, som fortøyes og kobles til flytende lastebøyer*
- *Nedsenkede bøyelastere, med lastebrønn i bunnen for tilkopling av lastebøyer under vann*

Da den første oljen ble funnet på norsk sokkel i 1969, var norske rederier tidlig ute med å lære ny teknologi den nye næringen medegnede fartøyer. I dag er offshorevirksomheten et kjerneområde for mange rederier, som tilbyr utbyggere og operatører spesialfartøyer for alle faser i olje- og gassutvinningen.

Offshoreflåtens betydning

Arbeidshester trengs også til sjøs. Offshoreflåtens betydning. Arbeidshester trengs også til sjøs. I neste kapittel skal vi ta for oss olje- og gassutvinning til havs og vise hvor avhengig denne virksomheten er av serviceskip av forskjellige typer. En kortfattet oversikt er gitt til venstre og i et collage på sidene 9-38/39. Det vil føre altfor langt å beskrive alle disse nærmere, og vi må nøye oss med å se på én av typene. Det er da naturlig å velge ut et forsyningsskip. Dette er skip som av mange kalles *Nordsjøens arbeidshester.*

Verdiskapingen i offshoreflåten femdoblet på 10 år. Ifølge sidene 9-20/21 omfatter den norske offshoreflåten mer enn 500 fartøyer og ga i 2010 en verdiskaping på 25 mrd. kr. Dette er mer enn hele handelsflåten bidro med i samme år, på tross av at denne i samlet tonnasje var nesten 20 ganger så stor som offshoreflåten. Årsaken til dette er at den teknologiske utviklingen av de norske serviceskipene har gjort dem til meget avanserte skip som etterspørres på markeder over hele verden. Dessuten har investeringene i den norske offshorenæringen ikke avtatt selv om oljeproduksjonen har stagnert. Det har derfor stadig vært et stort marked for denne flåten også hjemme.

Skipstyper i offshoreflåten

Betydningen av å ha en sterk maritim klynge (se side 9-21) kommer tydelig fram blant annet i offshorenæringen. Norske offshorerederier, verft og utstyrsleverandører har i fellesskap utviklet en rekke høyteknologiske skipstyper som har gjort flåten verdenskjent. Arbeidet har for en stor del foregått i distrikter med tradisjonelt sterke skipsfartsmiljøer, som Hordaland, Rogaland, Agder og Møre og Romsdal.

Plassen tillater bare å nevne disse skipstypene i stikkordsform (se boksen til venstre). Bruksområder for skipene framgår delvis av sidehenvisningene i boksen.

Forsyningsskip

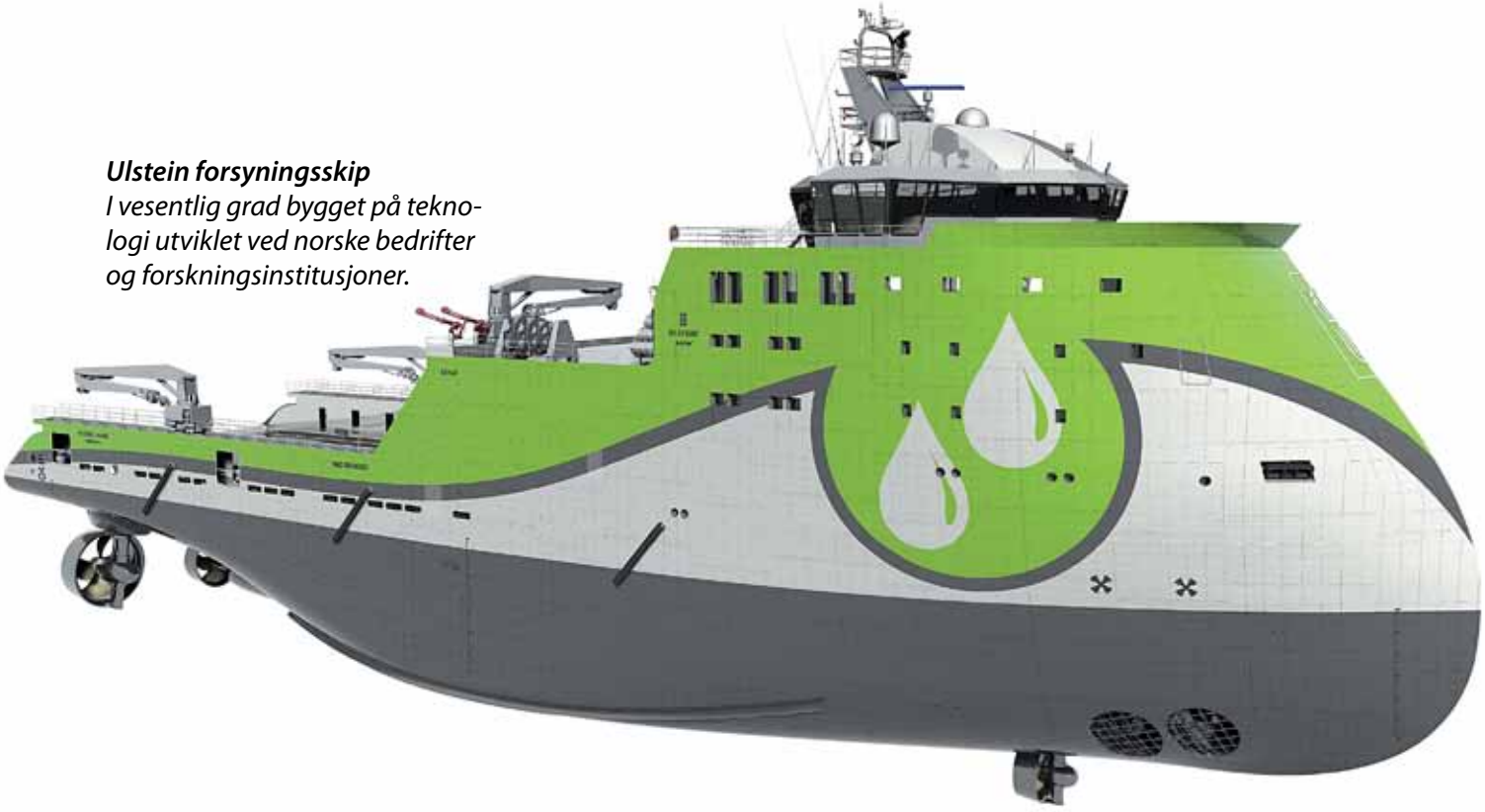
Data for skip brukt i eksempel
Tonnasje: 4300 DWT
Lengde : L_{pp} = 88 m
Bredde: B = 23 m
Prosjektert hastighet: 17 knop
Maskineri: diesel-elektrisk propulsjon
Nummerering i figur side 3-19 : 8

Forsyningsskipets primære formål er å bringe forsyninger ut til installasjoner i havet. Dette er utstyr og forråd som trengs under alle faser av utbygging og drift av et felt. Forsyningsskipene eksisterer i en rekke varianter, men de har flere fellestrekk. Det mest karakteristiske er det åpne lastedekket som gir plass til en vrimmel av forskjellige typer last. Skipene har tanker nede i skroget for føring av vann, boreslam, oljer, sement og annen last.

Ofte må forsyningsskipene ligge tett inntil rigger og plattformer som de skal levere til. Mange er derfor utstyrt med system for dynamisk posisjonering (se kapittel 8), og alle har god manøvrerbarhet. Forsyningsskipene er også ofte utstyrt for beredskapsoppgaver, for eksempel brannbekjempelse, opphenting av personell fra sjøen, osv. Den gode manøvrerbarheten fordrer et kraftig maskineri, rask og sterk rormaskin og tverrpropeller i forskip og akterskip.

Lastedekk på et forsyningsskip

Ulstein forsyningsskip
I vesentlig grad bygget på teknologi utviklet ved norske bedrifter og forskningsinstitusjoner.



Beskrivelse av skipstyper

Cruiseskip

1970 Song of Norway 18 400 GT og 377 lugarer

1982 Song of America. 37 600 GT og 707 lugarer

1996 Grandeur of the Seas 74 000 GT og 975 lugarer

1999 Voyager of the Seas 137 300 GT og 1557 lugarer

2006 Freedom of the Seas 158 000 GT og 1816 lugarer

2009 Oasis of the Seas 220 000 GT og 2700 lugarer

Utvikling. Den norske cruisenæringen hadde sin storhetstid på 1970-tallet, med rederier som Fred Olsen Cruises, Den Norske Amerikalinje og Norwegian Cruise Lines. I dag er det meste av det norske eierskapet solgt til utlandet, men tradisjonene lever videre i delvis norskeide rederier som Royal Caribbean Cruiselines og Fred Olsen Cruise Line, der det markedsføres som en merkevare.

Et cruiseskip kan sees på som et flytende hotell, der hotell- og underholdningsbransjen møter det skipstekniske. Cruiseferier har tidligere vært ansett som en noe spesiell ferievariant, men med nye og moderne cruiseskip har konseptet begynt å appellere til flere. Hvert år reiser rundt 14 millioner passasjerer på cruiseferie, rundt to tredjedeler av disse er amerikanere.

Golfbaner, klatrevegger og joggeløyper. Cruiseskipene har de siste årene vokst seg større og større. Per dags dato er Royal Caribbean Cruiselines tvillingskipene Oasis of the Seas og Allure of the Seas fra STX Europe-verftet i Finland (tidligere Aker Yards) blant de største cruiseskipene i verden (7000 passasjerer), men større skip er på vei. Rederiene konkurrerer om å tilby passasjerene den beste underholdningen og derfor finner vi både golfbaner, skøytebaner, badebassenger, klatrevegger, teatersaler og joggeløyper på dagens største cruiseskip. Hvem vet hva morgendagens mariningeniører får til på framtidens cruiseskip?

Utvikling av cruiseskip fra rederiet Royal Caribbean International, bygget ved STX Europe skipsverft i Finland.

Nedenfor: Fasiliteter på hoveddekk

2010 Allure of the Seas 220 000 DWT

Eksempel på data for et slikt skip
Lasteevne: 225 000 GT
Passasjerer: 6933
Total lengde: L_{oa} = 360 m
Lengde/bredde-forhold: Loa/B = 7,7
Dypgang: 9,15 m
Prosjektert hastighet: 22 knop
Hovedmotor: diesel-elektrisk.
Hovedmotoreffekt: 60 MW
Totaleffekt produsert: 97 MW
Nummerering i figur side 3-19: 9

Beskrivelse av skipstyper

Skip for frakt av passasjerer og biler

Internasjonale ferger – cruiseferger og super-speed-ferger

Eksempel på data for et slikt skip
Lasteevne: 5400 DWT, 750 personbiler, 117 trailere
Total lengde: 210 m
Lengde/bredde-forhold: $L_{oa}/B = 8,5$
Prosjektert hastighet: 28 knop
Hovedmotor: diesel-elektrisk
Hovedmotoreffekt: 35 MW
Nummerering i figur side 3-19: 10

Med Skagerak og Nordsjøen som barriere mellom Norge og kontinentet, har fergene blitt et viktig transportmiddel for handel og reiser til og fra Europa. Det transporteres årlig seks millioner passasjerer og rundt en million biler til og fra Norge med ferger. Transport med ferge kan nemlig konkurrere med vei og jernbane på både tid og pris, og i tillegg tilby de reisende både avslapning og underholdning.

De største fergedestinasjonene fra Norge er Hirtshals, Kiel, Fredrikshavn, København og Newcastle. Fergene som traffikerer disse rutene kalles Ro-Pax-ferger (Ro-Ro-skip med passasjerfasiliteter).

"Pendelferger" – del av det offentlige veinettet

Fergetrafikken er svært viktig for innenlands samferdsel. Hvert år reiser rundt 44 millioner passasjerer med ferger i Norge. Trafikken opprettholdes av ca. 150 ferger. Norges geografi, dominert av fjorder og fjell, har gjort at fergene er av sentral betydning for bosetning og næringsvirksomhet langs kysten. De fleste fergene er av "pendeltype", det vil si Ro-Ro-ferger hvor personbiler, vogntog og busser kan kjøre på og av gjennom porter i begge ender, samtidig som fergene har mulighet til å seile like godt i begge retninger.

Også fergene blir mer avanserte, med gassmotorer og elektrisk drevne thruster-propeller. Det vises til sidene 9-40 om miljøutfordringer. Problemene knytter seg til utslipp fra framdriftsmaskineriet om bord. I nærsjøtrafikken er det de helseskadelig utslippene NO_x, SO_2 og partikler fra dieselmotorer som er av størst betydning for lokale bosetninger. I nye ferger erstattes derfor dieselmotorer med mer miljøvennlige gassmotorer (se figurteksten). I 2015 kommer også elektrisk drevne ferger.

Ro-Pax-ferger
De fleste Ro-Pax-ferger kan tilby alle sine passasjerer lugarer, underholdning, tax-free-butikker og konferanserom. De markedsfører seg selv som *cruiseferger*. På den andre siden finnes det ferger som fokuserer på fart og effektivitet. Color Lines *super-speed-ferger* er eksempler på dette. De opererer mellom Larvik/Kristiansand og Hirtshals og har en overfartstid på under fire timer.

Verdens første batteriferge er norsk
I 2015 vil biler bli fraktet over Sognefjorden med batteriferge. Kapasitet: 120 biler, 360 passasjerer. Lengde: 80 m Lengde/bredde-forhold: 3,8 Batteripakken tilsvarer 1600 bilbatterier, med en masse på ti tonn og et volum på 5 m x 2 m x 1 m. Fart ti knop.

Bergensfjord, en av fem gassferger for E39-sambandet mellom Stavanger og Bergen.
Kapasitet: 200 personbiler eller 100 personbiler og 22 vogntog på to dekk. Lengde: 129 m. Hovedmaskineriet består av tre Rolls-Royce gassmotorer. Disse driver elektriske generatorer, som leverer strøm til thrusterpropeller. Reduksjon av skadelige utslipp: *se side 7-29.*

Anløpssteder for noen regionale hurtigbåtruter i Norge
Flaggruten: Stavanger-Kopervik-Haugesund-Leirvik-Bergen
Kystekspressen: Kristiansund- Tjeldbergodden-Brekstad-Trondheim
Nordlandsekspressen: Sandnessjøen-Bodø-Svolvær-Narvik
Troms: Tromsø- Finnsnes-Harstad

Kjente norske hurtigbåtverft
Båtservice Mandal as, Mandal
Fjellstrand AS, Omastrand
Oma Baatbyggeri a.s, Leirvik

Hurtigbåter – brukt i lokalruter langs hele kysten

Langs norskekysten er det mange steder, langs fjorder og på store og små øyer, som ikke har forbindelse med veinettet. Forbindelsen mellom disse stedene opprettholdes av regionale og lokale ruteselskaper som frakter til sammen mer enn 5 mill. passasjerer årlig, fordelt på 86 hurtigbåter og over strekninger på mer enn 6000 km totalt.

Passasjerer skal vanligvis fort fram, noe som forutsetter bruk av hurtiggående båter, såkalte hurtigbåter. I tillegg til passasjertransport, tar båtene også noe gods og på enkelte ruter noen biler.

Du kan lese mer om hva som karakteriserer slike hurtigbåter (samt de enkelte typenes fordeler og ulemper) på sidene fra 3-18 til 3-23.

Katamaraner mest brukt. I norske farvann vil særlig helårsrutene oppleve svært barske sjø- og værforhold. Tidligere nevnte vurderinger av sjøegenskaper gir som hovedkonklusjon at det er katamaraner som gir passasjerene den beste komforten Derfor brukes disse også mest. Utenlands kan vi ofte treffe på alle de andre typene som er vist på side 8-17. Vi kan ikke bruke plass på alle disse, og nøyer oss med å presentere en katamarantype. Den er utviklet og bygd i Norge, men mye brukt også i andre land.

Spesifikasjoner for fartøyet Flying Cat, Kværner Fjellstrand katamaran
Lasteevne: 35 DWT
Antall passasjerer: 300
Total lengde: Loa = 37,6 m
Dypgang: ca. 1,6 m
Bredde: 10,4 m
Prosjektert hastighet: 35 knop
Hastighet ved MCR: 37 knop
Type hovedmotor: to hurtige 4-takts motorer (MWM)
Hovedmotor effekt: 2x2012 kW (MCR)
Framdriftssystem: KaMeWa vannjet
Fartøyet er bygd i aluminium
Nummerering i figur side 3-19: B2

Hurtigruta – også et cruiseskip

Langs norskekysten opererer "Hurtigruten", som kombinerer cruise med varetransport. Hurtigruta er langt mindre enn de store cruiseskipene, men appellerer til utenlandske turister som vil kombinere naturopplevelser med cruiseskipets komfort. Hurtigruteskipene er blitt verdenskjente, og du kan lese mer om selskapet og turopplegget på side 2-5. Nylig har "Hurtigruten" startet et nytt konsept med turer fra Sør-Amerika til Antarktis.

Eksempel på data for et slikt skip
Lasteevne: 1150 DWT,
Passasjerer: 6300
Total lengde: 36 m
Lengde/bredde-forhold: Loa/B = 6,3
Prosjektert hastighet: 16 knop
Hovedmotor: diesel-elektrisk
Hovedmotoreffekt: 8,3 kW
Nummerering i figur side 3-19: 11

Beskrivelse av skipstyper

Fartøyer i det norske sjøforsvaret

Skipene i et lands sjøforsvar har som funksjon å hevde suverenitet over havområder, beskytte landets skip og andre interesser til havs, delta i redningsoperasjoner samt utføre militære operasjoner til havs og langs kysten.

Litt om moderne marinefartøyer

Et moderne krigsskip er en meget teknisk avansert konstruksjon. Ofte har militære fartøyer vært banebrytende i å ta i bruk ny teknologi. Dagens krigsskip er utstyrt med missiler som sitt fremste våpen, og slik krigføring setter store krav til radar- og kommunikasjonssystemene om bord.

Moderne stealth-teknologi. Det er også viktig å unngå å bli oppdaget av fiendtlige radarsystemer. Derfor utføres mange nye skip med såkalt stealth-teknologi. Skroget bygges da i radarabsorberende materialer og med vinkler som reflekterer radarsignalene vekk fra avsenderen. For eksempel er den norske kystkorvetten i Skjold-klassen blitt verdenskjent for sine stealth-egenskaper.

Signaturer. Videre er det viktig at krigsskipet avgir så lite lyd og varme som mulig for ikke å bli fanget opp av infrarøde og akustiske sensorer. Summen av akustikk, varme og reflekterte radarsignaler som kan fanges opp av fienden, kalles skipets signatur. En av mariningeniørens fremste utfordringer når det kommer til militærfartøyer, er å redusere disse signaturene til et minimum, eller å sørge for at skipet avgir en signatur som gir feilaktig informasjon til fienden.

Skipstyper i det norske sjøforsvaret

Sjøforsvaret har en rekke skipstyper som kan karakteriseres som kampfartøyer. Disse omfatter:

- fem fregatter av Fridtjof Nansen-klassen
- seks kystkorvetter av Skjold-klassen
- åtte minesveipere, 4 av Alta- og 4 av Oksøy-klassen
- seks undervannsbåter av Ula-klassen
- 16 stridsbåter av type S90N
- etterretningsfartøyet "Marjata"

Kystvaktens hovedoppgaver er å beskytte naturressurser, stå i oljevernberedskap, kontrollere fiskeriene og drive søk og redning. Det skilles mellom indre og ytre kystvakt med henholdsvis kystnære og havgående tjenesteområder. Kystvakten har idag 14 skip i klassene Nordkapp, Nornen, Barentshav og den isforskerkede KV "Svalbard" (se figur). Heimevernet har også anskaeffet fartøyer av Nornen-klasse.

Marinens skipstyper er presentert på de neste sidene. Fartøyene er også merket av på L-v-diagrammet på side 3-19. Generelt kan du for øvrig lese mer om hurtiggående fartøyer, blant annet SES, på sidene fra 3-18 til 3-23.

Undringsoppgave: Hva er "stelth" en forkortelse for?

Tekniske data Stridsbåt 90N
Dimensjoner: 16,1 m x 3,8 m
Deplasement: 18,5 tonn
Dypgående: 0,8 m. Besetning: 4
Hastighet: 36–40 knop. Framdriftsmaskineri: to stk dieselmotorer, 460 kW, som driver hver sin vannjet KAMEWA FF Jet 410
Nummerering i figur side 3-19: C1

Taktisk båtskvadron er en del av Marinens Jegervåpen. Norge har 16 båter av denne typen. Stridsbåt 90N finnes i variantene gruppebåt, ledelsesbåt og sanitetsbåt.

Modell av norsk angrepsubåt anno 1808. *Båten var konstruert av "bygdegeniet" Mikkel Hallsteinson Lofthus fra Ullensvang. Han var æret som "Danebrogsmand" fordi han hadde konstruert vannverk og en rekke maskiner til bruk på bygdene. Ubåten skulle ros med flere roere og settes inn mot engelske skip som blokkerte norske farvann under Napoleonskrigene, (se side 9-7 nederst).*

Kystkorvett: Skjold-klassen

Tekniske data:
Dimensjoner: 47,5 m (lengde)- 13,5 m (bredde)- 15 m (maks høyde)- 2,5 til 0.8 m (dypgang).
Deplasement: 273 tonn
Besetning: 20+
Hastighet: 47 knop (transitt) - maks 60 knop
Framdriftsmaskineri: COGAG med vannjet, to gassturbiner, Pratt & Whitney ST 18M, 2000 kW og to gassturbiner Pratt & Whitney ST 40M , 4000 kW. I tillegg to diesel-motorer, MTU 12V183, 735 kW, for drift av løftevifter. Nummerering i figur side 3-19: E1

Norge har anskaffet seks kystkorvetter av Skjold-klassen. De er utviklet av Sjøforsvarets Forsyningskommando og bygget i Mandal ved verftet Umoe Mandal. Fartøyene er av type SES (Surface Effect Ship)-katamaran. Det vil si et katamaranskrog hvor det mellom skrogene er montert fleksible skjørt, ett ved baugen og ett akterut. Store vifter pumper luft inn i det lukkede rommet. Ved å regulere trykket, kan dypgangen reduseres. Dette vil føre til lav motstand. Fartøyet kan dermed oppnå høy hastighet. Byggematerialet er fiberforsterket plast. Kystkorvettenes primære oppgaver i fredstid er tilstedeværelse og suverenitetshevdelse i kystnære farvann under norsk jurisdiksjon. Fartøyene er svært mobile. De er også godt egnet til deltakelse i søk- og redningsoperasjoner og kan yte bistand til spesialstyrker i kystsonen.

Fregatt: Fridtjof Nansen-klassen

Tekniske data:
Dimensjoner: 134 m (lengde)- 16,8 m (bredde)- 31 m (maks høyde)- 7,60 (dypgang).
Deplasement: 5290 tonn
Besetning: 120+
Hastighet: 26 knop
Framdriftsmaskineri: CODAG med vripropellanlegg, to diesel-motorer, Bazan Bravo V12, 4500 kW og 1 gassturbin GE LM2500, 21500 kW.
Nummerering i figur side 3-19: 12

Fregattene er de store arbeidshestene i Sjøforsvaret. Norge har fem stykker. De er satt sammen og utrustet i Spania ved marineverftet Navantia i byen Ferrol i perioden 2003—2011. Fregattene er utstyrt for å bekjempe trusler i alle de maritime krigføringsområdene: i luften, på overflaten og under vann. Fregattene vil også operere NH90-helikoptre.

Minefartøy: Oksøy- og Alta-klassen

Tekniske data:
Dimensjoner: 55,2 m (lengde)- 13,6 m (bredde)- 21 m (høyde)- 2,5–0,84 m (dypgang)
Deplasement: 375 tonn
Besetning: 32+
Hastighet: 23 knop
Framdrifstmaskineri: to dieselmotorer MTU 12V 396 TE84 som driver hver sin vannjet, produsert av Kværner Eureka. I tillegg 2 dieselmotorer, MTU V8 396 TE54, for drift av løftevifter.
Nummerering i figur side 3-19: E2

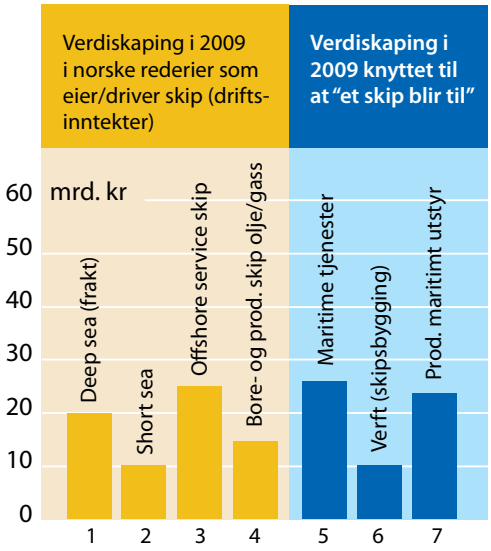
Minerydderfartøyene er bygget ved verftet Kværner Mandal (nå Umoe Mandal). De ble levert i tidsrommet 1990—1997. De er konstruert etter samme prinsipp som Skjold-klassen (SES). Byggematerialet er også her fiberforsterket plast. Fartøyene har lave signaturer slik at undervannsminer ikke skal eksplodere når fartøyet er i nærheten. Samtidig gir konseptet høy overlevelsesevne mot undervannseksplosjoner. Sjøforsvarets har seks mineryddingsfartøyer, tre minesveipere (Alta-klassen) og tre minejaktfartøyer (Oksøy-klassen). Minefartøyene har som oppgave å holde nasjonale og internasjonale farvann fri for miner. Sjøforsvaret har som hovedregel alltid et minefartøy i Natos stående minerydderstyrke. Fartøyene samarbeider tett med Minedykkerkommandoen i operasjoner som inkluderer minedykking og eksplosivrydding.

Undervannsbåter: Ula-klassen

Tekniske data:
Dimensjoner: 59 m (lengde)- 5,4 m (bredde)- 4,6 m (dybde).
Deplasement: 1040 tonn (overflate)- 1150 tonn (neddykket)
Besetning: 21+
Hastighet: 11 knop (overflate) – 23 knop (neddykket)
Framdrifstmaskineri: elektriske batterier og dieselelektrisk. Siemens elektromotor, 2000 kW, to dieselgeneratorer MTU 396 SB83, 970 kW.

Norge har seks Ula-klasse undervannsbåter. De er bygget i Tyskland, ved verftet Thyssen Nordseewerke i perioden 1983—1992. En undervannsbåt kan operere skjult over lengre tidsperioder, er vanskelige å oppdage og fører våpen med stor ildkraft. De vil binde opp store fiendtlige ressurser. Det er en høy terskel for å operere mot land som besitter denne typen kapasiteter.

Et skip blir til – hvem gjør hva ?



Verdiskaping 2009 i den norske, maritime næringen.
Det er viktig å være klar over at den maritime næringen kommer i tillegg til næringen som omfatter olje/gass-utvinningen (neste hovedkap.). For å tydeliggjøre dette kan vi kanskje også kalle den maritime næringen for skipsrelatert næring.

Den maritime næringen er den nest største av våre konkurranseutsatte næringer, etter olje/gass-næringen. Den ga i 2009 totalt en verdiskaping på 132 milliarder kr. Som det også framgår på side 9-21, kan vi dele inn den maritime rederinæringen i fire undergrupper. Nr tre og fire i disse gruppene er den skipsrelaterte andel som kommer i tillegg til den øvrige verdiskaping i olje/gass-næringen (som utgjorde 530 mrd. kr i 2009).

Hele næringsklyngen er viktig. Vi ser av illustrasjonen av den norske, maritime næringsklyngen øverst på side 9-21 at verdiskapingen i den maritime næringen ikke bare skjer i rederiene. Det er riktignok disse som er ansvarlige for operasjon og drift av alle de skip vi har beskrevet foran, men alt som skjer *før skipene blir til*, gir også betydelige verdiskapinger. Vi sikter da til virksomhetene som i klyngen er gruppert som

- maritime tjenester, 27 mrd. kr i verdiskaping i 2009
- verft, 10 mrd. kr i verdiskaping i 2009
- produksjon av maritimt utstyr, 24 mrd. i verdiskaping i 2009.

Til sammen blir dette 61 mrd. kr i verdiskaping. Dette er nesten like mye som det totalt genereres av virksomhetene i rederiene, som gjerne deles inn i gruppene "deepsea"-, "shortsea"-, "offshore boring/produksjons"- og "offshore service"-rederier.

Store skip, som for eksempel enkle tank-, bulk- og containerskip for "deepsea"rederiene, bygges ved utenlandske verft. Ofte er det da snakk om seriebygde skip av mer eller mindre standard utførelser.

I Norge bygges det i dag særlig mindre og mellomstore skip. Det er klart at "offshore service"-rederienes behov står sentralt. Den opplisting av skipstyper som er gjort på side 9-28, forteller derfor stort sett også hva som står i verftenes ordrebøker. Som tidligere nevnt er dette oftest spesialskip som krever avanserte tekniske løsninger. Også ferger og andre skip for "shortsea"-rederiene , samt oppdrag for "offshore boring/produksjons"-rederiene er viktige oppdrag for de norske verftene.

Fase 1: Idé, forprosjekt, beslutning om nytt skip.

Hovedaktører: rederiets kommersielle og tekniske avdelinger

Idé. Idé om et nytt skip kommer som oftest fra rederiet selv. Årsaken kan være at et skip i flåten er blitt for gammelt og umoderne og bør erstattes, eller at rederiet ønsker å ekspandere. Behovet for et nytt skip kan også påpekes av skipets bemanning eller de som har leiet skipet til frakt eller annet oppdrag.

Hovedspesifikasjoner fastlegges. Ideen om det nye skipet vurderes nærmere av rederiets kommersielle og tekniske ledelse. De vil analysere en lang rekke forhold om markeder, skipets kapasitet, hastighet, egenskaper, osv. Dersom konklusjonen av disse analysene blir positive, vil samtidig skipets hovedspesifikasjoner bli fastlagt.

Fase 2. Prosjektering av skipet. Modellprøving.

Hovedaktører: skipstekniske konsulenter, skipsmodelltank og rederiets tekniske avdeling

Prosjektering av skipet. Skipstekniske konsulenter. Når hovedspesifikasjonene er fastlagt, vil neste fase være det vi kaller prosjektering. Dette vil si at man fastlegger utformingen og planløsningen av

skipet, slik at det tilfredsstiller rederiets krav. Samtidig må det gjøres nødvendige beregninger av stabilitet og styrkemessige forhold. Prosjekteringsfasen avsluttes med at det utarbeides et sett med arbeidstegninger. Som regel er ikke rederiene selv dimensjonert for å ta seg av dette omfattende arbeidet med egne ansatte. Derfor blir det satt bort til skipstekniske konsulenter. Disse innehar stor erfaring og kompetanse fra tidligere, lignende oppdrag og *utgjør en meget viktig del av den gruppen som i den maritime næringsklyngen er kalt "maritime tjenester", se side 9-21*.

Modellprøving for fastlegging av skipets effektbehov (se sidene 3-16/17). Dette foregår i en slepetank, som regel ved Marinteknisk senter i Trondheim. Det finnes også en mindre slepetank ved Høgskolen i Bergen. Som regel er den skipstekniske konsulenten og en representant for rederiet til stede under modellprøvingen, som utføres av slepetankens spesialister.

Fase 3. Utvelgelse av verft. Fullføring av konstruksjonsarbeidet. Godkjenning fra klasseselskap.

Hovedaktører: skipsmeglere, skipstekniske konsulenter, ingeniører ved verft, utstyrsleverandører og klasseselskap.

Nå har planleggingen av det nye skipet kommet så langt at man kan begynne å tenke på hvilke verft som kan være aktuelle for å bygge skipet. Her trekkes ofte et såkalt skipsmeglerfirma inn. Disse har gjerne egne kontraheringsavdelinger med gode markedskontakter og gode kunnskaper om de ulike verftene. Etter forespørsler om pris- og leveringsbetingelser velges et av verftene ut og byggekontrakt tegnes. I samarbeid med verftets og rederiets folk, fullfører nå skipskonsulentene konstruksjonarbeidet. Samtidig kontaktes et såkalt klasseselskap, som regel Det Norske Veritas, som må godkjenne alle tegninger.

Fase 4. Bygging og utrustning.

Hovedaktører: rederi, klasseselskap, verft og utstyrsleverandører.

Alt må skje i riktig rekkefølge. Byggingen av skipet er en komplisert prosess. I tillegg til byggingen av selve skroget (stålarbeidet) kommer det inn masse utstyr fra en meget lang rekke underleverandører (se boks i marg). Alt dette utstyret skal monteres, noe som ofte er den mest kompliserte del av hele prosessen. Derfor ser vi ofte at stålarbeidet settes bort til utenlandske verft. Skroget slepes så til Norge, og utstyret monteres her, under streng kontroll av representanter fra klasseselskap, tekniske konsulenter og rederiets tekniske avdeling. Utover i 2010-årene har det imidlertid blitt mer og mer vanlig å bygge skrog her hjemme, ved hjelp av hurtigarbeidende sveiseroboter.

Fase 5. Testing, utprøving og overlevering.

Hovedaktører: verft, skipsteniske konsulenter og rederiet.

Mye av utstyret testes løpende etter hvert som det monteres. Den endelige testen blir imidlertid det som skjer under én eller flere prøveturer. Da er representanter fra alle involverte parter til stede: rederiet, skipstekniske konsulenter, verftet, utstyrsleverandører, klasseselskap, myndigheter, osv. Til slutt overtar rederiet ansvaret for skipet og får utlevert alle nødvendige godkjenningspapirer. Først da er skipet klart til å gjøre sin første "jobb".

Maritime tjenester/teknologitjenester
Innen gruppen maritime tjenester er teknologitjenester klart den største. Slik det framgår av hovedteksten, omfatter disse blant annet skipstekniske konsulenter, andre ingeniørtjenester, tjenester fra klasseselskaper, modellprøvingsanstalt, forskningsinstitutter osv. Her utgjør mariningeniører en meget stor og viktig ressurs.

Hva slags utstyr trenger et skip? Produsenter og utstyrsleverandører er en meget viktig gruppe i den maritime næringsklyngen.

Det er behov for en nesten utrolig mengde utstyr i et moderne skip. Mesteparten av alt dette utstyret er ofte teknologisk meget avansert og krever topp kompetanse hos leverandørene.

Utstyret kan omfatte:
- **Framdriftssystemer:** dieselmotorer, gir, pumper, varmevekslere, propeller/vannjet og thrustere
- **Elektriske systemer:** hjelpemotor med gir og generatorer, elektriske motorer og annet elektrisk utstyr
- **Elektronisk utstyr for:** navigasjon, posisjonering, kommunikasjon, regulering og automasjon
- **Lasthåndteringsutstyr:** kraner, pumper og hydraulisk utstyr

Dette er bare et lite utvalg av utstyr som alle skip trenger. Lista kunne vært gjort svært mye lengre. Ser vi på spesialskip, for eksempel for offshore- eller fiskerivirksomhet, kan lista utvides ytterligere mange ganger. Se neste side.

Norskbygde skip. Norsk, maritim ingeniørkunst har gitt oss en ny stolthet: en flåte

Norske skipsverft

- STX OSV Aukra
  aukra@stxosv.com
- STX OSVBrattvaag
  brattvaag@stxosv.com
- STX OSV Brevik
  brevik@stxosv.com
- STX OSV Langsten
  langsten@stxosv.com
- STX OSV Søviknes
  søviknes@stxosv.com

STX OSV har også to skipsverft i Romania, ett i Vietnam og ett i Brasil. Videre har konsernet egne selskaper for design, elektriske, maskintekniske og automasjonstjenester/leveranser.

- **Ulsteingruppen**
  www.ulsteingroup.com

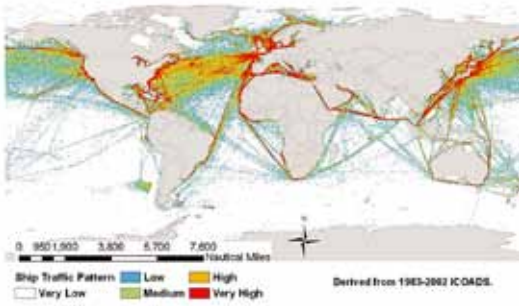
Gruppen er organisert i egne selskaper for:
Shipbuilding
Design &
Power & Control
Skipsbyggingen omfatter først og fremst serviceskip, men også tyngre skip, for offshorevirksomheten. Verftet bygger dessuten skip for "short sea"-virksomhet.

Bergen Group
www.bergen-group.no
Bergen Group har verft langs hele norskekysten fra Stavanger til Kirkenes. Gruppen har fire forretningsområder:
- skipsbygging
- vedlikehold/service
- offshore konstruksjoner
- maritim teknologi

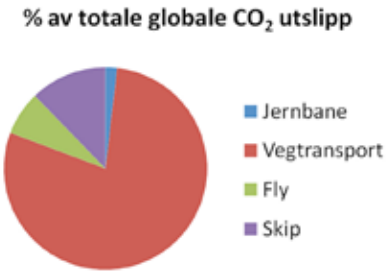
på mer enn 500 høyteknologiske service/ spesialskip som etterspørres på alle hav

Miljøutfordringer i skipsfarten

Kommentarer unødvendig



Skipstrafikk i verden
Kilde: 1983-2002 IC OADS



CO2-bidrag fra verdens transportsektor 2005.
Kilde: IMO GHG, study final report 2010

Skipsfarten må ta sin del. Skipsfart er klart den mest energieffektive transportformen og dermed også i utgangspunktet den mest miljøvennlige. Dette, i tillegg til at skipstrafikken i stor grad opererer i internasjonalt farvann, har gjort det vanskelig å enes om et felles globalt regelverk når det gjelder miljø. Men i de siste 10—20 årene har også fokuset for alvor blitt rettet mot skipsfarten, der internasjonale myndigheter i regi av IMO har satt i gang arbeidet med nytt regelverk for å begrense miljøbelastningen fra skip. Som en sentral del av dette innføres det nå avgassrestriksjoner for skip. I første omgang er det regionale krav som innføres i såkalte "emission control areas" (ECA) fra 2010. Av kartet på figuren til venstre ser vi at forurensing fra skip er et betydelig lokalt/regionalt problem. For eksempel finner vi store miljøbelastninger i kystnære områder. Derfor er det først og fremst disse områdene som nå blir definert som "emission control areas" (ECA), og som innfører avgassrestriksjoner.

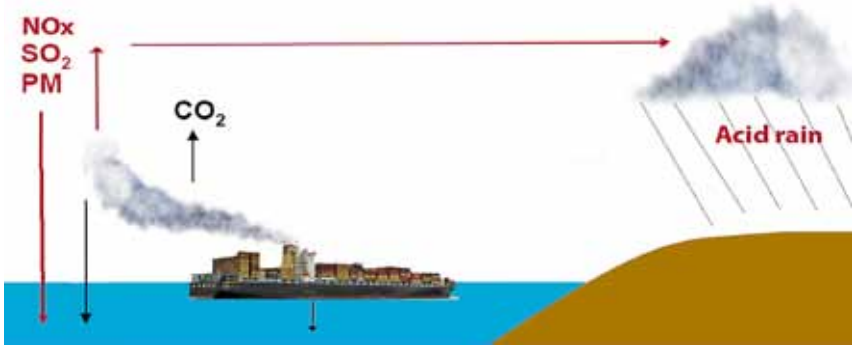
Miljøteknologi for kjøretøy kan utnyttes. I motsetning til skipsfarten har landbasert transport blitt pålagt svært strenge miljørestriksjoner. Grunnen til dette er at landbasert forurensning forårsaker til dels store lokale miljøproblemer, mens skipsfarten i større grad har operert "utenfor synsfeltet". Dette har ført fram til teknologi og løsninger ved dagens kjøretøyer som gir svært lave avgassutslipp, sammenlignet med skipstrafikken. Bilprodusentene har jobbet knallhardt for å utvikle løsninger som reduserer utslippene, mens skipsnæringen ikke har hatt samme fokus på denne utfordringen. Dette betyr i praksis at det allerede er utviklet miljøteknologi for kjøretøy, som nå også kan overføres til bruk på skip.

Hva slags forurensing snakker vi om?

Miljøbelastingene fra skipsfarten kan deles inn i atmosfærisk forurensning og forurensning til sjø. Atmosfærisk forurensning er stort sett det som kommer som avgasser fra forbrenning av fossile brensler, mens forurensning til sjøen i stor grad er forårsaket av lekkasjer, vaskeprosesser, ulykker, miljøgifter i malinger, samt biologisk forurensing som følger ballastvann.

Avgasser fra skip. På lik linje med kjøretøy avgir forbrenningsmotorer i skip avgasser som inneholder CO_2, NO_x, SO_x og partikler.

Ser vi på CO_2 utgjør transportsektoren ca.15 % av de totale CO_2-utslippene i verden. Av disse står skipsfarten for bare ca. 3,5 %. Det spesielle for skip er at de i stor grad (ca. 75 %) benytter tungolje (HFO - heavy fuel oil), som er det billigste av de flytende fossile brenslene. Tungolje er et restprodukt fra raffineriprosessen etter at bensin, parafin, diesel osv. er tatt ut av råoljen. Dette er et brensel som inneholder mye "tunge" hydrokarboner som brenner dårlig og sakte. I tillegg inneholder tungoljen mye svovel (ofte 3-5 %), samt en del andre avfallsprodukter som ikke brenner, og som i seg selv kan være miljøskadelige. Resultatet er at avgassene i tillegg til CO_2 inneholder relativt



Oversikt over skadelige utslipp fra skip

relativt store mengder skadelige stoffer i form av sotpartikler (PM, particulate matter), svoveldioksid (SO_2) og nitrogenoksider (NO_x). SO_2 og NO_x i atmosfæren reagerer videre og er de største kildene til sur nedbør som enten ender opp i havet eller innover land, der pH - balansen i naturen endres og påvirker både dyr og planter. Partiklene kommer også etter hvert ned med regnet og forurenser både hav og land. Så lenge partiklene svever i atmosfæren, kan de også være et stort helseproblem. Spesielt i store konsentrasjoner forårsaker de luftveisproblemer for både mennesker og dyr.

Hvordan kan vi redusere de skadelige utslippene fra skip?

Skipstransport er allerede svært energieffektiv og dermed også miljøvennlig når vi ser på klimagasser i form av CO_2 -utslipp. Likevel er det her et stort forbedringspotensial. IMO viser i sin rapport i 2009 [9.10] at tross høy effektivitet, kan ytterligere 25—75% reduksjon av klimagasser oppnås. Når det gjelder utslipp av svovel, NO_x og sotpartikler, kan disse reduseres med 80-90 % eller mer, gjennom forbedring av design, renere drivstoffer og mer effektiv drift av skipene.

Under forbedret design finner vi:
- bedre skrogformer
- bedre maskineriløsninger både på systemer og komponenter
- bedre propulsjonssystemer
- energioptimalisering ved varmegjenvinning og bedre energiutnyttelse
- avgassrensing

Under mer effektive operasjoner finner vi:
- bedre planlegging og styring av hele logistikksystemer
- ruteplanlegging i forhold til strøm og værforhold
- energioptimalisering (power management)
- renere drivstoffer

På de fleste av disse punktene er det utviklet teknologi og løsninger som venter på å bli tatt i bruk så snart de blir lønnsomme, eller til det stilles krav fra myndigheter. Også her er det økonomien som bestemmer, og alle investeringer i teknologi skal betale seg tilbake over tid gjennom innsparte kostnader. Dersom vi studerer investeringer i energieffektiv teknologi, finner vi raskt koplinger til bunkersprisen. De energieffektive skipene er prosjektert i perioder med høy oljepris, mens man ved lav oljepris gjerne går for de billigere og enklere løsningene. Den største reduksjonen kan vi oppnå med fartsreduksjon.

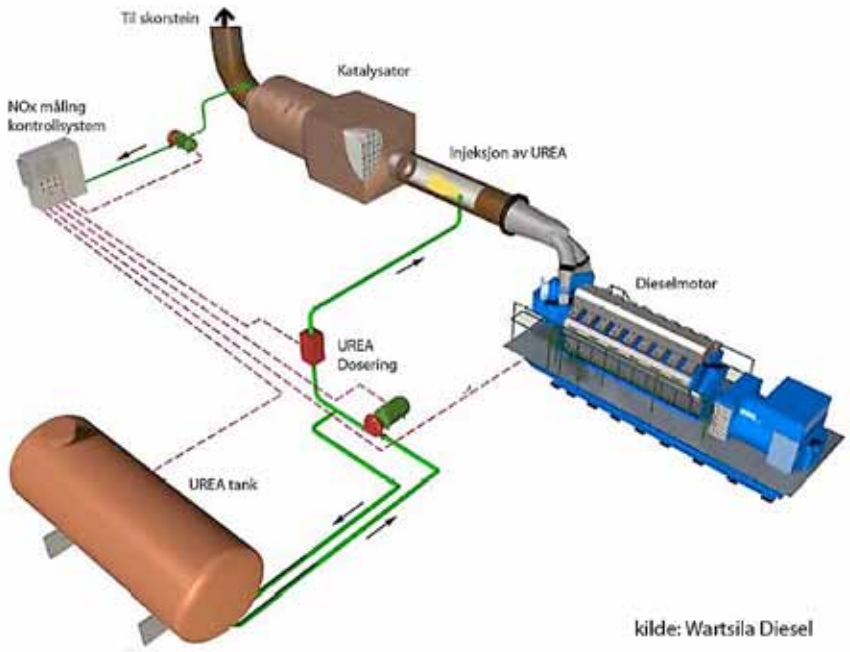
Dette enkle tiltaket kan alene lett redusere energiforbruk og avgassutslipp med 25—50 %. Den eneste hindringen for å iverksette slike tiltak, er begrenset kapasitet og transporttid. For å kompensere må det da bygges flere skip.

Når det gjelder utslipp av SO_x, NO_x og sotpartikler kan dette reduseres gjennom følgende tiltak:

- renere brensel
- forbedret design av motorer
- avgassrensing: katalysatorer, partikkelfeller (vasking)

Tilknyttet alle disse tre tiltakene finnes det teknologi som kan overføres og tilpasses fra bilindustrien, og hindringen er stort sett bare kostnadene og manglende krav. Spesielt avgassrensing krever relativt store renseanlegg om bord. Disse er kostbare, og krever stor plass og spesialkompetanse til drift og vedlikehold. Figuren nedenfor viser et system for å redusere NOx ved hjelp av katalysator og kjemisk behandling. Andre prosesser er utviklet for å fjerne svovel og partikler, og til sammen utgjør et slikt renseanlegg et stort og komplisert prosessanlegg som kommer i tillegg til resten av maskineriet. Derfor er nok løsninger som ligger i forkant i form av renere brensler og bedre motorteknologi sterkt å foretrekke.

Anlegg for fjerning av NOx fra avgassen ved hjelp av katalysator



kilde: Wartsila Diesel

Renere brensler og alternative brensler

Overgang til lettere og renere dieseloljer og naturgass. For skip er første steg på veien mot renere avgasser å gå fra tungoljer til dieseloljer som brenner renere og inneholder langt mindre skadelige stoffer for miljøet. Det neste steget som det i dag finnes løsninger for, er bruk av naturgass i form av LNG (flytende naturgass, -163 °C). Dette er det reneste av alle fossile brensler. Det gir direkte 20-30 % reduksjon av CO_2, inntil 90 % redusksjon av NO_x og nesten 100 % fjerning av svovel og partikkler. Utfordringen for naturgass er lagring og håndtering, som krever spesielle løsninger. Du kan lese mer om bruk av naturgass som brensel på side 7-29.

Biobrensler. Bare alger gir stor nok produksjon. Ved siden av naturgass ser vi biobrensler og hydrogen som mulige alternativer i framtiden. Biobrensler er uansett en begrenset ressurs inntil man klarer å utvikle teknologi som effektivt kan dyrke alger, som så brukes til produksjon av brensler. Her er det teknologi under utvikling, men det er langt fram og mange utfordringer før dette kan gjøres i så stor skala at det vil bidra vesentlig til den forventede etterspørsel etter brensler.

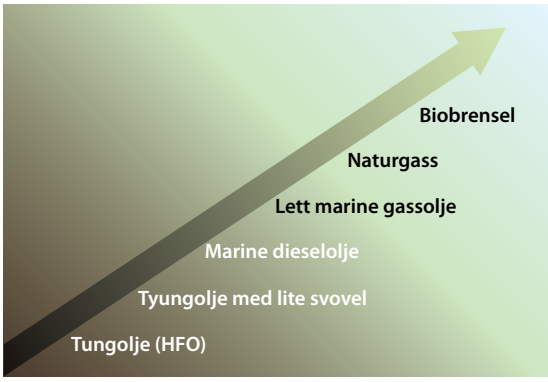
Hydrogen er kun en energibærer, og i tillegg til å være svært vanskelig å transportere og lagre, vil hydrogen neppe være et alternativ for skip, verken i kombinasjon med forbrenningsmotorer eller brenselsceller (se side 7-34).

Seil og solceller. De reneste drivsystemene finner vi i fornybare energikilder slik som vind og solenergi. Ifølge IMO-rapporten kan med dagens krav til fart og regularitet maksimalt 10—15 % av det totale energibehovet på et skip dekkes av fornybar energi. Dersom vi aksepterer å senke disse kravene, kan fornybare energikilder benyttes i større grad.

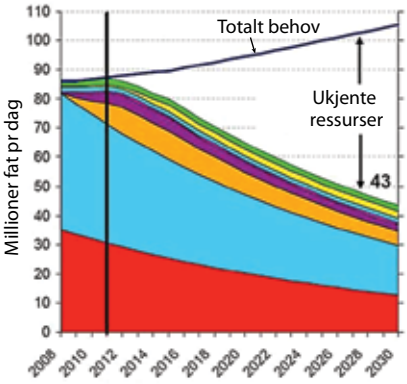
Energiutfordringen – større enn miljøutfordringen?

Ifølge Det internasjonale energibyrået (IEA) står vi nå framfor en stor utfordring når det gjelder å dekke det globale behovet for flytende brensler. Figuren til høyre er hentet fra en rapport som kom ut i 2010. Den viser at bare i et 20 års tidsperspektiv, har vi et behov for å erstatte ca. 50 % av dagens brenselsforbruk med nye kilder. Noe av dette vil dekkes av mer effektiv energiutnyttelse og ny utvinning av energiressurser som ikke er tilgjengelig med dagens kostnadsnivå og teknologi. Uansett vil dette medføre et sterkt press på ressursene, der vi går fra kjøper til selgers marked. Dersom kommersielle mekanismer får styre, vil prisen på brensel dermed øke i mye høyere takt enn den generelle prisstigningen. Kanskje vil dette (som noen spår) også regulere forbruket av fossil energi, øke bruken av alternative energikilder og dermed bidra til reduserte miljøutslipp.

Uansett er det stor grunn til nå å bygge skip som kan møte både miljø- og energiutfordringen som kommer. Et skip som kanskje vil operere i 30—50 år må også være konkurransedyktig i denne perioden, og det oppnås kun med energieffektive og miljøvennlige løsninger.



Håpefull utvikling mot grønnere skipsfart, jevnfør side 7-26



Tilgang på flytende brensler i verden i framtiden
Kjente ressurser er vist med farger. Hvitt område angir behov som vi i dag ikke kan spesifisere dekningsmåte for.
Kilde: IEA AEO 2009

Vi undrer oss på:

Renere avgasser kan oppnås på to ulike måter:
Den ene er å sette inn tiltak i forkant, slik at produksjonen av skadelige stoffer reduseres. Den andre måten er å fjerne de skadelige stoffene før de slippes ut i miljøet.
Hvorfor trenger vi begge måtene?

Oppgaver

Oppgave 9.1 (gruppearbeid)
Se først side 2-4 om blant annet volumdeplasement, dødvekt, lettskipsmasse og blokkoeffisient. Det vises videre til side 9-24, hvor det er oppgitt noen tekniske data for en produkttanker: lengde L_{oa} = 180 m, bredde B = 180 m/5,7 = 31,6 m og dypgang T=18 m. Prosjektert hastighet er 15 knop, med en saktegående totakts dieselmotor på 13 MW. Gruppen skal blandt annet ved hjelp av dataprogrammet Freeship beregne ytterligere følgende data for skipet:

a) Massedeplasement og volumdeplasement. Bruk Freeship.
b) Blokkoeffisient Cb. Bruk Freeship.
c) Dødvekt. Denne bestemmes ved hjelp av erfaringsformel for forholdet mellom dødvekt og massedeplasement. Barrass [9.20] oppgir at man, som første tilnærming i prosjekteringsfase kan sette det nevnte forholdet lik blokkoeffisienten. Bruk altså verdien funnet i punkt b) for å bestemme dødvekten.
d) Lettskipsvekt.

Oppgave 9.2 (gruppearbeid)
Gruppen skal fortsette beregningene av skipet i oppgave 9.1 og blant annet bestemme skipets effektbehov og brenselforbruk ved den prosjekterte hastigheten. Dette gjøres som det framgår nedenfor. Se også side 3-26 og jevnfør med eksempelet på sidene 7-18/19.

a) Legg inn data fra oppgave 9.1 i dataprogrammet Freeship og bestem nødvendig slepeeffekt P_E ved hastighet 15 knop.
b) Regn med en propulsjonsvirkninggrad η_p = 0,71 og bestem nødvendig effekt levert til til propellen (P_p). Egentlig skulle det også vært tatt hensyn til at skipet, når det går for egen maskin, får en liten, ekstra motstand i tillegg til slepemotstanden. For enkelhets skyld ser vi imidlertid bort fra det her.
c) Skipet er utstyrt med en langsom totakter og er altså uten gir. Regn med en virkningsgrad for kraftoverføringen η_{ko} = 0,98 og beregn nødvendig akseleffekt P_e på hovedmotoren. Hvor mye utgjør dette i % av den oppgitte effekten på hovedmotoren?
d) Bruk figur side 7-20 og beregn brenselforbruket per døgn, etter å ha lagt til 10 % på grunn av drift av hjelpemotor.
e) Beregn brenselforbruket per transportarbeid, uttrykt i g/tonn · km. Hvordan stemmer dette med verdier for kjemikalieskip i figur på side 9-17 ? Nevn noen driftsmessige faktorer som er av betydning.
f) Beregn CO_2-utslippet på en strekning på 5000 nautiske mil.

Oppgave 9.3 (gruppearbeid)
En annen elevgruppe skal analysere det RoRo-skipet som er beskrevet på side 9-27, på samme måte som i oppgave 9.1. Tekniske data for skipet framgår av samme side.
Gruppen skal:

a) Gjennomføre de samme beregninger som er forutsatt i oppgavene 9.1 og 9.2 og gå fram på samme måte
b) Sammenligne med resultatene fra oppg. 9.1 og 9.2 og kommentere.

Oppgave 9.4

Et capesize bulkskip for frakt av jernmalm har en lastekapasitet på 120 000 dwt. Malmen har en massetetthet på 3 tonn/m3. Tekniske data for skipet er for øvrig som vist øverst på side 9-25. Før frakt omgjøres malmen til pellets, som er små deler av jernmalm prosessert for bruk i smelteverk. Det gjør at volumbehovet øker med en faktor på ca. 2,5.

a) Hvor mye av skipets volumdeplasement utgjør lasten?

b) Kan fullastet skip passere Suez-kanalen?

c) Hvor stort er brenselforbruket per tonn*km transportert last. Bruk blant annet Freeship-programmet og figur på side 7-20 til å bestemme manglende data.

Oppgave 9.5

Vi skal "rydde opp" i alle de begrepene som brukes for å uttrykke et skips størrelse. For eksempel ble det på sidene 9-12/13 brukt to forskjellige enheter for å angi størrelsen på Norges skipsflåte gjennom tidene: først netto registertonn og fra 1950 dødvekttonn. Begge måleenhetene uttrykker skipenes lasteevne (henholdsvis i lasteromvolum og maksimal masse av lasten).

- Netto registertonn (nrt). Denne enheten ble brukt fram til 1994, men ble så omdefinert og omdøpt til "nettotonn" (nt). *Merk at begge begrepene, på tross av bruk av ordet "tonn" (kortform av ordet tonnasje), egentlig er et mål for samlet volum av et skips lasterom (lasteevne) i m^3.*
- Dødvekttonn (dwt). Dette er *massen* av et skips maksimale last (lasteevne) uttrykt i tonn (1000 kg). Vi kan også si at denne er et uttrykk for massen av den vannmengden som må fortrenges (deplasement) for å gi balanse med lasten. Dette massedeplasementet kan også omregnes til et volumdeplasement (m^3) eller tyngdedeplasement (kN).

Måler vi opp alle lukkede rom og ikke bare ser på lasteevnen av det komplette skipet, oppgis tonnasjen i dag som bruttotonn (bt, og tidligere som brt). Når det gjelder deplasementet av det komplette skipet, må vi tilsvarende ta med lettskipsvekten (se oppgave 9.1). Da skriver vi gjerne:

Totalt deplasement [tonn] = Lettskipsvekt [tonn] + dødvekt [tonn]

$$\Delta = Wls + Dwt$$

Merk at det som fra gammelt av blir kalt "vekt", bruker vi i betydning masse og regner den i tonn (=1000 kg)

Forholdet mellom begrepene nt, bt og dwt er avhengig av både skipstype og størrelse. Som en tilnærmet verdi kan vi sette:

$$1\ nt = 1{,}7\ bt \quad og \quad 1\ bt = 1{,}5\ dwt$$

a) Uttrykk størrelsen på skipet som ble beregnet i oppgave 9.1, ved hjelp av dets netto og brutto tonnasjer (nt og bt). Begge disse gir volumer i m^3).

b) Uttrykk størrelsen på det samme skipet ved hjelp av totalt deplasementer i tonn. Dette skal også uttrykkes på volumbasis (i sjøvann) og på tyngdebasis.

Referanser

9.1 Brit Berggren, Arne Emil Christensen, Bård Kolltveit: Norsk Sjøfart. Bind 1 og 2. Dreyers Forlag. 1989.
9.2 Bjørn Landstrøm: Skipet. Gildendal Norsk Forlag. 1961
9.3 Rolf Danielsen, Ståle Dyrvik, Tore Grønlie, Knut Helle, Edgar Hovland: Grunntrekk i norsk historie. Universitetsforlaget. 1991
9.4 Karsten Alnæs: Historien om Norge. Bind 1-5. Gyldendal Norsk Forlag. 1996
9.5 Dag Bakka jr. (redaktør): Skipsfartens bok. Norges maritime næringer 2007. Breakwater Publishing.
9.6 Stig Kvaal, Torgeir Moan, Johannes Moe, Gjert Wilhelmsen (red.): Et hav av muligheter. Inst. for marin teknikk, NTNU/Tapir Akademisk Forlag. 2003
9.7 Statistisk årbok 2009. Statistisk sentralbyrå. 2009
9.8 Statistiske data fra Norges Rederiforbund 2010
9.9 Snorre Sturluson: Norske kongesagaer. Gyldendal Norsk Forlag. 1979
9.10 International Maritime Organizatin: Second IMO GHG Study. 2009
9.11 K. Jakobsen: Norsk maritim verdiskaping 2000-2009. Rapport pr. 10.01.2011. Menon Business Economics
9.12 Maritimt Forum: En komplett maritim klynge- Norges største kunnskapsbaserte næring. Brosjyre. 2011.
9.13 Per Magne Einang: Strategy for greener shipping. New and renewable fuels. MARINTEK, Trondheim. Foredrag på 30th International Bunker Conference, Oslo 2009.
9.14 Torgeir Moan: Maritime Structures and Operation for a Future Safe and Sustainable Use of the Oceans. Centre for Ships and Ocean Structures, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Keynote lecture, PRADS conference, Rio de Janeiro 2010.
9.15 Geir Fuglerud (red): Kompendium i fag TMR4105, Marin teknikk 1
9.16 T. Reve, E. W. Jakobsen: Et verdiskapende Norge. Universitetsforlaget. 2001. Oslo
9.17 Torgeir Reve, Amir Sasson: Et kunnskapsbasert Norge. Universitetsforlaget. 2012. Oslo
9.18 Kai Levander: Cruise Ships – Success factors for the design IMDC 2009. Trondheim
9.19 Kai Levander, Stein Ove Erikstad: System Based Design of Offshore Support Vessels. IMDC 2012. Glasgow
9.20 C. B. Barass: Ship Design and Performance for Masters and Mates. Elsevier Butterworth-Heinmann. Oxford, 2004

Illustrasjon: Statoil

Forfattere:
Jonas Odland, Torgeir Moan, Carl Martin Larsen

Olje- og gassutvinning til havs

Havromsteknologi

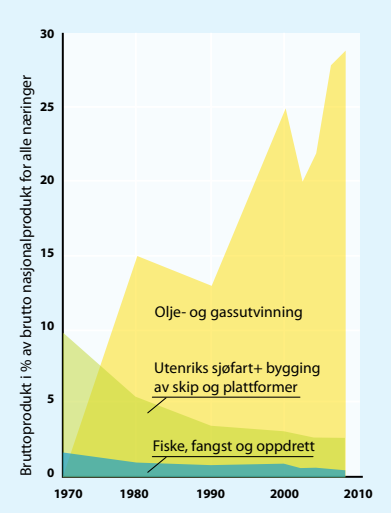
Innhold

Innledning....2
Hvordan ble olje og gass dannet?....4
Hvordan finner vi olje og gass?....6
Fra reservoar til marked....8
Fasene i et felts levetid....10
Hvordan hentes olje og gass opp fra reservoarene?
Bunnfaste produksjonsplattformer....12
Skip og flytende plattformer....14
Undervannsteknologi....18
Hvordan transporters olje og gass til land?....20
Hvordan plasseres og sammenkobles utstyr på havbunnen?
Slepeoperasjoner. Installasjoner. Løfteoperasjoner....24
Ubemannede undervannsfartøy....26
Forsyningsoperasjoner. Logistikk....28
Eksempler på utbygging av petroleumsfelt
Ekofisk - det første oljefeltet....30
Statfjord - kronjuvelen i Nordsjøen....32
Rørledninger og ilandføringer....33
Norge blir storleverandør av gass....34
Det første oljefeltet med flytende produksjonsanlegg....36
Sikkerhet i olje- og gassutvinningen....38
Miljøutfordringer i olje- og gassutvinningen....41
Den norske næringsklyngen for olje- og gassutvinning....44
Hva har hatt betydning for utviklingen?....48
Oppgaver....50
Referanser....52

NTNU
Institutt for marin teknikk

10

Petroleumsvirksomheten har hatt enorm betydning for den økonomiske veksten i Norge og finansieringa av det norske velferdssamfunnet. Gjennom 40 år har næringa skapt verdier for godt over 7000 milliarder kroner, målt i dagens pengeverdi. I 2008 stod petroleumssektoren for 26 prosent av verdiskapingen i landet. Verdiskapingen i petroleumsnæringen er tre ganger høyere enn i landindustrien, og rundt 23 ganger den samlede verdiskapingen i primærnæringene. Og vi skal merke oss: All denne verdiskapingen knyttes til havromsteknologier.



Fra skipsfart til offshore
På mange måter kom oljevirksomheten til å overta mye av skipsfartens tradisjonelle betydning i det norske samfunnet. Det skjedde først og fremst ved at oljeeksporten ga inntekter og et handelsoverskudd atskillig større enn det skipsfarten hadde kunnet gi.

Begynnelsen på offshoreindustrien

Før annen verdenskrig var offshore oljeaktiviteter begrenset til grunne farvann i Venezuela og Louisiana i USA. I 1947 ble det imidlertid boret en brønn fra en fast plattform langt fra land i Mexicogolfen. Dette regnes som starten på den moderne offshoreindustrien. I 1959 ble det stor gassfeltet Groningen funnet på land i Nederland. Størrelsen ble ikke virkelig forstått før i 1963. Geologene mente at tilsvarende funn kunne gjøres i sørlige del av Nordsjøen, og det var viktig for landene rundt Nordsjøen å få på plass et regelverk for virksomheten.

Norges statshøyhet over norsk kontinentalsokkel for utforsking og utnyttelse av undersjøiske naturforekomster ble proklamert i 1963. Det ble slått fast at Staten var grunneier. Bare Kongen kunne gi tillatelse til leting og utvinning. I mars 1965 ble det inngått avtale om deling av kontinentalsokkelen etter midtlinjeprinsippet mellom Norge og Storbritannia. Samme år ble det inngått en tilsvarende avtale mellom Norge og Danmark. Det ble utformet et juridisk regelverk for oljeutvinning.

Første letebrønn på norsk sokkel

Første konsesjonsrunde på norsk sokkel ble utlyst i 1965, og samme år tildelte regjeringen 22 utvinningstillatelser for 78 blokker til oljeselskaper eller grupper av selskaper. Esso var det første oljeselskapet som begynte å bore etter olje utenfor kysten av Norge. Det halvt nedsenkbare borefartøyet "Ocean Traveler" ble slept fra New Orleans til Norge. Fartøyet begynte å bore i juli 1966. Boringen skjedde på blokk 8/3, ca. 180 km sørvest for Stavanger. I løpet av 84 dager ble det boret ned til en dybde på 3015 meter, men det ble ikke funnet spor av olje eller gass. Prøvene som ble tatt underveis, viste imidlertid at det fantes den type geologiske sedimenter som geologene var på jakt etter.

Våren 1968 gjorde Phillips Petroleum et gassfunn, men videre boring viste at Cod-funnet ikke var stort nok til lønnsom produksjon. Ingen fant olje det neste året heller. Sommeren 1969 begynte oljeselskapene å gi opp. Shell og Elf var i ferd med å trekke seg fra videre oljeleting i Norge. Phillips Petroleum hadde lyst til å gjøre det samme. Phillips Petroleum måtte uansett betale dyr leie for borefartøyet "Ocean Viking". Det ble derfor bestemt å bore en siste brønn på blokk 2/4. Boringen startet i august 1969.

Etter flere tekniske problem, inklusive fare for ukontrollert utblåsing og evakuering på grunn av dårlig vær, kom boringen i gang igjen. Etter flere mislykkede boringer utover høsten var man i ferd med å utsette hele prosjektet inntil videre.

Olje- og gassutvinning til havs

Det norske oljeeventyret begynner

Sitat fra Karsten Alnes' Historien om Norge: "Rett før jul i 1969 begynte det likevel å sive noen greier ut fra flammebommen på "Ocean Viking". Karene holdt pusten. De gransket gasskyen som hvislet ut av munningen 15 meter over sjøen. Det kunne vel ikke være? Spenningen sitret. Alt arbeid stanset opp. Dette måtte de teste. Einar Grønlie Olsen tok et kosteskaft, bandt en vaskefille rundt skaftet, dyppet den i bensin, tente på og begynte å åle seg utover flammebommen med kosteskaftet i hånden. De var knyst på dekk. Der var han ute, stakk den brennende filla inn i gasskyen, og der ! Gassen brølte, flammen sprutet opp, eksplosjonen blåste ham nesten på sjøen. Han tviholdt i røret, men hadde tent flammen på Norges første oljefunn! Skjelvende krøp han tilbake til plattformen. Der stod karene og lo. Det ble ingen champagne, ingen skjønte at de hadde skutt gullfuglen."

Men da brønnen ble forlatt lille julaften i 1969 visste mange at det var gjort et stort oljefunn. Dette feltet fikk senere navnet Ekofisk.

Enorme nettoinntekter for staten

Skatt fra oljeselskapene og direkte eierskap sikrer staten en stor del av verdiene som petroleumsvirksomheten skaper. Gjennom mer enn 35 års produksjon har virksomheten gitt staten 3750 milliarder kroner i nettoinntekter, målt i dagens pengeverdi. Statens kontantstrøm blir overført til et eget fond, Statens pensjonsfond – Utland. I 2004 passerte fondet 1000 milliarder kroner, og ved utgangen av 2008 var verdien av fondet 2275 milliarder kroner.

Vi har nå produsert om lag 38 prosent av det en regner med er de samlede ressursene på norsk sokkel. De gjenværende ressursene utgjør et stort potensial for verdiskaping også i mange tiår framover.

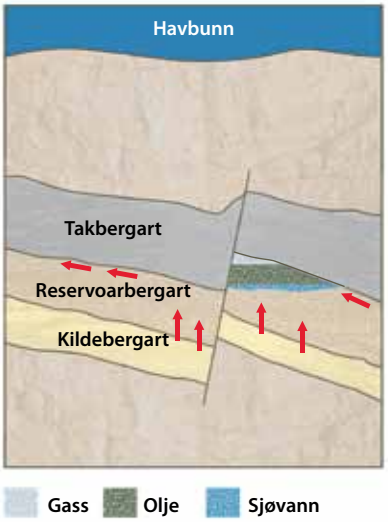
Boreplattformen Ocean Viking fant olje på Ekofisk i Nordsjøen i desember 1969. Ocean Viking var også den første norskbygde plattformen.

MÅL

Etter å ha studert dette kapitlet skal du:

- ha fått innblikk i de viktigste historiske trekk fra utbyggingen på norsk kontinentalsokkel og oversikt over hvilke nøkkelteknologier som har vært av betydning for utviklingen
- kjenne til hvordan leteoperasjoner etter olje og gass foregår til havs
- ha fått oversikt over hvordan produksjon/utvinning av olje og gass foregår på et felt
- kjenne til hvordan olje og gass transporteres til land fra et felt
- kjenne til de viktigste marine operasjoner som er nødvendige for utbygging og drift av et felt
- kunne beskrive typiske forsyningsoperasjoner til et felt
- ha fått innsikt i framtidig utvikling av olje- og gassutvinningen

Hvordan ble olje og gass dannet?



Dannelse av et petroleumsfelt
Forutsetninger: Riktig kombinasjon av bergarter, migrasjonsveier og oppsamlingsfelle. Denne typen felle kaller vi forkastningsfelle. Det kan også forekomme andre typer feller. Noen ganger er det primært olje som samles opp, andre ganger kan forekomsten bestå av olje med gass på toppen, eller stort sett bare gass. Som regel er det sjøvann på bunnen.

Omdannelse av dødt, organisk materiale til hydrokarboner

På jordas overflate, spesielt i havområdene, har det gjennom millioner av år blitt dannet store mengder organisk materiale. Det meste av dette materialet har blitt brutt ned, men deler av det ligger begravet sammen med slam og leire. I enkelte havområder hvor det er lite tilførsel av oksygen, kan større mengder organisk materiale bli bevart. Som det framgår av side 10-8, består dette materialet i hovedsak av hydrokarboner, det vil si kjemiske forbindelser mellom grunnstoffene hydrogen og karbon.

Slik organisk rik leirstein kalles *kildebergart*. Når kildebergarten blir begravd, øker temperaturen samtidig som trykket øker. Denne prosessen fører til at det blir dannet olje og gass, som blir presset ut av leirsteinen og inn i nærliggende *reservoarbergarter*, hvor den erstatter det vannet som var der fra avsetningen.

Som samlenavn for olje og gass bruker vi gjerne ordet *petroleum*.

Migrasjon

Hydrokarbonenes vandring fra kildebergarten til reservoarbergarten kalles *migrasjon*. Dette er en langsom prosess som utspiller seg over flere millioner år - flere tusen meter under overflaten-, og det er derfor umulig å studere den inngående. Men fordi vi har et godt bilde av både sluttproduktet og dets opprinnelse, er vi i dag i stand til å kunne gi et godt bilde av migrasjonsprosessen fra kildebergartene fram til reservoarbergartene.

Hydrokarbonene samles under de ugjennomtrengelige bergartene. Hydrokarboner, som er lettere enn vann, tenderer til å strømme oppover i berglagene. For at de skal holde seg i et *reservoar*, er en avhengig av at reservoaret er forseglet av en spesiell type bergart. En slik bergart kaller vi forseglingsbergart eller *takbergart*. Denne fungerer som en *hydrokarbonfelle* forutsatt for at den opptrer sammen med riktig geometri.

Reservoarbergarten må være både gjennomtrengelig og porøs. Sandstein avsatt på forskjellige måter, eller kalk og dolomitt fra revdannelse, er gode *reservoarbergarter*. Hydrokarbonene vil trenge inn og fortrenge vanninnholdet, som man finner i porene fra avsetningen. Gjennomtrengningen måles i *permeabilitet*, mens den potensielle plassen som er til rådighet i en bergart måles i *porøsitet* (mellomrom mellom kornene). Permeabilitet og porøsitet er dermed de to kritiske faktorene for en reservoarbergart.

Når er det muligheter for funn?

For at vi skal kunne finne petroleum innenfor et bestemt område, er det altså flere geologiske faktorer som må opptre samtidig:

- Det må finnes en *reservoarbergart* hvor petroleum kan oppbevares.
- Det må finnes en *felle*, slik at petroleum holdes tilbake og akkumuleres i reservoaret.
- Det må finnes en *kildebergart* som inneholder organisk materiale som ved tilstrekkelig temperatur og trykk er omdannet til petroleum.
- Det må finnes en *migrasjonsvei*, slik at petroleum kan bevege seg fra kildebergarten til reservoarbergarten.

Forekomster av olje og gass på norsk kontinentalsokkel (økonomisk sone)

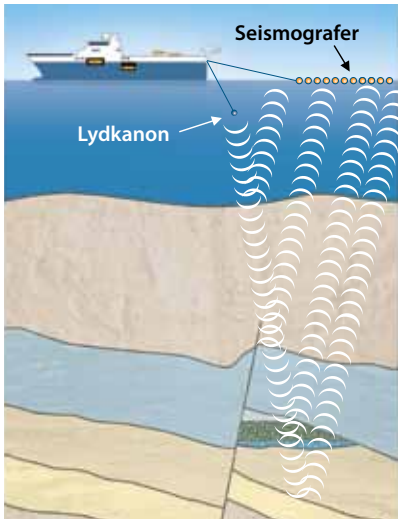
Kartet nedenfor viser eksempler på hvor det hittil er funnet petroleumsforekomster på norsk kontinentalsokkel. Ikke alle områder er foreløpig blitt undersøkt og det finnes derfor stadig nye felt. Særlig er da områdene i nord interessante.

Noen av petroleumsfeltene i den norske økonomiske sonen i Nordsjøen, Norskehavet og Barentshavet

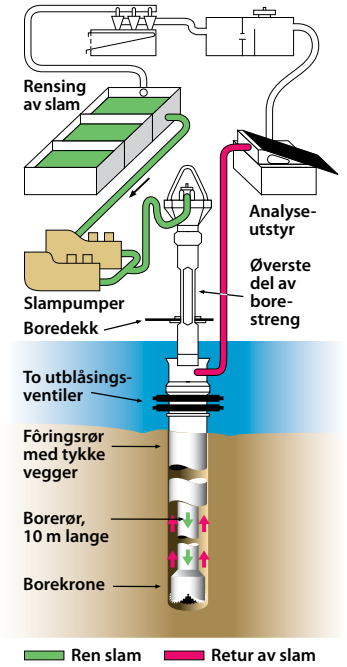
Kystnasjonene i verden har full økonomisk kontroll over alle økonomiske ressurser som ligger inntil 200 nautiske mil fra nasjonenes landområder. Hvis denne regelen gir overlapping med andre lands økonomiske soner, legges et nærmere definert midtlinje-prinsipp til grunn. For Norge gir dette en økonomisk sone som er vist på kartet. Vi ser at denne sonen er mange ganger større enn de norske landområdene, og hvis den regnes sammen med landarealene blir Norge et av de største landene i Europa. Den såkalte kontinentalsokkelen strekker seg noen steder utenfor den økonomiske sonen. Denne kalles da utvidet kontinentalsokkel. Her har en kystnasjon full økonomisk kontroll over ressurser som ligger på eller under havbunnen inntil 350 n. mil fra landområdene. Dette gjør den avtalen som ble inngått med Russland i 2010 om delelinjen i Barentshavet meget viktig. Se også kart side 11-2, som viser mer av nordområdene.

Petroleumsfeltene i Norges økonomiske sone omfatter:
71 felt i produksjon
14 felt som er under utbygging
12 felt hvor produksjonen er avsluttet

Hvordan finner vi olje og gass?



Seismiske undersøkelser
Slike undersøkelser gjør det mulig for geofysikere å danne seg et godt bilde av hvordan de forskjellige bergartlagene ligger, og mulighetene for forkastninger.



Sirkulasjon av boreslam
Analyse av boreslammet gir viktig, løpende informasjon under boringen. Boreslammet har også andre funksjoner: Det har en tetthet som gjør at trykket i olje- eller gassreservoaret utbalanseres. Videre avkjøler det borekrona og fjerner "avsetninger" på denne.

Foran er nevnt fire geologiske forutsetninger for at olje og gass skal ha blitt samlet opp i et område. Hvordan finner vi så ut om disse forutsetningene er til stede, kanskje to-fire km under havbunnen?

Geologiske undersøkelser

Innledende trinn er en geologisk kartlegging av området, utført av geofysikere. Det blir da blant annet foretatt meget nøyaktige målinger av variasjoner i tyngdekraft og det jordmagnetiske feltet på stedet. Hvis resultatene synes interessante, er neste trinn seismiske undersøkelser.

Seismiske undersøkelser

Baseres på ekko. Figuren til venstre viser et seismikkskip som brukes til slike undersøkelser. Fra en neddykket kilde som skipet sleper med seg i vannet, "skytes" det ut kraftige lydbølger med visse mellomrom. Disse forplanter seg nedover til havbunnen og videre inn i grunnen. Når bølgene går fra en bergart til en annen, oppstår det forandringer i forplantningshastigheten. Samtidig vil noe av lydbølgene reflekteres tilbake som et ekko fra overgangen til den nye bergarten. Ekkoet forplanter seg tilbake til overflaten. Til slutt fanges alle de reflekterte bølgene opp av seismografiske instrumenter som skipet sleper med seg i lange kabler. Vi skjønner at lydbølgene oppfører seg omtrent som det vi lar lært i fysikken om brytning og refleksjon av lysbølger.

Tunge beregninger krever bruk av avanserte datamaskiner. Signalene fra de seismografiske instrumentene sendes videre til seismikkskipet, hvor de behandles av datamaskiner om bord. Disse gir de første, foreløpige bildene av formasjonene av bergarter nedover under havbunnen. Signalene blir også gjenstand for meget tunge beregninger i datamaskiner på land. Sluttresultatet av undersøkelsene blir bilder med full oversikt over hvilke typer bergarter som finnes under havbunnen og hvilke formasjoner disse danner. Hvis det viser seg at alle de geologiske forutsetningene er oppfylt, stiger optimismen.

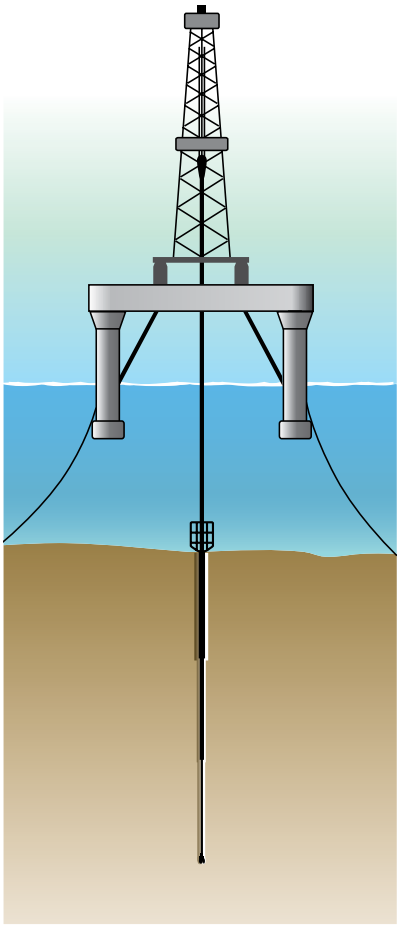
Til "syvende og sist" må det foretas boring av hull. Ennå vet man imidlertid ikke om det virkelig er petroleum til stede. Det kan bare påvises ved hjelp av boring av hull ned til reservoaret.

Leteboring

Boreslamanalyser gir viktig, løpende informasjon. Figurer til venstre og på neste side viser hvordan leteboring i prinsippet foregår. En borekrone i enden av et roterende rør (borestrengen), som stadig skjøtes på under boringen, "graver" seg nedover gjennom bergartene. Boremateriale transporteres bort ved hjelp av boreslam som strømmer gjennom borestrengen og borekrona som vist i figuren til venstre. Ved å analysere boreslammet, som inneholder boremateriale, kan man finne ut hvilken type bergart som borekrona til ethvert tidspunkt befinner seg i, og spesielt om det finnes petroleum i bergarten.

Hvordan hindres utblåsing? Ukontrollert eller fri utblåsing er et av de største skrekkscenarioene i oljevirksomheten. Vi har på side 10-30 beskrevet den såkalte Bravoutblåsingen på Ekofiskfeltet i 1977. I 2010 skjedde en enda alvorligere utblåsing i Mexicogolfen.
Oljen eller gassen i reservoaret kan ha meget høye trykk. Når boreprosessen har kommet så langt at reservoaret er blitt åpnet, vil en lekkasje eller brudd i for eksempel stigerøret mellom havbunnen og boretårnet kunne få katastrofale følger. For å hindre dette, plasseres det en sikkerhetsventil på toppen av brønnhodet. Denne kalles Blowout Preventer (BOP, på norsk: utblåsingsventil). Den kan stenge strømningen i stigerøret ved å "skjære av" borerøret og samtidig stenge rommet mellom borerøret og det utvendige hovedrøret. Av sikkerhetsmessige grunner plasseres ofte to slike utblåsingsventiler over hverandre, som det framgår av figur på venstre side. Dersom det skjer uhell som krever aktivering av en utbåsingsventil, prøves den øverste først. Dersom denne ikke fungerer som forutsatt, aktiveres den nederste ventilen. I produksjonsfasen plasseres det også ventiler nede i røret (nærmere reservoaret). En slik ventil kalles Down Hole Safety Valve (DHSV).

Horisontalboring – en viktig teknologi. Vi vil senere, blandt annet i forbindelse med beskrivelsen av Trollfeltet (side 10-34/35) påpeke betydningen av horisontalboring. Det er altså mulig å foreta boringer i alle retninger. Dette gjelder også under en leteboring.

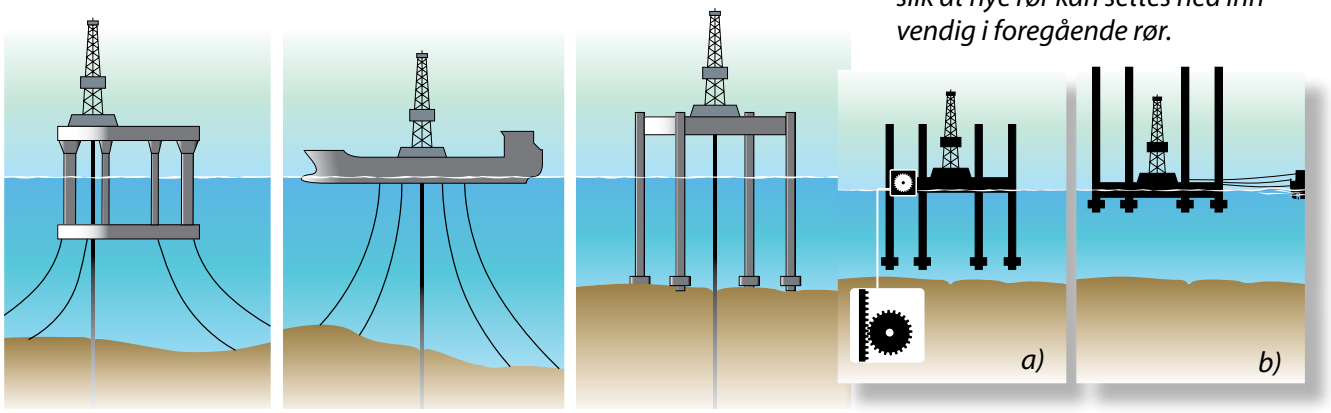


Boring etter petroleum.
Etter hvert som man borer seg nedover, må borehullet sikres mot at veggen raser inn eller at boreslammet forsvinner inn i bergformasjonen. Heller ikke må gass/oljestrøm finne veien inn i slammet og dermed forårsake utblåsing. Derfor settes det løpende inn fôringsrør som vist. Disse rørene har avtakende diameter, slik at nye rør kan settes ned innvendig i foregående rør.

Boreplattformer og boreskip.

Leteboring er enormt kostbart. Som base for boreoperasjonen har man til havs forskjellige muligheter (se figur nedenfor). På grunt vann skjer boreoperasonen fra en plattform som hviler på havbunnen, mens flytende plattformer eller skip benyttes på dypere vann. Da det kan koste 800 mill kr og ta én-tre måneder å bore en undersøkelsesbrønn, er det grenser for hvor mange brønner som kan bores for å undersøke om et felt har en drivverdig forekomst av olje eller gass.

Basen for boreoperasjonen må derfor være enkel å flytte. Dette er selvsagt tilfelle for boreskip og halvt nedsenkbare plattformer (når ankersystemet er tatt opp). De oppjekkbare plattformene er derimot mer kompliserte å flytte på. Disse er understøttet av søyler (bein) som står på havbunnen når det utføres bore- eller andre operasjoner om bord (se figur). Flytting av slike plattformer er beskrevet i figuren.



Flyttbare anlegg for leteboring
Boreskipet og den halvt nedsenkbare plattformen er enkle å flytte. Ved flytting av den oppjekkbare plattformen senkes først dekket inntil plattformen blir flytende pga. tilleggsoppdriften fra dette (figur a). Deretter heves beina slik figur b viser, og plattformen kan slepes til neste borehull.

Fra reservoar til marked

Litt kjemi og termofysikk om hydrokarboner og deres gass- og væskefaser

Oppbygging av hydrokarboner *De forskjellige grunnstoffenes atomer er bygget opp med like mange elektroner som det er protoner i kjernene. Elektronene holder seg i bestemte skall når de sirkulerer rundt kjernen. De to innerste skallene har plass til to og åtte elektroner. De seks elektronene i C-atomet er plassert som vist i figur til høyre. Tunge grunnstoffer trenger opptil syv skall til sine elektroner.*

Alle atomer vil helst ha åtte elektroner i sitt ytterste skall. C-atomet forsøker å ordne dette ved å forbinde seg med andre stoffer og ta til seg elektroner fra disse. Det viser seg nemlig at atomer har evne til å bruke to og to elektroner i fellesskap. Binding mellom atomer til et molekyl ved ***felles bruk*** *av elektronpar kalles* ***elektronparbinding.***

Det framgår av det som er sagt ovenfor at C-atomer trenger fire elektronparbindinger med andre atomer for å fylle opp sine ytterste skall. Oftest er det da enklest å binde seg til hydrogenatomer eller andre karbonatomer Dermed dannes molekyltyper som vi kaller hydrokarboner (H-C-molekyler). Disse kan forekomme med et ***enormt stort antall ulike kombinasjoner*** *av elektronparbindingene, både når det gjelder strukturer og størrelser. Noen eksempler er vist i figur.*

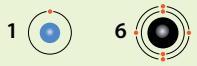
Dannelse av gasser og væsker. *Hydrokarbonenes kokepunkter øker med molekylstørrelsen. De som har de minste molekylene (1-4 karbonatomer)har meget lave kokepunkter (se tabell). Disse opptrer derfor i* ***gassform*** *ved vanlige trykk og temperaturer. Hydrokarboner med fem eller flere C-atomer danner* ***væsker.***

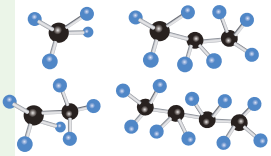
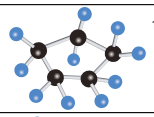
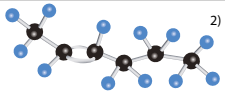
Gassprodukter og oljeprodukter

Hydrokarboner er kjemiske forbindelser mellom hydrogen og karbon. Det enkleste hydrokarbonet er gassen *metan* som har den kjemiske formelen CH_4. Deretter kommer etan, propan og butan (se figur). Hydrokarboner med flere enn fire karbonatomer er i væskeform, og er mer tyktflytende jo større antall karbonatomer det består av.

Petroleum er betegnelsen på en kompleks blanding av *hydrokarboner* som er naturlig til stede i bestemte bergarter. Petroleum kan forekomme som gass (naturgass), væske (råolje) eller fast stoff (kull), og ofte er hydrokarbonene blandet eller forurenset med andre stoff som svovel og nitrogen. Det er også store variasjoner i tetthet, viskositet, farge og lukt.

Hydrogen- og karbonatomer — **Kjemisk symbol/atommasse** — **Antall elektroner (1 og 6) og plassering i skall**



	Navn	Formel	Kokepunkt [3]	Tetthet [3]	
Gassformede hydrokarbon-molekyler	Metan	CH_4	- 162 °C	0,72 kg/m³	
	Etan	C_2H_6	- 89 °C	1,36 kg/m³	
	Propan	C_3H_8	- 42 °C		
	Butan	C_4H_{10}	0 °C	2,67 kg/m³	
Væskeformede hydrokarbon-molekyler	Syklo-pentan og heksen (eksempler på mole-kyltyper i bensin)	C_5H_{10}	30 °C	0,71 kg/dm³	 1)
		C_6H_{12}	60 °C	0,73 kg/dm³	 2)
	C=7,8,.....se figur på høyre side				

1) Som vist, kan C-atomer danne ringer i stedet for kjeder. De kan også ha grener på kjedene (ikke vist). 2) Videre kan det opptre varianter med både dobbeltbindinger (se figur) og tredobbelte bindinger. 3) Gjelder ved atmosfæretrykk (og 0 °C).

Disse kan grupperes etter antall C-atomer, og har da ulike anvendelsesområder, som vist nederst til høyre i figur på neste side.

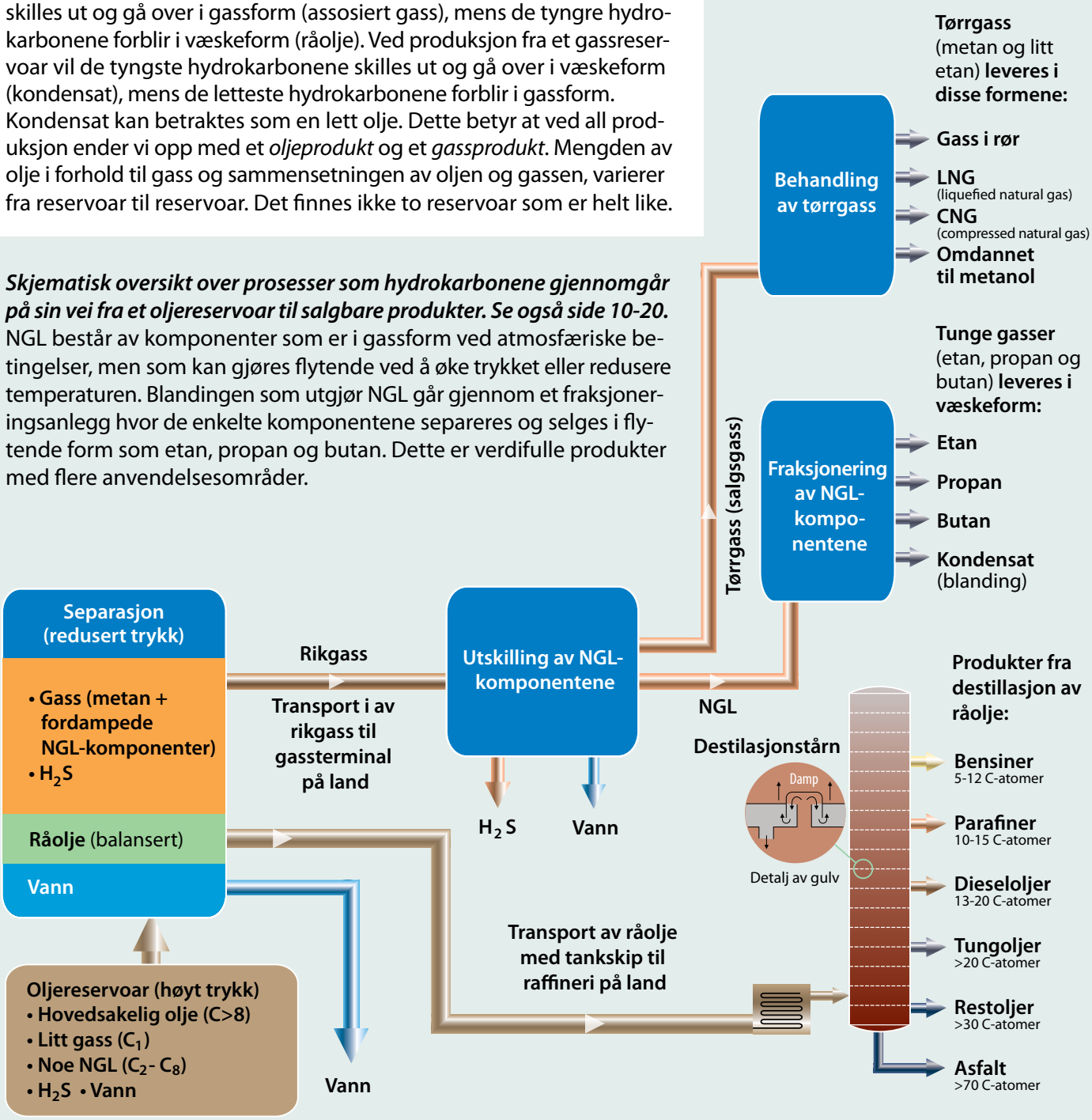
Væskene har generelt høyere kokepunkt, samt større tetthet og seighet jo flere C-atomer de er bygget opp med. Kokepunkter (fordampningstemp.) for to av de letteste hydrokarbonvæskene er gitt i tabelllen ovenfor. Kokepunktene gjelder ved atmosfæretrykk og øker når trykket øker. Om et hydrokarbon med få C-atomer (to-åtte) vil eksistere i gass- eller væskeform i et reservoar, bestemmes altså av både trykk og temperaturforholdene. Det er godt mulig at forholdene i et gassreservoar er slik at hydrokarboner med fem-åtte C-atomer eksisterer i gassform, men kondenserer til væske (kondensat) under senere prosessering av brønnstrømmen, (se figur side 10-20). Det er også mulig at et oljereservoar inneholder hydrokarboner med tre-fire C-atomer i væskeform (NGL) og at disse under senere prosessering fordamper til gasser (assosiert gass), som vist i den samme figuren.

Oljeekvivalenter. *Den totale mengden av petroleum måles gjerne i oljeekvivalenter. Da skal gassvolumene omregnes til væskevolum basert på energiekvivalens, (se oppg. 10.1).*

Petroleum finnes som nevnt i spesielle reservoarbergarter. Disse kan ligge dypt under overflaten. På norsk sokkel er størsteparten av petroleumsressursene funnet mellom 1500 og 4500 meter under havoverflaten. På så store dyp må vi forvente både høye trykk og høye temperaturer. For å gi en indikasjon på tilstanden, antar vi gjerne at trykket tilsvarer hydrostatisk trykk pluss et overtrykk. Temperaturen stiger lineært med ca. 4 °C pr. hundre meter. Hvis vi har et reservoar 2500 meter under havbunnen og havbunnen ligger 250 meter under havoverflaten, kan det forventes et reservoartrykk på ca. 300 bar og en temperatur på ca. 100°C.

Olje- og gassreservoar. Hvis vi har funnet petroleum som er i væskeform i reservoaret, snakker vi om et *oljereservoar*. Hvis den er i gassform, snakker vi om et *gassreservoar*. Når hydrokarbonene produseres og kommer til overflaten, reduseres trykket, og vi får en naturlig separasjon. Ved produksjon fra et oljereservoar vil de letteste hydrokarbonene skilles ut og gå over i gassform (assosiert gass), mens de tyngre hydrokarbonene forblir i væskeform (råolje). Ved produksjon fra et gassreservoar vil de tyngste hydrokarbonene skilles ut og gå over i væskeform (kondensat), mens de letteste hydrokarbonene forblir i gassform. Kondensat kan betraktes som en lett olje. Dette betyr at ved all produksjon ender vi opp med et *oljeprodukt* og et *gassprodukt*. Mengden av olje i forhold til gass og sammensetningen av oljen og gassen, varierer fra reservoar til reservoar. Det finnes ikke to reservoar som er helt like.

Skjematisk oversikt over prosesser som hydrokarbonene gjennomgår på sin vei fra et oljereservoar til salgbare produkter. Se også side 10-20.
NGL består av komponenter som er i gassform ved atmosfæriske betingelser, men som kan gjøres flytende ved å øke trykket eller redusere temperaturen. Blandingen som utgjør NGL går gjennom et fraksjoneringsanlegg hvor de enkelte komponentene separeres og selges i flytende form som etan, propan og butan. Dette er verdifulle produkter med flere anvendelsesområder.



Fasene i et felts levetid

Konsesjonsrunder og lisenser

I Norge -som i andre land- er det staten som i utgangspunktet eier og har råderett over petroleumsforekomstene. Gjennom et system av lover og regler, blir oljeselskap eller grupper av oljeselskap gitt tillatelse til å lete etter, og eventuelt utvinne petroleum på avgrensede områder. I Norge skjer dette gjennom *konsesjonsrunder* hvor definerte områder (blokker) lyses ut.

Letefasen

Umiddelbart etter lisenstildeling vil *rettighetshaverne* begynne å legge planer for videre kartlegging og leting. Rettighetshaverne er en gruppe oljeselskap som hver har sin andel i lisensen. Både kostnader og eventuelle inntekter fordeles i henhold til denne andelen. Ett av selskapene har fått tildelt rollen som *operatør*, og er ansvarlig for utførelsen av arbeidet.

Selv om alle forutsetninger for petroleum er til stede, er det kun ved boring at petroleum kan påvises. Det er mange usikkerheter, og når det letes i nye og ukjente områder er ofte sannsynligheten for å finne petroleum mindre enn 20 prosent. Siden en *letebrønn* kan koste mange hundre millioner kroner, må boremålet vurderes nøye.

Hvis boringen er vellykket, er det gjort et funn. Neste steg er å finne ut om funnet er drivverdig. Hvis boringen er mislykket (tørr brønn), må det legges nye planer.

Planleggingsfasen

Funnbrønnen gir alltid mye viktig informasjon, men ikke nødvendigvis så mye informasjon at det er mulig å starte utbyggingsplanleggingen. For å komme videre kan det være nødvendig å bore en eller flere *avgrensingsbrønner*. Det er særlig viktig å få en god forståelse av reservoaregenskaper, fluidegenskaper, utvinnbare mengder og hvor produksjons- og eventuelle injeksjonsbrønner bør plasseres.

Når rettighetshaverne har forsikret seg om at det i alle fall finnes en farbar vei mot utbygging, fokuseres det på å finne fram til *den beste utbyggingsløsningen*. Noen ganger kan svaret være opplagt, men andre ganger kan det være forskjellige oppfatninger om dette. I utgangspunktet ønsker alle rettighetshaverne en utbygging som gir mest mulig verdiskaping.

Det er operatørens ansvar å finne fram til en løsning som alle kan enes om, og når dette er gjort blir det foretatt et konseptvalg. *Konseptet* er en helhetlig og overordnet beskrivelse av reservoar, brønner, produksjonsanlegg og eksportsystem. Det valgte konseptet blir videre utviklet og dokumentert. Når rettighetshaverne føler seg tilstrekkelig trygge på det valgte konseptet, er de klare for å fatte en beslutning om å gjennomføre prosjektet. Operatøren utarbeider da et dokument som

kalles Plan for utbygging og drift (PUD). Dokumentet oversendes myndighetene ved Olje- og energidepartementet. Sammen med konsekvensutredninger og eventuelle høringsuttalelser danner dette dokumentet grunnlaget for myndighetenes godkjennelse. Plan for utbygging og drift er et omfattende dokument som omhandler ressursutnyttelse, produksjonsanlegg, kostnader og kommersielle forhold. Når planen er godkjent av myndighetene, vil alle framtidige disposisjoner bli vurdert i forhold til det som er beskrevet. Hvis det er behov for endringer, enten det gjelder ressursutnyttelse eller anlegg, kan det bli nødvendig å søke om avvik eller å oppdatere planen. Det som tidligere ble omtalt som et funn, får nå status som et felt.

Utbyggingsfasen

Når *Plan for utbygging og drift* er godkjent, starter utbyggingen av feltet. Hovedaktivitetene er detaljprosjektering, innkjøp av utstyr og materialer, bygging, installasjon på feltet, sammenkobling, boring av brønner og klargjøring for produksjon. Utbyggingen av et mellomstort felt (400 millioner fat olje) gjennomføres på ca. tre år, og kostnadene beløper seg til ca. 30 milliarder kroner (2010). Det dreier seg altså om svært store beløp, og det legges stor vekt på prosjektstyring og kontroll. Likevel er det mange eksempler på store kostnadsoverskridelser.

Driftsfasen

På grunn av de store kostnadene i lete – og utbyggingsfasene, er det svært viktig for rettighetshaverne å komme i produksjon raskt. I opptrappingsfasen er det gjerne antall ferdigstilte brønner som begrenser produksjonen. Etter hvert som flere brønner blir tilgjengelige, er det prosessanleggets kapasitet som er den begrensende faktoren. For operatøren er det viktig at regulariteten er god, og dersom det er spesielle "flaskehalser" i anlegget, forsøkes disse fjernet.

Så lenge prosessanleggets kapasitet er fullt utnyttet, har vi det som kalles *platåproduksjon*. Etter en tid avtar imidlertid produksjonen, eller det produseres mer vann og mindre hydrokarboner. Dette betyr reduserte inntekter, og operatøren bruker all sin kreativitet på å holde produksjonen oppe. Det kan dreie seg om å bore nye brønner, injisere vann eller gass mer optimalt osv. En rekke slike tiltak som skal øke utvinningen går under betegnelsen IOR (improved oil recovery). I tillegg til IOR tiltak vurderes hele tiden muligheten for tilleggsproduksjon fra mindre funn i nærheten (satellittfelt).

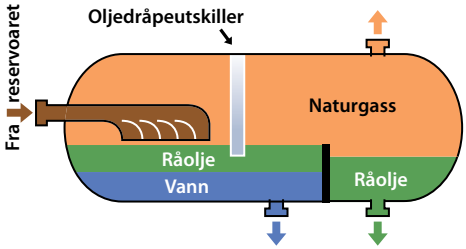
Nedstengning og fjerning

Før eller senere kommer tidspunktet hvor anleggene må stenges ned. Dette kan være fordi ressursgrunnlaget i området er uttømt, eller at anleggene rett og slett er for gamle. I utgangspunktet skal alle brønner plugges og feltinstallasjoner fjernes, men i praksis aksepteres det at deler blir stående igjen eller tildekkes. Dette blir en beslutning fra sak til sak, der ulempene ved at etterlatte deler blir vurdert. Fjerning av installasjoner krever utstrakt bruk av tunge kranfartøy, transport til land og opphogging. Kostnadene ved dette er høye.

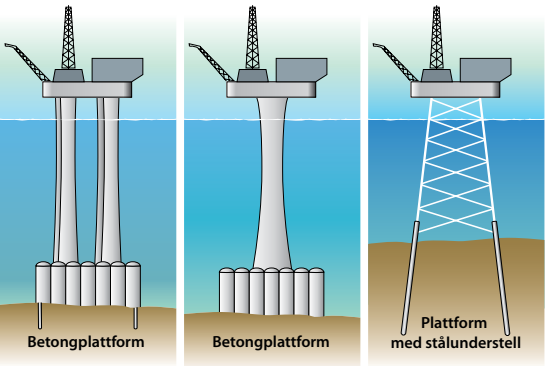
Hvordan hentes olje og gass opp fra reservoarene?

Bunnfaste produksjonsplattformer

Drivmekanismer
Som oftest er trykket i et reservoar høyt nok til å etablere og holde en brønnstrøm opp til plattform-dekket i gang på et tilfredsstillende nivå. Denne metoden kalles trykk-avlastning. For å opprettholde brønnstrømmen på sikt, må det imidlertid i en del reservoarer etableres trykk-støtte ved injeksjon av vann eller gasser (også f.eks. CO_2).



Separator basert på tyngde-prinsippet*. De ulike tetthetene til gass, olje og vann gir automatisk separasjon (utskilling) av bestand-delene, forutsatt at strømnings-hastighetene ikke er for store. Undervannsproduksjon krever en noe annerledes type.*



Typer bunnfaste plattformer
Disse er enten fagverksplattformer i stål eller betongplattformer med ett eller flere bein (søyleplattform). På grunn av sin store tyngde trenger ikke betongplatt-formene noen annen fundamentering enn et jevnt underlag. De kalles derfor ofte for gravitasjonsplattformer. Noen ganger støttes likevel slike plattformer som vist til venstre ovenfor.

Produksjon av olje og gass

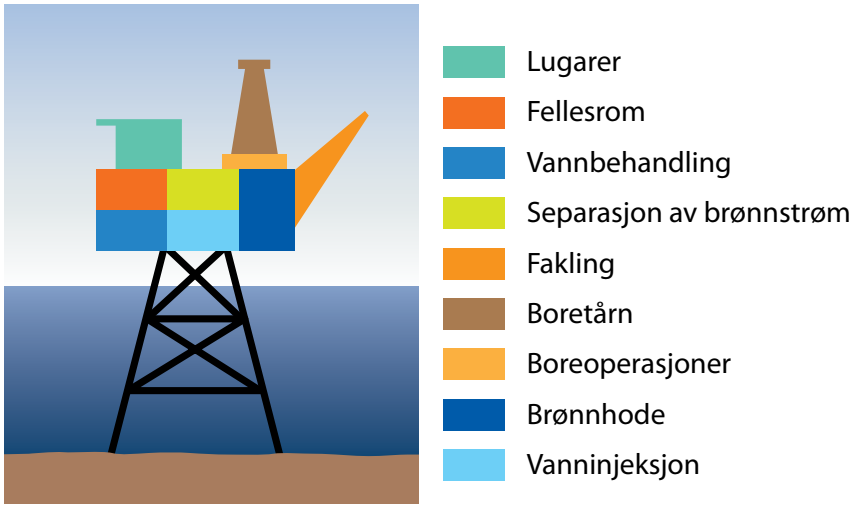
Valg av helhetlig konsept for utbygging av feltet. De operasjoner som er nødvendige for å kunne hente opp olje og gass fra reservoaret, kaller vi med et samlebegrep produksjon. Som nevnt foran, må felt-utbyggeren utrede hvordan produksjonen er tenkt gjennomført. Han må også bestemme seg for hvordan oljen og gassen skal transporteres vekk fra feltet. Til alt dette kreves en mengde utstyr (separatorer, pumper med elektriske motorer, anlegg for produksjon av elektrisk energi, tanker, rør, osv.). Utstyret kan i prinsippet organiseres og bygges opp på tre ulike måter:

- produksjonsanlegg med bunnfaste plattformer
- produksjonsanlegg med flytende plattformer eller skip
- komplette produksjonsanlegg på havbunnen

Først må sand og vann skilles ut. De nevnte produksjonsanleggene skal vi beskrive i det etterfølgende. Én enhet, separatoren, er imidlertid helt sentral og inngår som første trinn i alle produksjonsanlegg. Vi ser derfor litt nærmere på denne nå. En typisk separator er vist skjema-tisk i figur til venstre. Når olje og gass tas opp fra reservoaret, vil det følge med både vann og sand. Dette må skilles ut. Dette kan enkelt gjøres ved å utnytte forskjellen i tettheter mellom bestanddelene, slik som det framgår av figuren.

Oversikt over typer bunnfaste produksjonsplattformer. Bunnfaste plattformer kan enten være stålplattformer (fagverksplattformer) eller betongplattformer (oftest kalt gravitasjonspattformer). Disse kan ses i figuren til venstre.Betongplattformene utføres oftest med flere bein, men for små felt kan det bli tilstrekkelig med én enkeltstående søyle (søyleplattform). *Bunnfaste installasjoner egner seg best for mindre havdyp, opptil ca. 300 m i Nordsjøen og noe større dyp i mindre værfaste strøk.* Både stål- og betongplattformer ble brukt under utbyggingen av Ekofiskfeltet (se figur side 9-30).

Grupper av utstyr på en bunnfast plattform



Stålplattformer (fagverksplattformer)

Billig og enkel konstruksjon. Fordelen med fagverkskonstruksjoner er allerede forklart i kapitlet om marine konstruksjoners styrke. Her ble også vist hvordan disse kan styrkeberegnes (se side 6-23). De fundamenteres ved hjelp av peler som drives langt ned i bunnen (se figur til venstre samt side 6-24). Fagverkskonstruksjoner for små dyp gir relativt billige løsninger. Dette gjør det mulig med bruk av flere små plattformer med broforbindelser, slik vi ser på Ekofiskfeltet.

Kan utføres som faste eller oppjekkbare. De faste stålplattformene må transporteres i liggende tilstand på prammer som slepes ut på feltet. Her skjer den endelige installasjonen ved hjelp av store kraner, (se side 10—22 om installasjon og løfteoperasjoner). Noen ganger kan det være hensiktmessig å utføre også produksjonsplattformer som oppjekkbare, på samme måte som forklart på side 10-7 for boreplattformer. Dermed kan de slepes ut på feltet i flytende tilstand, samtidig som også installasjonen forenkles.

Betongplattformer

Utbyggingen i Nordsjøen startet i Ekofiskområdet på forholdsvis grunt vann, 60-70 m. Da aktiviteten flyttet seg nordover, ble vanndybden større, ca. 150 m. De nye feltene var store og ga dermed behov for store plattformer, med dekksanlegg på over 40 000 tonn. Ofte var det uaktuelt med rørtransport fra feltene, slik at plattformene måtte gi muligheter også for oljelagring.

Mange fordeler med betongplattformer. Det ble derfor utviklet et norsk plattformkonsept basert på betong. Konseptet fikk navnet Condeep, og i forhold til de konvensjonelle stålunderstellende hadde det følgende fordeler, som var svært viktige med tanke på utfordringene:

- Plattformene kunne bygges i Norge, som hadde dype nok fjorder. Plattformene kunne så slepes ut og installeres på feltet i opprett stilling, i motsetning til de faste fagverksplattformene.
- Dekksanlegget kunne gjøres ferdig på land og kobles sammen med understellet senere (se figurtekst til høyre).
- Betongkonstruksjonen er robust, er lite utsatt for korrosjon og har lang levetid.
- Det er mulig å lagre store oljevolumer inne i selve konstruksjonen.

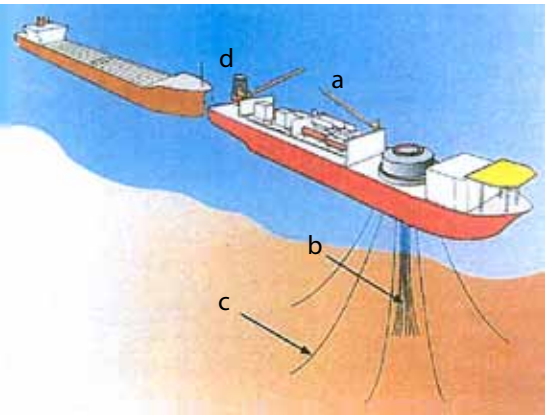
Plattform av Condeep-typen ble også valgt for Troll, hvor havdypet er over 300 m, selv om det her ikke var behov for oljelager. Behov for ekstra lang levetid var imidlertid en svært viktig faktor. Også Statfjordplattformen er av Condeep-type (se figur til høyre).

Ulykke også med betongplattformer. I august 1991 sank betongunderstellet til Sleipner A-plattformen, som var av Condeep-type og under bygging i Gandsfjorden ved Stavanger. Støpearbeidet med beina var ferdig og bare installasjon av dekket gjensto. Beina var derfor senket ned (fylt med vann) slik at bare toppene av disse stakk opp over vannflaten. Da den enorme konstruksjonen traff bunnen, var rystelsene så kraftige at folk som bodde ved fjorden, våknet. Årsaken var en feilberegning av krefter, samt en armeringsfeil. Dette ga for store påkjenninger i materialet og førte til brudd og ytterligere vannfylling. Plattformen, til en pris på 1,8 milliarder kroner, forsvant i dypet i løpet av noen minutter. Heldigvis medførte ikke ulykken tap av menneskeliv.

De to mest kjente betongplattformene på norsk kontinentalsokkel. *Øverst: Statfjord A-plattformen under slep ut på feltet. Nederst: Troll-plattformen. Høyde: 472 m. Vanndybde: 369 m. Dette er den største konstruksjon som noen gang har blitt flyttet av mennesker. Prosjektleder for flyttingen var Anne Mürer, marinингeniør fra NTH. Prosjektet ble av Teknisk Ukeblad kåret som "århundredets ingeniørbragd". Nesten hele verdens flåte av havgående slepebåter måtte hentes inn for å få tilstrekkelig slepekraft. Fra [10.3]*

Hvordan hentes olje og gass opp fra reservoarene?

Skip og flytende plattformer



Eksempel på flytende produksjonssystem: produksjonsskip og tankskip for ilandføring ("skytteltankskip").
Det er mange varianter av flytende produksjonssystem, men alle består av følgende undersystem:

- *flytende produksjonsenhet (plattform eller skip)*
- *dekksanlegg, a*
- *skrog*
- *forankringssystem, c*
- *stigerørssystem, b*
- *eksportsystem, d (se side 10-20)*
- *brønnsystem*

Strekkstagplattform

Flytende produksjonssystemer ble først tatt i bruk på 1970-tallet. Det var antatt at slike løsninger ville være særlig interessante og konkurransedyktige for små oljefelt på dypt vann. Den videre utviklingen har vært tett knyttet opp mot utviklingen av undervannsteknologi.

Plattform- og havbunnskompletterte brønner, "tørre" og "våte ventiltrær". Det finnes to hovedgrupper av flytende produksjonssystemer – de med "plattformkompletterte" brønner, og de med "havbunnskompletterte" brønner. En plattformkomplettert brønn kontrolleres via et "tørt ventiltre" som er plassert på toppen av brønnen (på selve plattformen), mens en havbunnskomplettert brønn kontrolleres via et "vått ventiltre" som står på havbunnen. Operasjonsmessig er det mange fordeler ved "tørre trær", men det er nærmest umulig å få til dette på en sikkerhetsmessig forsvarlig måte på plattformer som beveger seg mye i sjøen. "Tørre trær" benyttes derfor bare i forbindelse med faste plattformer, strekkstagplattformer og flytende plattformer med svært stor dypgang. Det vises til figur på side 10-18.

Oversikt over flytende produksjonsenheter

Flytende produksjonsenheter kan være mer eller mindre spesialiserte. De viktigste funksjonene er: produksjon/injeksjon, boring/brønnvedlikehold og lagring av olje. I tabellen nedenfor er sammenstilt hvordan disse funksjonene kan ivaretas av de ulike typer produksjonsenheter som er utviklet for flytende produksjonssystemer.

Typer produksjonsenheter	Produksjon	Boring	Lager	Tørre trær	Våte trær
Strekkstagplattform	●	●		●	●
Dyptflytende plattform	●	●		●	●
Bøyeformet plattform	●	●	●		●
Halvt nedsenkbar plattform	●	●			●
Produksjonsskip	●		●		●

Strekkstagplattform

Verdens første strekkstagplattform ble installert på britisk sokkel i 1984. Vi har to slike plattformer på norsk sokkel, og man finner dem også i Mexicogolfen, Vest Afrika og Indonesia. En strekkstagplattform omfatter dekksanlegg, understell og forankringssystem bestående av vertikale, forspente stag – derav navnet. Understellet er altså forankret til havbunnen med vertikale forspente strekkstag. Hvert stag er utformet som et stålrør med en diameter på mellom en halv og én meter. Med denne type forankring kan plattformen hovedsakelig bevege seg i horisontalplanet. Det betyr at plattformens vertikale bevegelse på grunn av bølger, begrenses til den elastiske tøyningen av stagene. Med en slik bevegelseskarakteristikk er det mulig å benytte et brønnsystem med "tørre trær", og det er nettopp dette som er hensikten med en strekkstagplattform. Strekkstagplattformer er derfor utstyrt med boreanlegg og utfører både boring, produksjon og injeksjon på samme måte som bunnfaste plattformer. Strekkstagplattformer er i stand til å konkurrere med bunnfaste plattformer når vanndybden overskrider ca. 300 meter, og de passer godt for store vanndyp – kanskje opp mot 2000 meter.

Dyptflytende plattform

En dyptflytende plattform er en plattform med stor dypgang – gjerne 150—200 meter. På grunn av den store dypgangen blir vertikalbevegelsene så små at det er mulig å benytte brønner med "tørre trær" på samme måte som for strekkstagplattformer. En dyptflytene plattform har samme funksjonalitet som en strekkstagplattform og er derfor en direkte konkurrent til denne.

En dyptflytende plattform består av dekksanlegg, understell og et "konvensjonelt" forankringssystem bestående av kjetting, wire, fibertau eller en kombinasjon. De kan brukes på store vanndyp – kanskje opp mot 3000 meter.

Et understell bestående av en vertikal sylindrisk konstruksjon kalles en "SPAR-plattform", mens et understell bestående av flere sylindriske søyler omtales som en "flersøylers dyptflytende plattform". SPAR-plattformen er den vanligste typen. De fleste SPAR-plattformene finnes i Mexicogolfen.

Dyptflytende plattform (SPAR-type). *Vertikale, forspente stigerør kommer opp i en åpning midt inne i skroget. De er derfor beskyttet mot bølgekrefter og eventuelt is, og er utstyrt med oppdriftstank som sørger for nødvendig forspenning. Det finnes også dyptflytende plattformer med flere søyler. Dyptflytende plattformer kan brukes sammen med "tørre trær".*

Halvt nedsenkbar plattform

Flytende plattformer av såkalt halvt nedsenkbar type ble først utviklet til bruk som flyttbare boreplattformer. Verdens første flytende produksjonsplattform var en ombygd boreplattform som ble tatt i bruk på britisk sokkel i 1975. Særlig i Brasil finnes det mange produksjonsplattformer av denne typen, men i senere år er det tatt i bruk mange spesialbygde produksjonsplattformer, blant annet på norsk sokkel.

Halvt nedsenkbare plattformer består av dekksanlegg, understell og et "konvensjonelt" forankringssystem bestående av kjetting, wire, fibertau eller en kombinasjon. Understellet er bygget opp av vertikale sylindriske elementer (søyler) og horisontale elementer med rektangulært tverrsnitt (pongtonger).

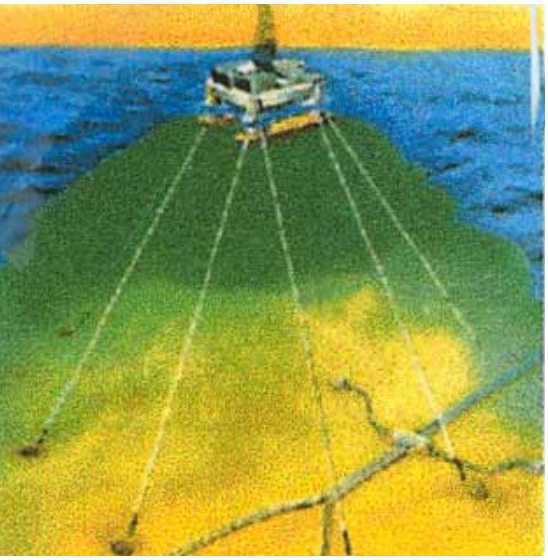
Denne typen plattform kan brukes til boring, produksjon eller kombinert boring og produksjon, og de er velegnet for bruk på dypt vann – kanskje opptil 3000 meter. Det er en type plattform som i dag regnes som vel utprøvd og kjent, men det er også en optimalisert konstruksjon som har vist seg sårbar i skadet tilstand. Gjennom tidene har det vært flere alvorlige ulykker med tap av menneskeliv med halvt nedsenkbare plattformer – "Alexander L. Kielland", "P-36 Roncador" og "Deepwater Horizon".

Halvt nedsenkbar plattform. *Under transport flyter plattformen på pongtongene. Dette gir minimum tauemotstand. Under operasjon på feltet senkes plattformen ned ved hjelp av ballast til en større dypgang – ca. 25 meter – noe som gir bedre bevegelseskarakteristikk, derav navnet. Den "transparente" formen gjør at bølgekreftene blir forholdsvis små.*

Produksjonsskip

Det vises til figur på venstre side. De første produksjonsskipene (1977) var vanlige tankskip som ble utstyrt med et forankringssystem og et prosessanlegg. Disse ble så benyttet til produksjon og lagring av olje. Det vises i denne forbindelse også til side 10—46, som omtaler velkjente norske bidrag til utvikling av denne teknologien (Petrojarl 1, 1986). Slike løsninger viste seg å være interessante for små felt i områder uten infrastruktur. Konverteringen fra tankskip til produksjonsskip kunne gjøres raskt, og oljen kunne overføres direkte til tankskip. Gassen ble ikke utnyttet. Fortsatt tas det i bruk slike produksjonsskip, men det er også utviklet og tatt i bruk mer komplekse produksjonsskip for større felt med både olje- og gassproduksjon, blant annet på norsk sokkel.

Bøyeformet plattform.
Konseptet er utviklet av det norske selskapet Sevan Marine AS. En slik plattform skal installeres på Goliatfeltet i Barenshavet og er planlagt å komme i drift i 2013.



Stram forankring.
Stram forankring gir betydelig kortere ankerliner, men må ikke forveksles med strekkstag-forankring. Ankerlinene er av syntetisk materiale. ***Kjedelinjefo-rankring*** *framgår på side 10—36. Her brukes kjettinger.*

I tillegg til figurer på side 10—14 vises også til side 10—36. Produksjonsskip som benyttes i værharde farvann tåler ikke å få vind og bølger inn på tvers. De er dreibart forankret og ligger alltid med baugen mot været. Dette gjøres ved at alle ankerlinene er koblet opp mot en plugg eller "turret" som skipet kan dreie rundt. Med en slik løsning må også alle stigerørene henges opp i turreten og brønnstrømmen må overføres til prosessanlegget på skipet via en svivel. Avhengigheten av en turret og en svivel er en komplikasjon og dermed ulempe for produksjonsskip. Det er så godt som umulig å kombinere dette med boreanlegg.

Bøyeformet plattform

En SPAR-plattform som er beskrevet tidligere, kan ses på som en bøye med liten diameter og stor dypgang. Det norske selskapet Sevan Marine AS har utviklet et annet bøyekonsept med stor diameter og liten dypgang. Dette består altså av et dekksanlegg, et sylindrisk understell og et såkalt "konvensjonelt" forankringssystem bestående av kjetting, wire, fibertau eller en kombinasjon. Det sylindriske understellet er inndelt i tanker som kan brukes til lagring av olje, på samme måten som i et skip. De geometriske proporsjonene til den relativt enkle konstruksjonen er nøye bestemt, og i kombinasjon med en dempeanordning er bevegelsesegenskapene blitt så gode at det også er mulig å utføre boreoperasjoner. Det betyr at dette er et konsept som kan brukes til både boring, produksjon og lagring. Konseptet er fremdeles nytt og lite utprøvd.

Konseptet kan brukes på samme måte som en halvt nedsenkbar plattform, men har i tillegg oljelager. Det kan også brukes på samme måte som et produksjonsskip, men på grunn av at det ikke er behov for turret/svivel er det også mulig å utføre boreoperasjoner. Konseptet synes derfor å ha større fleksibilitet og utvidet funksjonalitet i forhold til både halvt nedsenkbar plattform og produksjonsskip.

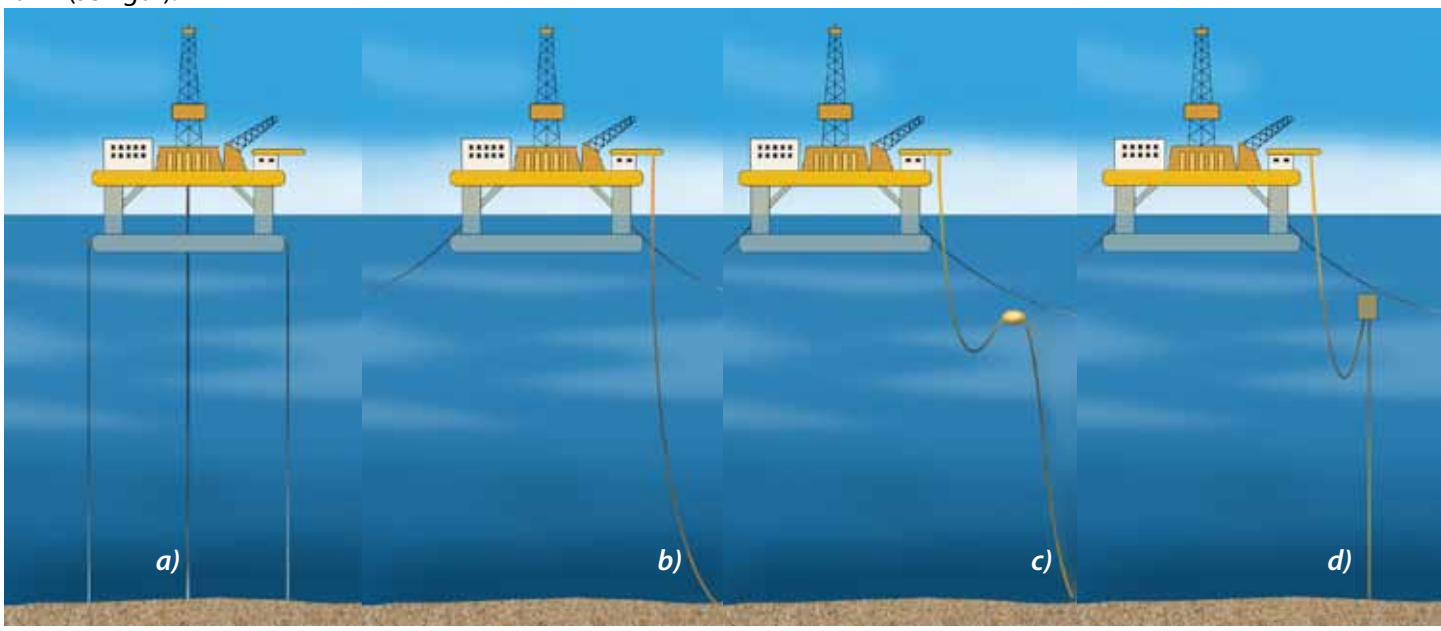
Forankringssystem

Kjedelinjeforankring er den mest vanlige typen forankring, særlig på relativt grunt vann. Navnet refererer seg til den geometriske formen ankerlinene inntar som et resultat av av gravitasjonen. Ankerlinene tangerer bunnen horisontalt, og en del av ankerlinen ligger på bunnen. Det betyr at ankerene kun utsettes for horisontalbelastning.

Stram forankring betyr at ankerlinene er forspent og stramme. De danner en vinkel med havbunnen der de er festet til ankerene. Det betyr at ankerene også utsettes for vertikale krefter og må motstå disse uten å miste festet. På grunn av dette må det benyttes peleanker eller sugeanker.

Stigerørssystem

Flytende produksjonsenheter trenger stigerør for å videreføre brønnstrømmen fra havbunnen og opp til den flytende enheten. Det brukes forskjellige typer stigerør for produksjon, boring og eksport. Det er tre hovedgrupper av stigerør: produksjonsstigerør, stigerør for boring og brønn-vedlikehold og eksportstigerør. Siden de fleste flytende produksjonsenhetene ikke har boreanlegg, behøver de ikke stigerør for boring og brønnvedlikehold. Stigerørene kan ha forskjellig form (se figur).



Ulike typer stigerør. *Fra [10.6]*
a) rett, forspent stigerør av stål (forspenning ved hjelp av hydrauliske sylindre, ikke vist)
b) fritthengende stigerør av stål
c) fritthengende, fleksibelt stigerør med oppdriftselement
d) kombinasjon av forspent- og fritthengende, fleksibelt segment (hybrid stigerør)

Brønnsystem

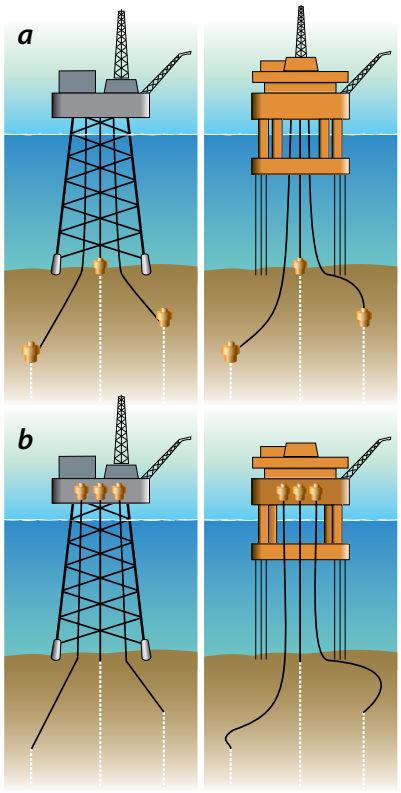
Det er to hovedgrupper av brønnsystemer: Plassert direkte under plattformen, og plassert borte fra plattformen. Brønnsystem plassert direkte under plattformen må benyttes i alle tilfeller hvor produksjonsenheten har eget bore- og brønnvedlikeholdsanlegg og i prinsippet kan ha "tørre" eller "våte" trær. Brønnsystemer plassert borte fra plattformen har alltid "våte" trær og må bores og vedlikeholdes ved hjelp av mobile boreplattformer.

Brønnene kan være frittstående enkeltbrønner, eller de kan være arrangert i brønnrammer. Når det benyttes "tørre" trær (strekkstag-plattformer og dypflytere), benyttes ett forspent vertikalt stigerør per brønn. Når det benyttes "våte" trær er det vanlig å koble sammen flere brønner via en manifold slik at antall stigerør kan reduseres.

Når brønnene ligger et stykke borte fra produksjonsenheten, må det benyttes rørledninger på havbunnen til å forbinde brønner med stigerør. Det er også behov for kabler for brønnkontroll og kjemikalieinjeksjon.

Hvordan hentes olje og gass opp fra reservoarene?

Undervannsteknologi



"Tørre" og "våte ventiltrær"
Strømmen av olje og gass opp fra et reservoar må kunne reguleres, og eventuelt avstenges. Dette krever flere ventiler. Disse samles i en "pakke", vi kaller et "ventiltre".

a. "Vått ventiltre"**. "Ventiltreet" kan plasseres i brønnåpningen på havbunnen og kalles da et "vått ventiltre". Dette "stikker" opp over havbunnen som et brønnhode eller et tre, derav navnet. Når en brønn avsluttes på denne måten, sier vi ofte at den er **"havbunnskomplettert".

***b. "Tørt ventiltre"**. Alternativt kan brønnen forlenges med rørledninger opp til plattformdekket. Dette gir et arrangement med "tørt ventiltre", eller vi kan si at brønnen er "**plattformskomplettert**". Slike arrangementer kan bare brukes for bunnfaste plattformer, strekkstagplattformer og dyptflytende plattformer, mens "våte trær" kan tilpasses alle typer produksjonssystemer (se tabell side 10–14).*

Definisjoner

Noen av begrepene nedenfor er også omtalt på side 10—14, men presiseres på nytt. Et undervannsproduksjonssystem er et produksjonssystem der brønnene er *havbunnskompletterte*. Dette betyr at *ventiltrærne er plassert på havbunnen*. De refereres derfor ofte til som *"våte" trær*. Undervannsteknologi er et ganske generelt begrep som knyttes både til utstyr og metoder som benyttes i forbindelse med leting, boring, utbygging og drift av olje- og gassfelt. Dette kan være både på grunt og dypt vann. Undervannsteknologi er ikke nødvendigvis det samme som dypvannsteknologi, selv om mange elementer av undervannsteknologi passer godt for operasjoner på dypt vann. Undervannsteknologi er også nødvendig under is i arktiske farvann.

Om bruk av undervannsproduksjonssystemer

Undervannsproduksjonssystemer brukes både på grunt og dypt vann. Undervannssystemer for grunt vann benyttes gjerne i kombinasjon med bunnfaste plattformer. Det kan dreie seg om perifere deler av et felt som ikke kan nås med plattformborede brønner, eller det kan dreie seg om mindre felt i nærheten – såkalte satellittfelt. Undervannssystemer for dypt vann benyttes gjerne i kombinasjon med flytende plattformer eller skip.

De havbunnskompletterte brønnene kan være plassert direkte under en produksjonsplattform. Brønnene er da direkte koblet til plattformen med stigerør gjennom vannet. Det vanligste er imidlertid at brønnene ligger et stykke til side for plattformen, og er forbundet til plattformen via rørledninger på havbunnen i tillegg til stigerør. I noen tilfeller er brønnene forbundet til et prosessanlegg på land.

Det er grenser for hvor stor avstanden mellom brønnene og mottaksanlegget kan være. Det er imidlertid ikke noe enkelt svar på dette. Brønnstrømkomposisjonen betyr mye. Tørr gass strømmer mye lettere enn tung olje. Det er mange forhold som må tas i betraktning og dette blir ivaretatt gjennom strømningsanalyser.

Karakteristikk av undervannsproduksjonssystemer

Undervannsproduksjonssystemer varierer i kompleksitet fra enkle satelittbrønner til mange brønner arrangert i brønnrammer eller i klynger rundt manifolder. Brønnene kan være koblet opp med rørledninger og kontrollkabler mot faste eller flytende plattformer, eller mot anlegg på land.

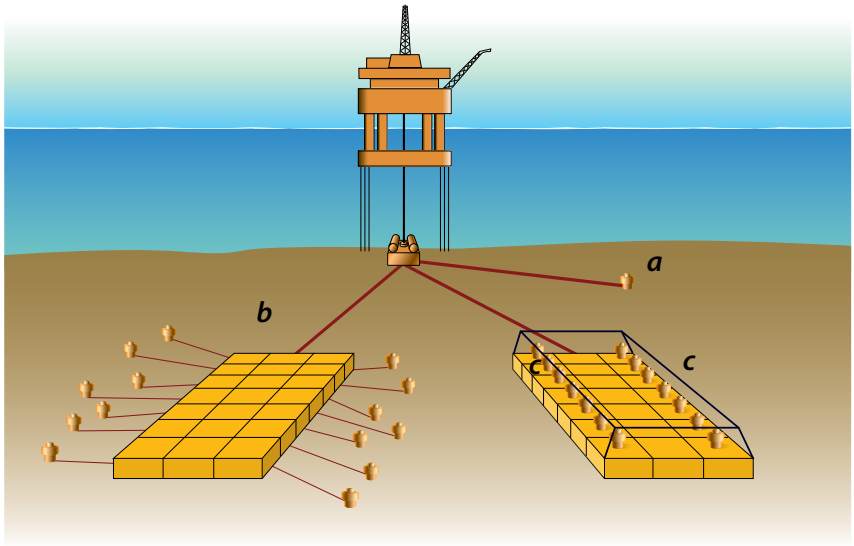
Undervannsproduksjonssystemer er hensiktsmessige til utbygging av reservoarer, eller deler av reservoarer der det er nødvendig å bore fra flere steder. Stort vanndyp kan også gjøre det nødvendig å benytte undervannsproduksjonssystemer, fordi det rett og slett ikke finnes alternativer som er teknisk/økonomisk forsvarlige.

Det er behov for høyt spesialisert utstyr som må være robust og pålitelig for å sikre miljøet mot uhell og lekkasjer. Installasjon av utstyret er avhengig av spesialiserte og kostbare fartøy. På grunt vann kan det benyttes dykkere, men på dypere vann må alle operasjoner kunne utføres dykkerløst ved hjelp av robotteknologi. Dette betyr at reparasjon og/eller utskifting av utstyr på havbunnen kan bli svært kostbart. Det er viktig at alle mulige situasjoner er gjennomtenkt på forhånd. Grundig testing og kvalifikasjon av nytt utstyr er særdeles viktig.

Elementene i et undervannsproduksjonssystem

Hovedelementene i et undervannsproduksjonssystem er:

- brønnhode og ventiltre
- kontrollsystem
- kontrollkabel
- intervensjonssystem
- brønnrammer og rørsystem
- rørledninger og stigerør
- utstyr for undervannsprosessering (måling, pumping og separasjon)



Brønnsystemer for "våte" ventiltrær

a. Frittliggende enkeltbrønner, *liggende rett under plattformen (hvis denne har eget bore- og brønnvedlikeholdsanlegg), eller borte fra plattformen (må da vedlikeholdes av mobile bore/vedlikeholdsplattformer).*

b. Brønnarrangement med en felles manifold. *Denne samler sammen flere brønnstrømmer, og fører disse videre i et felles rør opp til plattformen og videre i et felles stigerør.*

c. "Ventiltrærne" *(og annet nødvendig utstyr) arrangeres i en* ***brønnramme.*** *Dette er en rammekontruksjon som gir god beskyttelse av utstyret, og mye av monteringen kan skje på land. Også her føres brønnstrømmene videre til plattformen (eventuelt produksjonsskipet) gjennom et felles samlerør.*

Undervannsprosessering

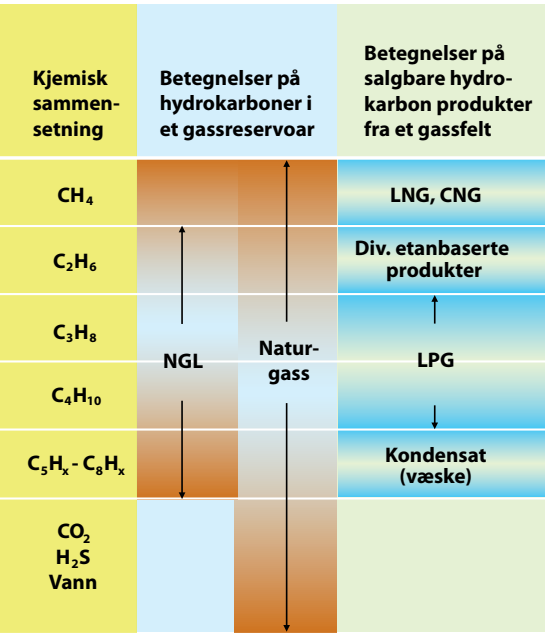
Undervannsprosessering representerer ny teknologi, og per i dag er det ikke så mange eksempler å vise til. Flerfasepumping har vært viktig for å øke utvinningsgraden, og grovseparasjon av vann er viktig i situasjoner hvor mottaksplattformen ikke har kapasitet til å ta imot alt produsert vann. *Det aller viktigste med undervannsprosessering er å gjøre det mulig å transportere brønnstrøm over lengre avstander uten bruk av plattformer og uten at det går ut over utvinningsgraden.*

De siste årene har det vært satset store beløp på forskning og teknologiutvikling av elementer relatert til undervannsprosessering. De viktigste satsingsområdene har vært:

- undervannsseparasjon
- undervannspumping
- undervannskraftforsyning
- undervannskompresjon

Det vises også til figur av Statoils undervannsfabrikk på side 0—13.

Hvordan transporteres olje og gass til land?



Terminologi for hydrokarboner med 1—8 C-atomer når disse er
- ***bestanddeler i et gassreservoar***
- ***og når de er produsert til salgbare produkter***

Se for øvrig sidene 10—8/9

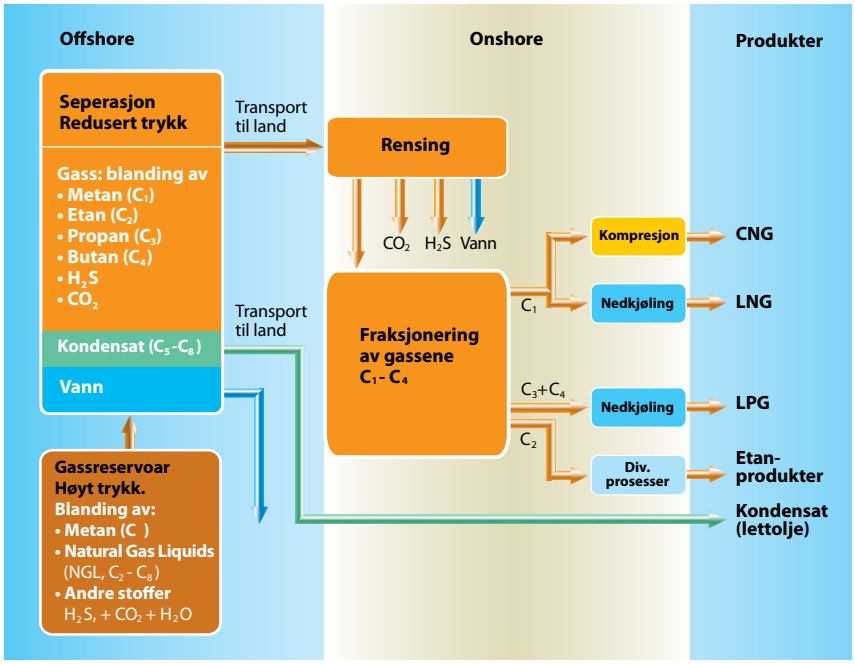
NGL = Natural Gas Liquids
LNG = Liquefied Natural Gas
CNG = Compressed Natural Gas
LPG = Liquefied Petroleum Gas
CH_4 = metan
C_2H_6 = etan
C_3H_8 = propan
C_4H_{10} = butan
C_5H_x-C_8H_x = hydrokarboner med 5—8 C-atomer. Disse er i gassform i gassreservoaret (høyt trykk), men går over i væskeform når trykket reduseres og kalles da kondensat. ***Merk forskjellen mellom NGL og LNG.***
CO_2 = karbondioksid
H_2S = hydrogensulfid (meget giftig gass)

Transporterbare produkter. Transportmetoder

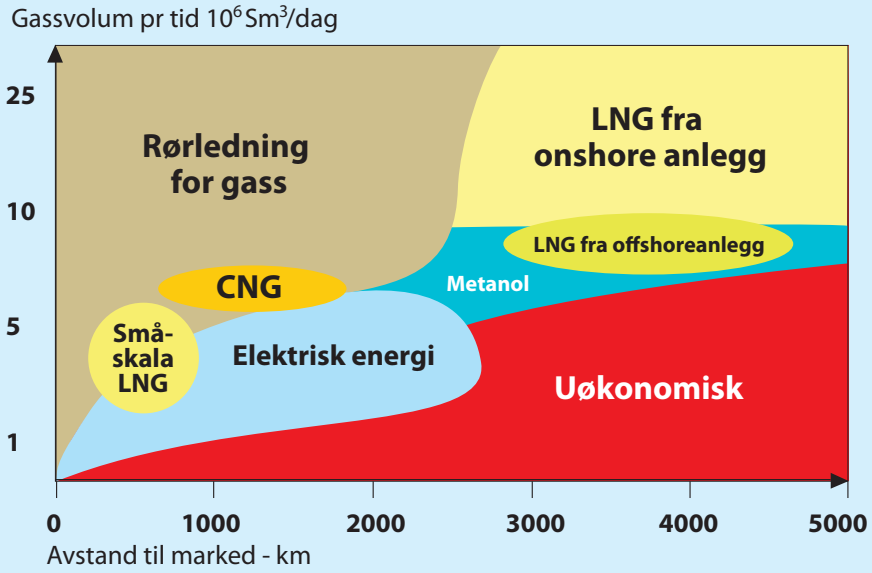
Brønnstrømmen fra et reservoar består av en blanding av hydrokarboner, vann og forskjellige andre elementer. Hensikten med offshore prosessering er å lage transporterbare produkter som kan videreforedles på land. Siden offshore prosessering er dyrt, ønsker vi i utgangspunktet minst mulig prosessering før ilandføring.

Transport av ubehandlet brønnstrøm. I noen tilfeller lar det seg gjøre å sende ubehandlet brønnstrøm til land. Dette gjelder først og fremst felt som ligger nær land og som inneholder forholdsvis tørr gass. I slike tilfeller transporteres brønnstrømmen i rør til et prosessanlegg på land. Ormen Lange og Snøhvit er eksempler på dette. Slik brønnstrømtransport er imidlertid ikke uproblematisk. Det er som regel nødvendig å tilsette kjemikalier for å motvirke korrosjon, hydratdannelse og avleiring av voks og andre faste stoffer på rørveggen. Dette kan medføre store operasjonelle problemer, og i verste fall blokkere rørledninger fullstendig.

Offshore separasjon. Det vanligste er imidlertid å separere olje, gass og vann offshore (se side 10-12). Ved produksjon fra et *olje*reservoar vil de letteste hydrokarbonene (C=2—8) skilles ut og gå over i gassform (assosiert gass), mens de tyngre hydrokarbonene forblir i væskeform (råolje), se side 10-9. Ved produksjon fra et *gass*reservoar vil de tyngste hydrokarbonene (C=5-8) skilles ut og gå over i væskeform (kondensat), mens de letteste hydrokarbonene forblir i gassform. Kondensat kan betraktes som en lett olje. Vannet renses og slippes ut i sjøen, eller det injiseres tilbake i reservoaret.



Skjematisk oversikt over prosesser som hydrokarboner gjennomgår på sin vei fra et gassreservoar til salgbare produkter. *Se også side10-9, som gir tilsvarende oversikt for et oljereservoar.*
C_1 = metan (CH_4), C_2 = etan (C_2H_6), C_3 = propan (C_3H_8), C_4 = butan (C_4H_{10})



Til venstre: Prinsipielle metoder for sjøtransport av energi produsert av gass (metan), avhengig av gassvolumet per tid og avstand til markedet. *Fra [10.6]*

Energitransport i skip kan nyttes for gass som omformes til
- *LNG i onshore (store) anlegg*
- *metanol i onshoreanlegg*
- *LNG i offshore-anlegg (små-anlegg eller mulige, framtidige, flytende, større anlegg)*

Energitransport til havs kan også foregå i
- *rørledninger, for både olje og gass*
- *elektriske kabler, dersom gassen brukes som brensel til produksjon av elektrisk energi i et kraftverk*

Ovenfor: Skip for frakt av CNG (komprimert til 220 bar). Gassen lagres i rør som er kveilet opp i karuseller. *Fra [10.6, se også www.Coselle.com]. Skipet drives av gass fra egen last.*

Mengden av væske i forhold til gass varierer fra reservoar til reservoar. I noen tilfeller er det hensiktsmessig å blande væske og gass slik at transporten kan foregå i en og samme rørledning. Dette er særlig aktuelt hvis vi har mye gass og litt kondensat.

Transportmetoder. Oppsummert kan vi altså snakke om "flerfasetransport" (ubehandlet brønnstrøm, det vil si olje, gass og vann), "tofasetransport" (olje/kondensat og gass) og "enfasetransport" (olje og gass hver for seg). Både flerfasetransport, tofasetransport og transport av ren gass foregår i rørledninger med høyt trykk, gjerne opp mot *200 bar.*

Gass kan også transporteres i skip, da i form av LNG eller CNG (se figuren side 9–23 og til høyre). Omformingen til LNG krever så store og komplekse anlegg at dette til nå ikke har vært gjort offshore. Gass fra et felt må altså først transporteres til land i rørledning, før den eventuelt transporteres videre som LNG.

Olje og kondensat transporteres til land i rørledninger eller skip. Ved rørledningstransport er væsken under trykk og kan inneholde noe gass. Ved skipstransport har væsken atmosfærisk trykk. Den må derfor være stabilisert, noe som betyr at den kun kan inneholde *små* mengder av lette hydrokarboner.

Transport av olje i skip

Transport av olje i tankskip er en svært fleksibel transportform. Transporten kan foregå over korte og lange avstander, og lasten kan leveres i forskjellige havner etter behov. Hvis produksjonsnivået endrer seg, kan transportkapasiteten tilpasses ved å endre antall skip. Det er imidlertid behov for et eget system for offshore lasting, også kalt bøyelasting. Dette er et system for overføring av olje fra produksjonsanleggene til tankskipene.

Det er helt avgjørende at systemet for offshore lasting er så pålitelig og robust at produksjonen kan gå kontinuerlig, uavhengig av værforhold, og at operasjonene ikke fører til uhell med utslipp av olje eller

andre skader. Det dreier seg om store volumer. I den perioden da Statfjordfeltet produserte for fullt, ble det i gjennomsnitt fylt opp et tankskip hver dag.

Skipstransport krever mellomlagring (bufferlagering). Det er vanskelig å koble opp systemene hvis signifikant bølgehøyde er høyere enn 4—5 meter. For å sikre regulariteten benyttes det i de aller fleste tilfellene et bufferlager på feltet. Det har vist seg at lagerkapasitet tilsvarende 5—6 dagers produksjon er tilstrekkelig for å sikre regulariteten. Et bufferlager for olje kan være integrert i selve produksjonsanleggene på feltet. Dette er tilfelle både når det benyttes bunnfaste betongplattformer og produksjonsskip. I andre tilfeller benyttes egne lagerskip som er permanent forankret på feltet. Når oljen mellomlagres i produksjonsskip eller lagerskip, overføres oljen direkte fra lageret til tankskipet via en lasteslange. Skipene er forbundet med en trosse. Når oljen mellomlagres i en bunnfast betongplattform overføres oljen via en lastebøye til tankskipet. Flere bøyetyper har vært benyttet, som flytende bøyer og store tårn leddet til et fundament på havbunnen. Tankskipet kobles da til lastebøyen med trosse og lasteslange.

Imponerende teknologi: Dynamisk posisjonering kan forenkle lasteoperasjonen på feltet. De tankskipene som benyttes til bøyelasting i Nordsjøen er spesialskip med avanserte systemer for dynamisk posisjonering. Disse systemene er blitt så gode at det nesten ikke er behov for trossene lenger. Det er til og med tatt i bruk et par systemer hvor oljen overføres fra en rørledning på havbunnen til tankskipet via fleksible rør, uten bruk av verken bøye eller trosse. De skipene som benyttes i Nordsjøen har en lastekapasitet på ca. 100 000 tonn. Et slikt skip kan fylles opp i løpet av ca. 15 timer.

Transport av olje og gass i rørledninger

Rørledningstransport til havs er en svært effektiv transportmetode når avstanden ikke er altfor stor, og det ikke er altfor dypt. Det kan være en del utfordringer knyttet til legging av røret, men når dette først er gjort, har vi en løsning med mange operasjonelle fordeler.

Store dimensjoner og påkjenninger på rørene. Transportkapasiteten bestemmes først og fremst av diameteren som gjerne defineres i tommer. De største gassrørledningene har en diameter på over 40 tommer, det vil si ca. en meter. De kan være flere hundre km lange. I forbindelse med Ormen Lange prosjektet ble det lagt et nytt 1200 km langt gassrør fra Nyhamna via Sleipnerfeltet til Easington i England.

Veggtykkelsen til røret, som gjerne er 25—35 mm for et stort rør, bestemmes av flere forhold. Før det første må røret dimensjoneres for å motstå det innvendige trykket, som kan være mer enn 200 bar. Videre må røret, når det er tomt, kunne motstå det utvendige vanntrykket uten å kollapse. Under selve installasjonen av røret utsettes det for bøyning, og særlig kombinasjonen av bøyning og utvendig vanntrykk kan føre til overbelastning, kollaps og flattrykking. Dette kan videre føre til kollaps også av rørdelen som allerede ligger på havbunnen. For å hindre slike sammenbrudd settes det med jevne mellomrom gjerne inn "bulestoppere" i form av rørelementer med større veggtykkelse.

Rørlegging

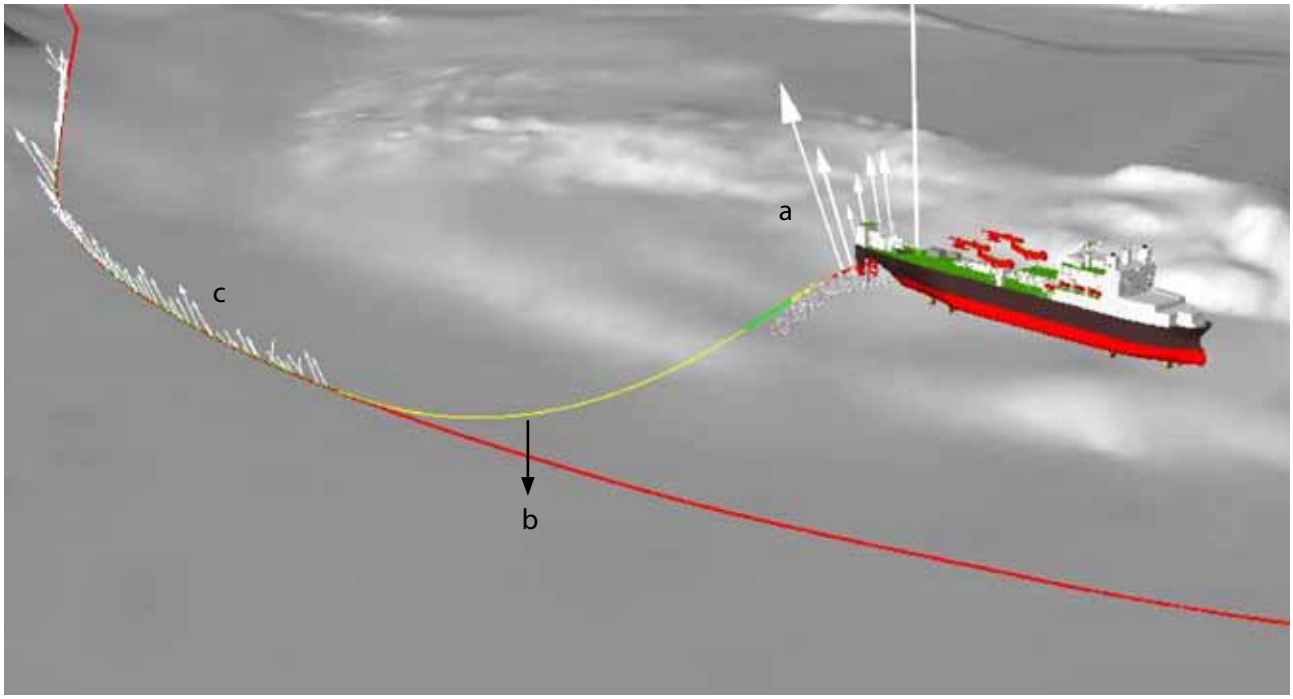
Installasjon av rørledninger til havs er store og komplekse operasjoner. Rørene produseres i lengder på tolv meter og transporteres så til et anlegg hvor de påføres et vektbelegg av asfalt og betong slik at det ferdige røret ikke skal flyte opp. De bearbeidede rørelementene transporteres deretter ut til rørleggingsfartøyet, hvor de sveises sammen og legges kontrollert ned på havbunnen.

Rørleggingsfartøyene er store anlegg med flere sveisestasjoner og flere hundre arbeidere. Rørledningen som ble lagt i forbindelse med Ormen Lange er sammensatt av 100 000 rørlengder, og det gikk med en million tonn stål.

Havbunnen. Store områder av havbunnen er jevn og flat, men i noen områder kan den være svært kupert. Rørledningen kan da bli hengende fritt over en grop eller "dal". Lengden av slike "frie spenn" må reduseres. Strøm på tvers av rørledningen kan føre til vibrasjoner og utmatting. For å redusere lengden av frie spenn legges det ned mye arbeid i kartlegging og trasevalg. Om nødvendig kan groper fylles opp med stein og høyder kan fjernes, men dette er kostbart.

Vedlikehold og reparasjon. Rørledninger må også konstrueres slik at det kan sendes både renseplugger og inspeksjonsverktøy gjennom rørledningen i driftsfasen. Dette krever spesielle sende- og mottaksinnretninger for slikt utstyr, og det er viktig å tenke gjennom alle konsekvenser av eventuelle sprang i diameter og bruk av Y- eller T-koblinger av eventuelle grenrør.

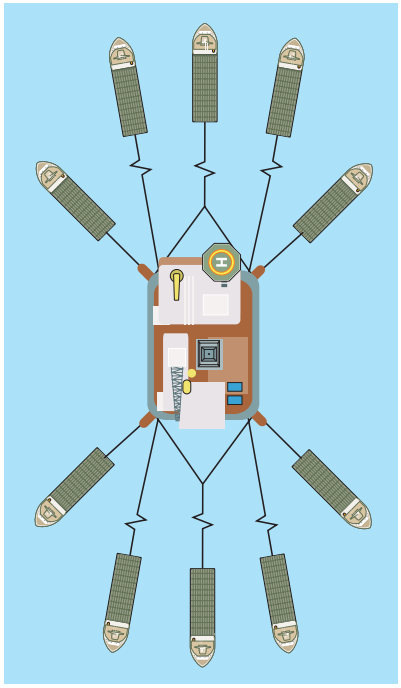
Rørleggingsfartøy
Dersom rørdiameteren ikke er for stor, tas røret om bord i rørleggingsfartøyet oppkveilet på en trommel. Denne glir ut på en rampe når skipet beveger seg. Ved større diametere blir røret etter hvert sveiset opp på stedet før det glir ut. Rampen fungerer slik at bøyemomentet på røret ikke skal bli for stort. Det utsettes likevel for store normalkrefter, som det fremgår av figuren nedenfor.



En rørledning på havbunnen utsettes for flere typer krefter under rørleggingen:
a. normalkrefter mellom røret og rampen på rørleggingsfartøyet.
b. opplagerkrefter fra ujevnheter på havbunnen.
c. tyngde fra fritthengende rør.
Under drift omfatter påkjenningene spenninger fra innvendig trykk og bøyspenninger pga. ujevnheter på havbunnen. Figuren er hentet fra numerisk simulering, utført for Marintek ved Svein Sævik.

Hvordan plasseres og sammenkobles utstyr på havbunnen?
Slepe- og løfteoperasjoner. Installasjoner

Et utvalg av produksjonsutstyr som er i bruk på et petroleumsfelt. Med marine operasjoner menes slike operasjoner som kreves for å bringe utstyret på plass samt gjøre det driftsklart. *Fra [10.12]*



Eksempel på arrangement av slepebåter ved innenskjærs sleping av en plattform (Heidrun). *Fra [10.5]. Det kreves da mange slepebåter til manøvreringen. Ved sleping på åpent hav samarbeider slepebåtene i én retning.*

Hva mener vi med marine operasjoner?

Det vises til figur til venstre. Kort sagt er marine operasjoner de operasjoner som er nødvendige for å installere de viste enhetene og klargjøre feltet for produksjon, i tillegg til å sørge for forsyninger under drift. De viktigste av disse operasjonene omfatter:

- **Slepeoperasjoner.** Plattformer og andre store utstyrsenheter slepes ut på lektere eller i flytende tilstand. Noen eksempler er omtalt nedenfor. Mindre utstyrsenheter og forsyninger transporteres med forsyningsskip eller andre spesialskip.
- **Løfteoperasjoner** er nødvendig både i forkant og etterkant av selve transporten. Eksempler på tungløfteoperasjoner er vist nedenfor, mens reguleringstekniske sider ved vanlige kranoperasjoner til havs er berørt i kapittel 8.
- **Posisjonering.** Ofte skal utstyr plasseres meget nøyaktig i forhold til borehullet på havbunnen, eller i forhold til annet utstyr på overflaten. Dette stiller store krav til bestemmelse av posisjon, som dessuten må opprettholdes uavhengig av strøm, bølger og vind. Slike forhold ble tatt opp i kapitlet om regulering (side 8-8).
- **Installasjon og driftsklargjøring.** Når alle enheter er kommet på plass, skal de forankres, kobles sammen og gjøres driftsklare. I tillegg til konstant assistanse av kranfartøyer, kan slikt installasjonsarbeid kreve spesialskip, dykkere og/eller ubemannede fartøyer (AUV og ROV, se side 10-26/27).
- **Rørlegging.** Utbygging av et felt krever oftest både legging av eksterne og interne rørsystemer (se forrige side).
- **Forsyningsoperasjoner.** Disse skjer med forsyningsskip, som ble nærmere omtalt på side 9-29).

Slepeoperasjoner

Manøvrering av tunge slep er krevende. Fagverksplattformer (stålplattformer) slepes oftest i liggende tilstand på lektere, mens oppjekkbare plattformer, betongplattformer og halvt nedsenkbare plattformer slepes i flytende tilstand. Plattformer har ofte svært store masser. Det tar derfor lang tid å forandre fart eller retning for en plattform under slep (se eksempel nedenfor). Dette stiller store krav til planlegging av operasjonen og personalets dyktighet under manøvrering. Særlig gjelder dette før slepet kommer ut på åpent hav.

Eksempel. Akselerasjon av stor plattform. Vi tar for oss en betongplattform med masse $0{,}6 \cdot 10^6$ tonn. Tar vi hensyn til tilleggsmassen av vann som dras med under slepet, regner vi med $1{,}0 \cdot 10^6$ tonn. Plattformen slepes med tre slepebåter som hver genererer en slepekraft på 2000 kN, som settes konstant. Hvor stor akselerasjon får da plattformen, og hvor lang til tar det å øke hastigheten fra 0 til 1 knop?

Løsning:

$a = F / m = 3 \cdot 2000 \cdot 10^3 \text{ N} / 1{,}0 \cdot 10^9 \text{ kg} = 0{,}00067 \text{ m/s}^2$

$t = v / a = 1 \cdot (1852/3600) \text{ (m/s)} / 0{,}00067 \text{ (m/s}^2\text{)} = 770 \text{ s} = 13 \text{ min.}$

Tungløfteoperasjoner

Løfteoperasjoner til havs er svært krevende. Dette gjelder i spesiell grad for tungløfteoperasjoner. Disse omfatter ofte installasjoner av enheter som skal plasseres med stor nøyaktighet på et gitt sted. Vind, strøm og bølger utgjør sterke krefter som kan føre til ukontrollerbare bevegelser. Det er derfor nødvendig med grundig planlegging og beregninger på forhånd. Beregningene gjøres for å finne maksimalgrenser for bølgehøyde og vind, slik at operasjonen skal kunne gjennomføres på en sikker måte. Figur øverst til høyre viser løft av en 1150 tonn undervannskonstruksjon fra en lekter. Det tredje bildet viser simulert nedsetting av konstruksjonen på 850 meters dyp på gassfeltet Ormen Lange utenfor Molde. Konstruksjonen ble satt ned med mindre enn én meter avstand fra planlagt posisjon.

Nedenfor er vist enda et eksempel på en tungløfteoperasjon. Her er det en boligmodul som skal på plass på toppen av en stålplattform. Vi skjønner at også dette krever en meget nøyaktig posisjonering av kranfartøyet under operasjonen. Lærebokas omfang tillater ikke bruk av mer plass til dette temaet, men figuren øverst på forrige side viser at det ikke hadde vært vanskelig å finne en rekke andre eksempler.

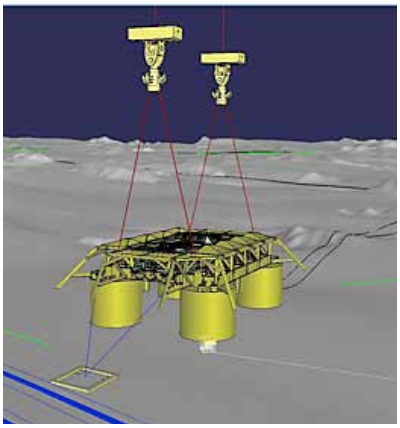
Installasjon og driftsklargjøring.

Til slutt må det sørges for at alle utstyrsenheter kobles sammen til et system og gjøres driftsklare for det som er hovedoppgaven, nemlig å hente opp olje og/eller gass fra feltet. Ser vi på figuren øverst på forrige side, skjønner vi fort at dette krever ytterligere en rekke ulike installasjonsoppgaver, i tillegg til å plassere enhetene der de skal være.

Her er et annet kranfartøy i aktivitet. En boligmodul skal plasseres på en stålplattform. *Fra [10-12]*

Kranfartøyet "Thialf" er et av verdens største, med løftekapasitet 2x7000 tonn. *Her skal en bunnramme løftes fra en lekter, før installasjon på havbunnen.*

Fotografi av bunnrammen, tatt fra dekket til "Thialf". *Legg merke til wiredimensjonene.*

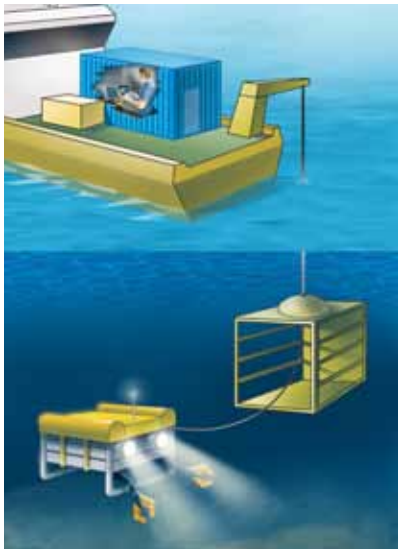


Bunnrammen like før plassering på havbunnen. *Sylindrene vil synke ned i det bløte bunnmaterialet og stabilisere konstruksjonen.*

Det øverste og nederste bildet er hentet fra en numerisk simulering, utført av MARINTEK, [Peter Sandvik]. Foto: Norsk Hydro.

Hvordan plasseres og sammenkobles utstyr på havbunnen?

Ubemannede undervannsfartøy



Elementer i et ROV-system

Kontrollcontaineren *inneholder kontrollsystem, pilotkonsoll, videomaskiner, monitorer, sonar, videoswitch etc.*

Verkstedcontaineren *inneholder det meste av verktøy for å gjøre reparasjoner på utstyret.*

Løftesystemet *består av en A-ramme og en vinsj med løftekabel.*

Garasjen *har et eget computer-system som styrer funksjonene på denne. samt en kabel som spoles ut når ROV-en beveger seg.*

ROV-en *blir manøvrert ved hjelp av hydrauliske eller elektriske thruster-motorer. Vanligvis er det to forover/bakover-thrustere, én-to sideveis-thrustere, og to-tre vertikal-thrustere. Hydraulisk kraft skaffes fra hydrauliske pumper drevet med elektromotorer. Hydraulikkanlegget betjener også diverse verktøy, bl.a. for operasjoner som krever tilgang på momenter, børster for rengjøring, manipulatorer, wirekutting, osv. Alt dette styres via en egen computer, som også opererer kameraer, sonarer, etc.*

Ubemannede undervannsfarkoster spiller i dag en viktig rolle innenfor offshorevirksomheten. Det skilles mellom to hovedgrupper av slike farkoster:

- fjernstyrt undervannsfarkost – ROV (remotely operated vehicle)
- autonom undervannsfarkost – AUV (autonomous underwater vehicle)

Farkoster av begge typer brukes til både kommersielle, militære og vitenskapelige formål.

Fjernstyrt undervannsfarkost – ROV

Fjernstyrte undervannsfarkoster er svært viktige verktøy innen offshorevirksomheten. De utfører i dag mange oppgaver som før krevde dykkere. Dette er undervannsfarkoster som blir fjernmanøvrert fra et kontrollrom på et skip eller en offshoreplattform. Farkostene blir brukt til utallige oppgaver som detaljert kartlegging av havbunn, inspeksjon, vedlikehold og reparasjon av havbunnsinstallasjoner, søk og bergingsoperasjoner osv.

Beskrivelse av et ROV-system

Selve ROV-en inngår som element i et større ROV-system, som består av flere større deler (se figur til venstre). I tillegg er det ofte en egen enhet for å rense oljen på ROV-en, og en enhet for strømforsyning. Et ROV-system er teknisk avansert, og det kreves høy kompetanse ved operasjoner.

Hovedtyper av ROV-er

Observasjonsfarkoster. En observasjonsfarkost er som oftest en forholdsvis liten farkost med varierende utforming. Størrelsen kan variere fra størrelse med en skoeske til en fryseboks. Den blir drevet av tre eller flere elektriske posisjonspropeller, og er utstyrt med et videokamera som sender levende bilder til overflaten. Observasjonsfarkosten blir brukt til små, visuelle kartleggings- og inspeksjonsjobber, ved dykkeoperasjoner og som støttefarkost for arbeidsfarkoster.

Arbeidsfarkoster. Arbeidsfarkoster er vesentlig større enn observasjonsfarkostene, og i likhet med observasjonsfarkostene er de elektrisk drevet. De har dog som oftest med et hydraulikkaggregat som driver posisjonspropellene. Hydraulikkaggregatet driver også en mengde valgfritt ekstrautstyr som høytrykksspyler, moment-trekkeverktøy, kutteverktøy, roterende børsteverktøy og annet. De fleste arbeidsfarkostene har også en eller flere hydrauliske "armer". Alt ekstrautstyret kan demonteres og monteres raskt, og farkosten kan relativt hurtig skreddersys til hvert enkelt arbeidsoppdrag.

Kartleggingsfarkoster. Kartleggingsfarkoster er i hovedsak oppbygd på samme måte som arbeidsfarkostene, men har kartleggingsutstyr som er mer eller mindre er montert permanent montert på farkosten. Kartleggingsutstyret er akustisk utstyr som kartlegger havoverflaten og grunnforhold. Surveyfarkostene har også flere videokameraer. Det finnes i tillegg en rekke ekstrautstyr og verktøy for ulike arbeidsoppgaver, som sporing av rør og kabler under havbunnen, sporing av pigger i rør osv.

Autonom undervannsfarkost – AUV

Hugin – en norskutviklet AUV. En autonom undervannsfarkost kan gjennomføre mange forskjellige oppdrag under vann. Siden den kan operere uavhengig av plattformer og kabler, har den en mengde forskjellige bruksområder innen oseanografi, miljøovervåking, havbunnskartlegging og fiskeriforskning.

Kontakt med moderskipet ivaretas via hydroakustisk link. Over denne kan operatøren sjekke data, at alle systemene virker samt legge inn korreksjoner på kurs. Også kommandoer for oppstigning kan sendes via denne linken.

Instrumentering. Instrumenteringen av Hugin er forskjellig avhengig av hvilket formål den skal brukes til. Når Hugin brukes for havbunnskartlegging, er den utstyrt med et penetrerende ekkolodd, et multistråleekkolodd og en sideskannende sonar. Dataene fra disse samles opp i et eget datalager om bord i farkosten. Disse dataene lastes så videre over i andre systemer for å generere kart.

Det penetrerende ekkoloddet er svært kraftig. Det sender en lydpuls ned i havbunnen fra farkosten. Denne lydpulsen er så kraftig at de kan trenge flere titalls meter ned i havbunnen. De reflekterte lydpulsene angir da hva slags sjøbunn som finnes i de forskjellige posisjonene Hugin har passert.

Nøyaktig kartlegging av havbunnen er av største betydning for områder der det skal installeres utstyr. Å få vite riktig topografi og havbunnsforhold på områder som kan ligge på mer enn 1000 meters havdyp, er viktig når milliarder skal brukes på å utvikle et petroleumsfelt.

Ekkoloddet brukes også for å navigere farkosten. Operatørene kan stille inn ønsket høyde over havbunnen slik at farkosten alltid vil holde en konstant avstand. Dataene som samles inn vil da korrigeres slik at de blir riktige i forhold til havoverflaten. Et multistråleekkolodd er svært nøyaktig. Det kan tolke forskjeller på centimeternivå, slik at det er mulig å konstruere svært nøyaktige 3D-terrengmodeller, som igjen danner grunnlaget for havbunnskart. Sideskannende sonarer brukes i tillegg for å kunne utvide områder som dekkes av et sveip med Hugin.

Lang driftstid under vann. Driftsiden er inntil 60 timer, noe som er en stor fordel. Hastigheten framover er rundt to knop. Da er det mulig å kartlegge store områder i løpet av relativt kort tid.

Havromskartlegging og overvåking. Du kan lese mer om undervannsoperasjoner og undervannsrobotikk på sidene 1—34/39, i forbindelse med havromskartlegging og overvåking. ROV-er og AUV-er er da selvsagt uunnværlige hjelpemidler. Og vi skal være klar over at slik virksomhet i framtiden dessuten vil foregå også i Arktis, og dermed delvis under is. Illustrasjoner er vist både på de nevnte sidene og på sidene 0—14/15 i kapitlet "Et hav av muligheter".

"Hugin" – en norskutviklet AUV
AUV-en lages av Kongsberg Maritime. Den har operert i flere år på petroleumsfeltene. Farkosten finnes i tre forskjellige varianter, for 1000, 3000 og 4500 meters vanndyp. Et nøkkelelement er "Hugin"s bruk av standard teknologi som muliggjør tilpasning til både sivile, kommersielle og vitenskapelige anvendelser. Den modulære oppbygningen tillater en rekke konfigurasjoner med nyttelast, slik at den kan skreddersys til kundens ønsker og behov.

For å drive AUV-en er det installert en elektrisk motor, et batteri eller en brenselscelle for å levere kraft til framdrift og instrumentering. Navigasjon gjøres med undervannsakustikk via havbunnsplasserte, hydroakustiske sendere plassert i kjente posisjoner. Siste generasjon av "Hugin 4500" er i tillegg ustyrt med treghetsnavigasjon.

Forsyningsoperasjoner – tjenester – logistikk

Logistikk -et emne av spesiell viktighet for petroleumsutvinning til havs

For en installasjon til havs er det som regel enda viktigere enn på land at operatøren legger så stor vekt på logistikk som mulig. Med logistikk mener vi systemer som sørger for at:
• riktig materiell
• riktig mengde
• riktig tilstand
foreligger på
• riktig sted
• riktig tid, og til
• riktig kostnad

Forsyningsvirksomheten – skip og baser

Mens vanlige handelsskip kan ta om bord forsyninger når de ligger ved kai, er de permanent plasserte offshoreplattformene – både de bunnfaste og flytende-, avhengige av at forsyninger blir tilført kontinuerlig, og at avfallsprodukter blir tatt med til land. Det er nesten alltid behov for drivstoff, vann og kjemikalier på offshoreplattformer. Andre kjemikalier, materialer og avfall må tas til land for deponering eller behandling for gjenbruk. Til dette benyttes spesielle forsyningsskip. Produsert olje transporteres normalt ikke av forsyningsskip.

Forsyningsskip har store dekksareal og håndterer en kombinasjon av dekkslast og bulklast i tanker under dekk. Dekkslast kan være mekanisk utstyr, materialer og containere. Lastetanker benyttes for boreslam, sement, diesel, ferskvann og kjemikalier. Dekkslast håndteres ved hjelp av plattformens dekkskraner, mens bulklast overføres gjennom plattformens lasteslangesystem.

Forsyningsskip kan også være utrustet for andre oppgaver, som brannslokking, oljevern/oppsamling og undervannsoperasjoner.

Forsyningsskipene opererer fra forsyningsbaser på land. Det er etter hver blitt etablert en rekke slike forsyningsbaser langs kysten. Noen er blitt utviklet til store, industrielle samlingssteder som tilbyr komplette logistikktjenester for kundene. Det er behov for personell innen de forskjellige logistikkdisiplinene, dypvannskaier, maskinpark for godshåndtering og lagringsplass.

Den norske offshoreflåten

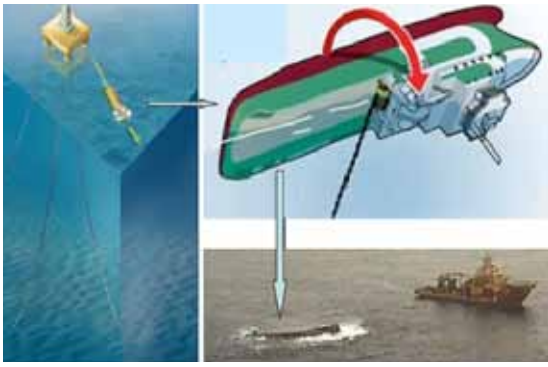
Norge er en av verdens største skipsfartsnasjoner, og innenfor kompetansekrevende og avanserte områder er vår markedsandel enda høyere. Innen offshore har vi verdens mest moderne og verdens nest største offshoreflåte etter USA. Norge kontrollerer nærmere 450 offshorefartøy. Av disse utgjør forsyningsskip 37 % og ankerhåndteringsskip 25 %, slik at disse gruppene til sammen utgjør mer enn 60 % av den norskkontrollerte offshoreflåten.

De viktigste oppdragsgiverne er oljeselskap som driver olje- og gassutvinning offshore. Andre oppdragsgivere er boreselskap, seismikkselskap og undervannsentreprenører. Tradisjonelt har disse rederiene arbeidet i Nordsjøen og i Norskehavet. I dag har andre internasjonale markeder fått samme størrelse, og viktige markeder er Brasil, Australia, Mexicogolfen og Vest-Afrika. Totalt utgjør nå aktivitet i utemarkedene en større andel enn Nordsjøaktiviteten.

Tjenester og aktiviteter

De fleste offshorerederiene har forsyningstjenester og ankerhåndtering som viktigste tjeneste. Rederiene yter i varierende grad støttetjenester til offshoreoperasjoner som seismikk, kabel-, og rørlegging, andre havbunnsoperasjoner, samt oljevernberedskap og redning.
I dag utvikles nye, avanserte tjenester knyttet til anleggsvirksomhet på havbunnen og brønntjenester.

Utviklingen synes å gå i retning av at de tyngste rederiene satser på kapitalintensive tjenester knyttet til seismikkundersøkelser, og avanserte operasjoner knyttet til havbunnsinstallasjoner og brønnintervenering. Andre satser mer på støtteoperasjoner og tradisjonelle forsyningstjenester. Dermed er vi på vei til å få en viss spesialisering innenfor enkelte av rederiene.



Et ankerhåndteringsskip (AHTS) kan utsettes for enorme krefter. *Her ser vi hvordan havariet av det norske Bourbon Dolphin skjedde utenfor Shetland i 2007. Fra [10.6]*

Skipstyper som brukes i offshorevirksomheten

Tradisjonelt har offshore service-rederiene satset på forsyningstjenester og ankerhåndtering, men det er et økende innslag av mer sofistikerte skipstyper, og her har rederiene vært særdeles innovative. Skipstypene som da er mer eller mindre spesialiserte har etter hvert fått engelske navn og betegnelser:

AHTS, Anchor Handling Tug Supply: Dette er skip med løftekapasitet på opptil 500 tonn. Disse hjelper rigger med ankerfortøyning, og kan i tillegg ha andre funksjoner for sleping, forsyning, redning osv.

PSV, Platform Supply Vessel: Dette er forsyningsskip som kan ta med mange typer flytende last og dekkslast.

MPSV, Multi Purpose Supply Vessel: Dette er skip bygget for forsyningstjenester, og kan også ha utstyr for diverse tilleggsfunksjoner for arbeid offshore.

ROV, Remote Operated Vehicle: Dette er skip med utstyr for betjening av fjernstyrt ubåt for inspeksjon eller arbeid på havbunn.

Construction: En økende andel av offshorefeltene blir bygget ut med havbunnsinstallasjoner.
Dette krever skip med stor krankapasitet tilpasset arbeid på havbunnen.

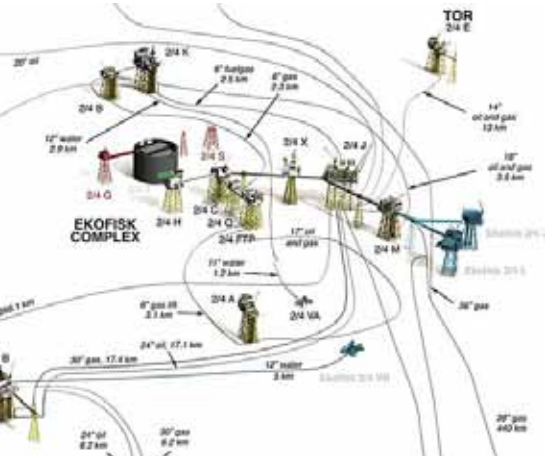
Well intervention: Dette er skip utrustet for påkopling på oljebrønner, for tidligproduksjon eller vedlikehold. Disse utfører arbeid som tidligere ble utført fra plattformer og rigger.

Det vises for øvrig til sidene 9—21, 9—28/29 og 9—38/39.

Forsyningsskip (PSV, Platform Supply Vessel)

Eksempler på utbygging av petroleumsfelt

Ekofisk - det første oljefeltet



Ekofiskfeltet. Fra [10.2]
Ekofiskfeltet er et oljefelt på 70—75 meters dyp. Den store betongtanken kom på plass i 1973. Feltet omfatter i dag en rekke installasjoner. Flere av de eldste er tatt ut av drift. Det pågår stor aktivitet med å fjerne disse. De stengte installasjonene er på tegningen markert med med svake konturer.

Selv om feltet betraktes som et oljefelt, produserer det også betydelige mengder gass (se figur neste side).

Ekofiskfeltet

Produksjonen fra Ekofisk startet i 1971, og de første årene ble feltet produsert til lasteskip fra fire brønner, fram til betongtanken med prosessanlegg var på plass i 1973. Denne betongtanken ble den første i en lang rekke betongplattformer som ble bygget i Norge. Flere felt i om- rådet ble knyttet opp mot Ekofisksenteret i årene som fulgte. Samtidig ble det lagt en oljerørledning til Teeside og en gassrørled- ning til Emden (Norpipe).

Ekofisk ble opprinnelig utbygd med trykkavlasting som drivmekan- isme. Siden har begrenset gassinjeksjon og omfattende vanninjeksjon bidratt til en betydelig økning av utvinningsgraden for olje, fra opp- rinnelig 18 prosent.

I 2010 har Ekofisk vært i produksjon i nesten 40 år. Det bygges fortsatt nye plattformer og det bores nye brønner. Det forventes at produk- sjonen vil fortsette i nye 40 år.

Ulykker og problemer på Ekofiskfeltet

Bravo-utblåsningen. Den 22. april 1977 skjedde den første ukontrol- lerte utblåsingen på norsk sokkel ved oljeplattformen Ekofisk B (Bravo) på Ekofisk. De profesjonelle brønndreperne "Red Adair" og "Boots" Hansen ble fløyet inn fra USA for å få kontroll over brønnen. Etter åtte dager klarte de det. Imidlertid har en ikke kunnet påvise alvorlige følger av ulykken, verken for sjøfugl, fiskebestand eller strender. En av grunnene er trolig at oljen fra Ekofisk er lett. Den fordamper hurtig og brytes raskt ned av vind og bølger.

Alexander L. Kielland-ulykken (se også side 6—26).
Alexander L. Kielland var en flyttbar plattform av type Pentagone. Plattformen hadde fem søyler (legger) som gikk fra dekket og ned til pongtongene. Det var én pongtong for hver søyle. Søylene, som var vertikale rør, hadde en diameter på 8,5 m. De var forbundet med et sett horisontale og skråstilte stag. Plattformen hadde et ankringssys- tem med to liner fra hvert av de fem hjørnene-, til sammen ti liner.

Den ble bygget som boreplattform, men ble hele tiden benyttet som flotell (boligplattform). Plattformen ble brukt på Ekofiskområdet, og de siste ni månedene før ulykken var den forankret like ved produk- sjonsplattformen Edda 2/7C. Det var forbindelse mellom de to platt- formene ved en gangbro som ble heist over i Alexander L. Kielland ved dårlig vær. Da ble også plattformen flyttet noe bort fra Edda 2/7C ved at man slakket på ankerwirene til to av søylene, samtidig som man strammet ankerwirene på to av de andre søylene.

Dette ble også gjort om ettermiddagen 27. mars 1980. Det var dårlig sikt, og vindhastighet på 16—20 meter per sekund (stiv kuling). Omkring kl. 18.30 om kvelden kunne de som var om bord høre kraftige lyder fra understellet på plattformen. Like etter kantret den.

Plattformen, som opprinnelig var bygd for å tåle bølger over 25 meter, krenget kraftig – opp til 32 grader – på kort tid, og bare 20 minutter etter at man hadde hørt de første ulydene, lå plattformen opp ned i det iskalde vannet. Mange av arbeiderne var fremdeles igjen inne i selve plattformen, i lugarer og fellesrom. Ettersom ulykken skjedde såpass raskt, var det få som rakk å få på seg redningsvest eller overlevelsesdrakt. Noen prøvde å nå livbåtene, men mange falt – eller hoppet – i det iskalde vannet.

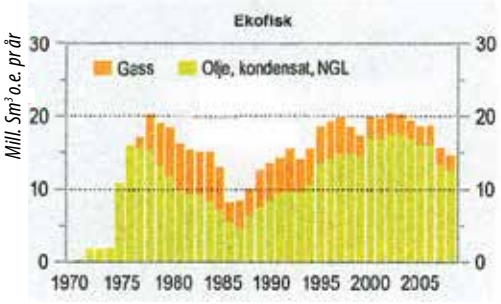
Ulykken var den verste i Nordsjøen på norsk område siden andre verdenskrig. 123 av de 212 om bord omkom.

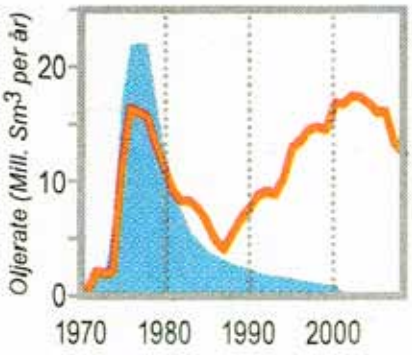
Innsynkingen på Ekofisk. Høsten 1984 ble det oppdaget at avstanden fra havflaten til dekk på plattformene på Ekofisksenteret var mindre enn da de ble installert. Flere målinger ble satt i gang for å kartlegge innsynkningsraten. Det ble klart at havbunnen på enkelte steder sank med nesten en halv meter i året. Reservoarbergarten i Ekofisk består for det meste av kalk. Bergarten er ekstremt porøs – det finnes soner der hulrommene utgjør mer enn 50 prosent av bergartvolumet. Oljen i reservoaret hadde etter forholdene høyt trykk og bidro til å bære vekten av overliggende lag.

Etter hvert som hydrokarbonene ble produsert, måtte bergarten bære en stadig større del av vekten av lagene over. I dag vet vi at belastningen ble så stor at kalken ga etter og sammenpressingen forplantet seg oppover til havbunnen. Spørsmålet var så om dette var noe en kunne leve med? Problemet var at bølgene ville kunne slå opp i dekket, noe de ikke var designet for.

Etter at mange mulige løsninger var vurdert, ble det konkludert med at plattformene måtte jekkes opp. Den endelige beslutningen om å heve de åtte stålplattformene, de to flammetårnene og brustøttene med rundt seks meter, ble tatt i 1986. Dette var et veldig omfattende og komplisert prosjekt, men i august 1987 var selve jekkingen fullført. Selve Ekofisktanken kunne ikke jekkes opp, og sommeren 1989 fikk den montert en ekstra beskyttelsesvegg på utsiden. Oppjekkingen av plattformene på Ekofisk var en suksess, men innsynkingen fortsatte.

Havbunnen under innretningene på Ekofisk synker fortsatt, men kun med 0,2 meter årlig. Total innsynking er i dag målt til nærmere ni meter. Vanninjeksjon benyttes i dag som hovedvirkemiddel mot reservoarsammentrykking.





Produksjonsutvikling på Ekofisk-feltet. Fra [10.2]
Fra 1987 ble det tatt i bruk vanninjeksjon som drivmekanisme for å øke utvinningsgraden. Senere er bruk av metoden økt i flere trinn, og dessuten supplert med en viss grad av gassinjeksjon. Særlig vanninjeksjonen har hatt en meget gunstig innvirkning på produksjonnen. Årlig produksjon var planlagt å nå maksimum allerede før 1980, mens den virkelig nådde nesten samme makisimumsverdi i ca. år 2003. Dette har medført at utvinningsgraden totalt for feltet har kunnet økes fra 18 % opprinnelig til ca. 50 %.

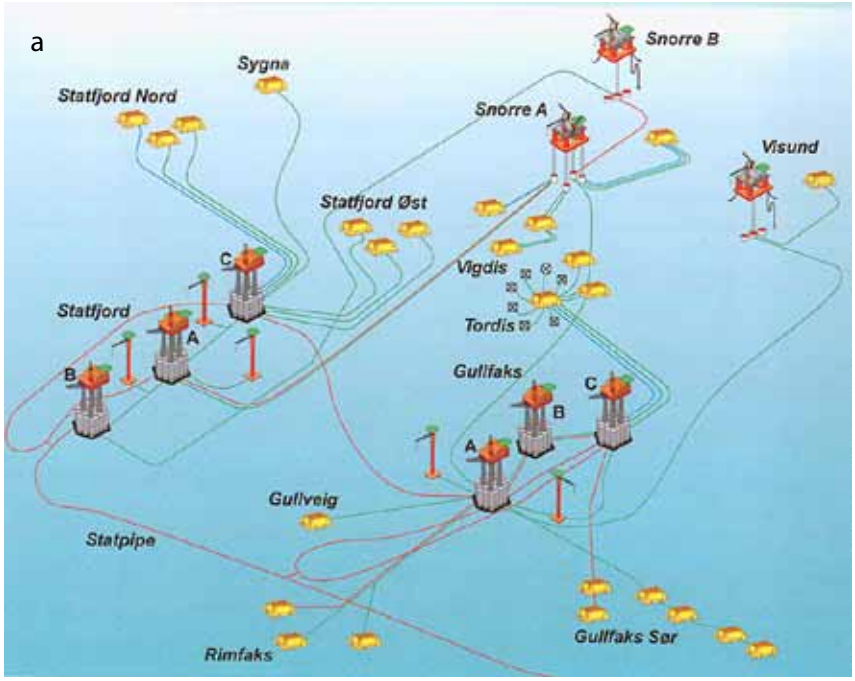
Eksempel på utbygging av petroleumsfelt:
Statfjord – kronjuvelen i Nordsjøen

b

c

Statfjordfeltet

Statfjordfeltet ble bygget ut i tre faser med fullt integrerte plattformer. Stabilisert olje lagres i lagerceller som er en integrert del av hver plattform. Lasting av olje foregår via ett av de tre oljelastesystemene som er på feltet. Gass transporteres gjennom Statpipe-rørledningen via Kårstø til Emden i Tyskland.



Installasjoner på Statfjordfeltet

Den nordlige delen av Nordsjøen omfatter hovedområdene Tampen, Oseberg/Troll og Balder/Heimdal (se kart på neste side). I Tampen-området ligger mange av de største oljefeltene på norsk kontinentalsokkel, blant annet Statfjord, Snorre og Gullfaks,som vist på figur a ovenfor. Selv om områdene ble utbygd tidlig, er ressurspotensialet stadig stort, og man antar at det vil foregå oljeproduksjon i enda i 20 år. Gassproduksjonen er ventet å fortsette i flere tiår.

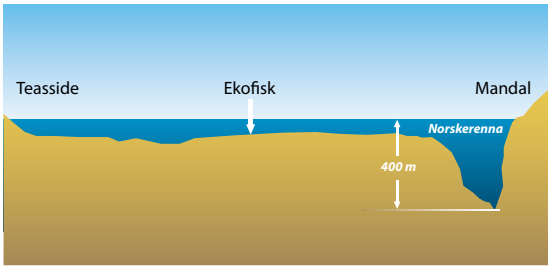
***Statfjordfeltet** ligger på ca. 150 m dyp på begge sider av norsk og bristisk kontinentalsokkel. Feltet ble bygget ut i perioden 1979 - 85, med tre fullt integrerte betongplattformer: Statfjord A, B og C. Statfjord A er vist på figur b ovenfor (og på side 10-13). Denne plattformen ble etter manges mening kronjuvelen på norsk kontinentalsokkel. Utbyggingskostnadene ble totalt på ca. 90 milliarder kr, hvorav selve plattformen utgjorde ca. 18 milliarder. Inntektene fra salg av olje og gass fra Statfjordfeltet har imidlertid vært enorme (ca. 1300 milliarder kr fra produksjonsstarten i 1979 og fram til 2010). Produksjonen var i 1983 rekordstor, hele $40 \cdot 10^6$ Sm^3 o.e.*

I tillegg er det bygget ut et satellittfelt 17 km nord for hovedfeltet (Statfjord Nord), og et felt sju km nordøst for hovedfeltet (Statfjord Øst). På Statfjord Nord er det undervannsproduksjon fra to brønner. I tillegg brukes en brønn for vanninjeksjon. Figur c viser brønnrammene. Gassen føres i to rør til C-plattformen, hvor den blir prosessert og lagret før videre transport. Statfjord Øst er bygget ut på samme måte (to brønner for undervannsproduksjon og én brønn for vanninjeksjon).

Eksempel på utbygging av petroleumsfelt:
Rørledninger og ilandføring

Som tidligere nevnt ble det i forbindelse med Ekofisk i 1977 etablert en gassrørledning til Tyskland, og en oljerørledning til Storbritannia. I forbindelse med den store Frigg-utbyggingen i 1978 ble det lagt nye gassrørledninger til Storbritannia. For å få en større del av verdiskapingen i Norge var det et klart ønske fra norske myndigheter om at både olje og gass skulle ilandføres til Norge.

Ved inngangen til 80-tallet var det imidlertid mange som betraktet den dype Norskerenna som en uoverstigelig hindring for rørledninger til fastlandet. Det ble satset stort på teknologiutvikling og kvalifisering, og det ble besluttet å bygge ut rørledningssystemet Statpipe for å kunne eksportere gassen via Norge.



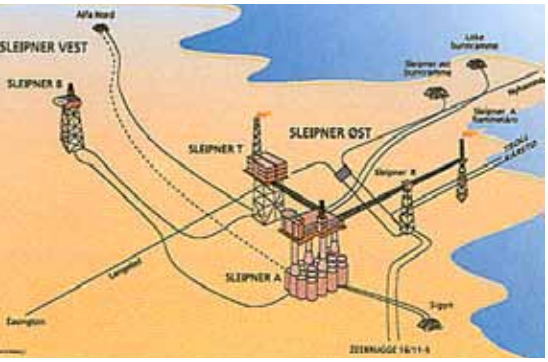
Norskerenna
Med Statpipe-prosjektet ble Norskerenna krysset to ganger. Det ble lagt rørledning fra Statfjord til Kårstø og ut igjen til Ekofisk-området for tilkobling til det allerede etablerte transportsystemet Norpipe. Senere er Norskerenna krysset mange ganger.

Kårstøanlegget, det første prosessanlegg på land. Statpipe-prosjektet har vist seg å være uhyre viktig både for Norge og norsk sokkel. Anlegget på Kårstø mottar i dag gass ikke bare fra Statfjord, men fra en lang rekke felt i Nordsjøen og Norskehavet. Gassen som kommer i land er en såkalt rikgass, det vil si en gass som inneholder de hydrokarbonene som ikke kan være innblandet i råoljen som skal fraktes i skip.

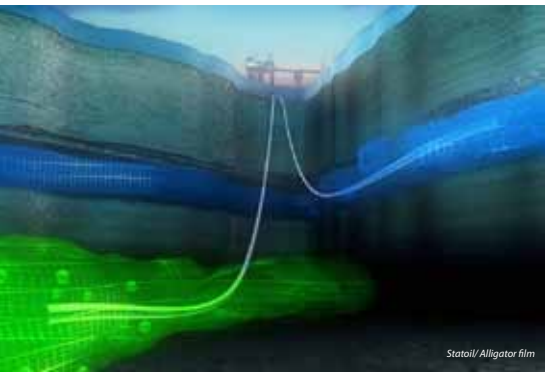
Flere prosessanlegg på land: Kollsnes, Nyhamna, Tjeldbergodden og Melkøya. På samme måten som Kårstø ble etablert for Statfjordgassen, så ble Kollsnes etablert for Troll, Nyhamna for Ormen Lange, Tjeldbergodden for Heidrun og Melkøya for Snøhvit. Disse anleggene er viktige knutepunkter i det vi kaller infrastruktur.

Rørledninger i Nordsjøen og Norske-havet. Prosessanlegg på land. *Rørledningene utgjør i dag et omfattende nettverk på totalt 7800 km. De fleste er gassrør.*

Eksempler på utbygging av petroleumsfelt:
Norge blir storleverandør av gass



Sleipner-feltet fra (10.2)
Feltet består av et gassfelt på ca. 110 m havdyp (Sleipner Vest) og et gasskondensatfelt på 82 m dyp (Sleipner Øst). Gassreservoarene ligger på hhv. 3450 m og ca. 2300 m dyp. B-plattformen fjernstyres fra A-plattformen (se figuren). Sleipner T-plattformen skiller ut CO_2, som transporteres videre og lagres i Utsira-formasjonen (se figur nedenfor).



Tilbakeføring av CO_2 til havbunnen. *Fra [10.3]*
Fra naturgassen fra Sleipner Vest skilles det årlig ut en million tonn CO_2, som pumpes ned i Utsira-formasjonen. Dette er en 250 m tykk, porøs sandsteinformasjon med et 80 m tykt, tett lag av leirskifer som tak. CO_2-gassen tilføres gjennom det øverste røret og brer seg utover i den porøse formasjonen, som har plass til 600 milliarder tonn. Dette er nok til å kunne ta imot CO_2-innholdet i forbrenningsgassene fra alle varmekraftverkene i Europa i 600 år.

Sleipner-feltet, det første store gassfunnet

Utbyggingen gikk ikke problemfritt. *23. august 1991, kort tid før dekket og betongunderstellet til Sleipner A skulle koples sammen, sank understellet på over 200 meters dyp i Gandsfjorden ved Stavanger.* Konstruksjonsfeil var årsaken, men et nytt understell ble bygget i rekordfart. Sleipner-feltet ble etter hvert bygget ut med flere plattformer (se figur).

Gassen fra Sleipner Vest inneholder ni prosent CO_2. Det er langt over salgsgasspesifikasjonen, og CO_2-innholdet må derfor reduseres. På Sleipner T skilles CO_2 ut fra brønnstrømmen og lagres i en spesiell geologisk formasjon (Utsira) 800 meter under havbunnen.

Troll-feltet, en historie om å flytte grenser

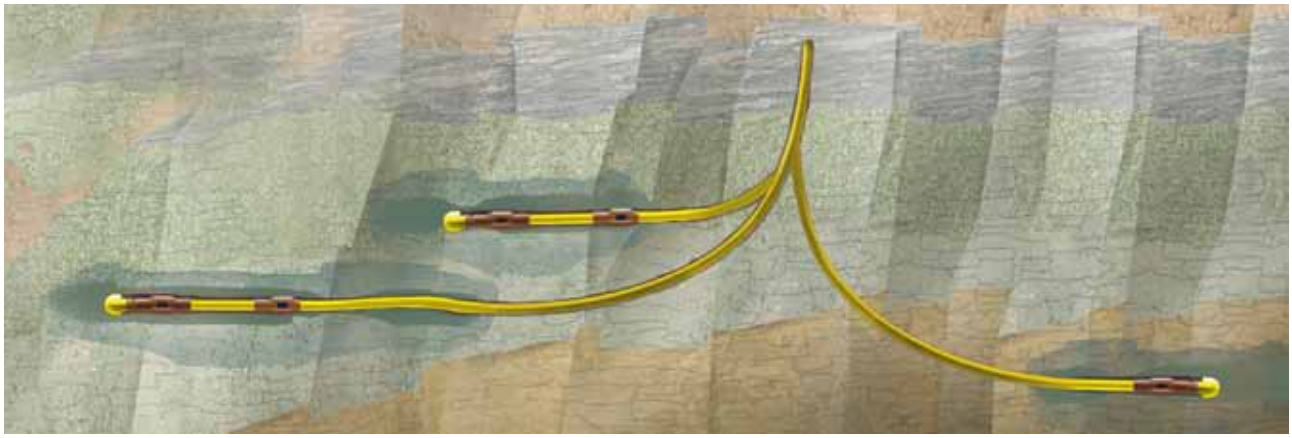
Enorme gassreservoarer. Troll-feltet ligger i nordre del av Nordsjøen, om lag 65 kilometer vest for Kollsnes i Hordaland. Feltet strekker seg over et område på 750 kvadratkilometer. Troll er selve hjørnesteinen i norsk gassproduksjon, og det største gassfunnet som er gjort i Nordsjøen. Feltet inneholder om lag 40 prosent av de samlede gassreservene på norsk kontinentalsokkel. Det er ventet at de enorme gassreservoarene 1400 meter under havoverflaten vil kunne produsere i minst 70 år.

Norske Shell fikk ansvaret for første fase av utbyggingen av gassdelen på Troll. Opprinnelig var det tenkt at dette skulle bli en fullt integrert plattform av enorme dimensjoner, men det ble senere enighet om å legge prosessanleggene på land. Kollsnes nord for Bergen ble valgt som ilandføringssted. Dermed kunne det bygges en mye enklere plattform med lavere bemanning ute i havet. Produksjonen startet i 1996, med Norske Shell som operatør.

Betongplattformen Troll A har likevel enorme dimensjoner (se figur side 10–13), og er den høyeste installasjon som noensinne er flyttet av mennesker på jordens overflate. Plattformens understell er bygget for en levetid på 70 år. Trykket i Troll-reservoaret synker etter hvert som gassen produseres. Gassen trenger derfor trykkstøtte før den sendes i rørledningene til Kollsnes. I 2005 ble to kompressorer installert på plattformen for å opprettholde produksjonen. Kompresjonsutstyret drives med strøm fra land. Dette sikrer null utslipp av karbondioksid og nitrogenoksider fra både plattformen og fra gassbehandlingsanlegget på land.

Troll produserer også olje. Troll er også blant de største oljefeltene på den norske kontinentalsokkelen. Plattformene Troll B og Troll C produserer fra de tynne oljeførende lagene i Troll Vest. Troll B er en flytende prosess- og boligplattform med betongunderstell, mens Troll C er en tilsvarende plattform med stålunderstell.

Avansert brønnteknologi, horisontalboringer og forgreninger. De oljeførende lagene er på mellom 22 og 26 meter i Troll Vest oljeprovins, og mellom 11 og 13 meter i Troll Vest gassprovins. For å kunne utvinne olje fra de tynne oljelagene, har det vært nødvendig å utvikle avansert bore- og produksjonsteknologi. Alle de 110 produksjonsbrønnene som etter planen skal bores i Troll Olje, er horisontale brønner.



Horisontalboring. *Denne teknikken gir betydelig økt utvinningsgrad av petroleumsfelter*

Det innebærer boring i to faser: først ned til reservoaret som ligger 1600 meter under havbunnen, og deretter opptil 3200 meter horisontalt utover i reservoaret. 28 av brønnene er såkalte grenbrønner, det vil si de har to eller tre horisontale seksjoner som er samlet i et krysspunkt i reservoaret.

Åsgard – et av de mest komplekse prosjektene, med massiv satsing på undervannsteknologi og nærmere 60 brønner

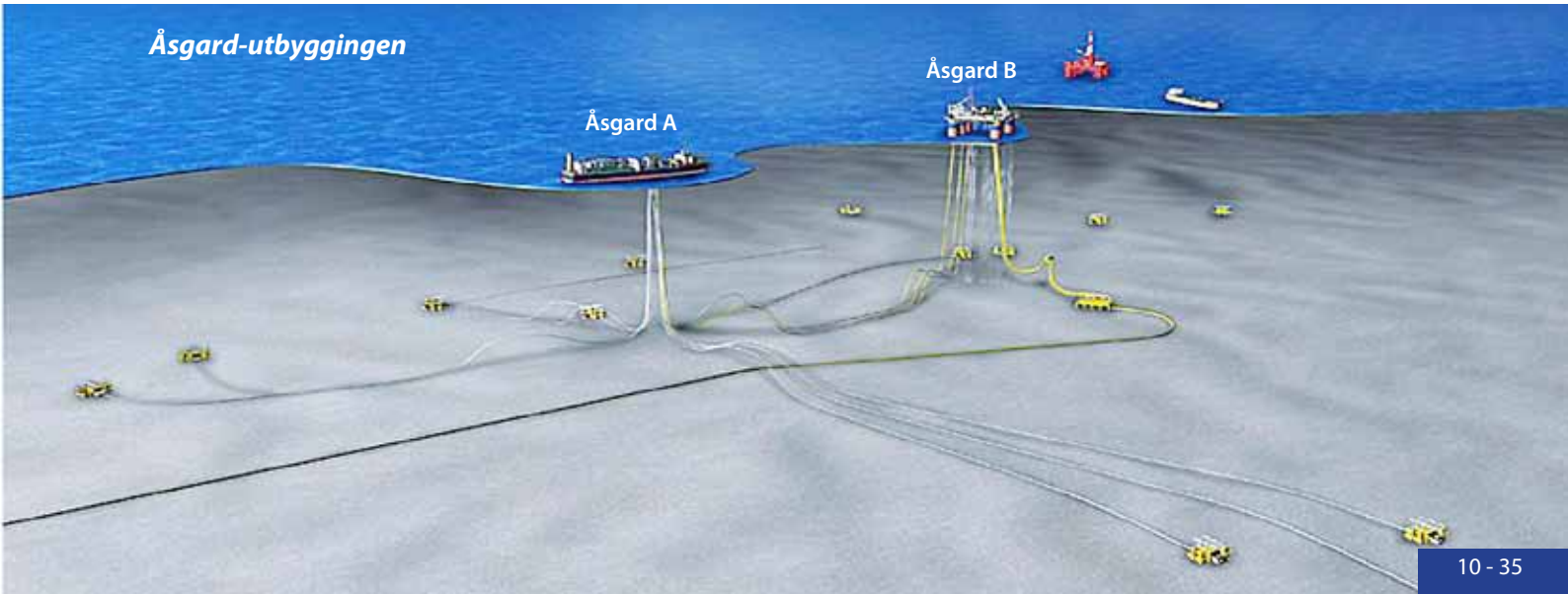
Åsgard er et fellesnavn for en utbygging som omfatter tre felt: oljefeltet Smørbukk Sør, gass/kondensatfeltet Smørbukk og gassfeltet Midgard. Utbyggingen ble gjort i to faser: en væskefase (Åsgard A) og en gassfase (Åsgard B). For væskefasen er det benyttet et produksjonsskip og for gassfasen en flytende plattform og et lagerskip. All produksjon kommer fra havbunnsbrønner.

Det som kanskje har hatt størst betydning er at Åsgard med sine store gassvolumer gjorde det mulig å legge et stort gassrør hele veien fra Haltenbanken til Kårstø. I ettertid har alle feltene i området knyttet seg til dette røret, og eksporterer nå gass til Europa via Kårstø. Utbyggingen medførte også en stor utvidelse av Kårstøanleggene.

Anleggene på Melkøya. *Gasstrømmen fra brønnene på feltet (inkl. CO_2, NGL og kondensat) blir ført i et 160 km langt rør direkte til videre behandling på Melkøya.*

Snøhvit- uten plattformer

For Snøhvit var avstanden til alle aktuelle gassmarkeder så stor at det ikke lot seg gjøre å satse på rørledningstransport. I stedet ble det på Melkøya laget et anlegg for nedkjøling av gassen slik at den kunne transporteres flytende i spesialskip til Europa, USA og Japan. Slik nedkjølt gass i flytende form kalles LNG (liquiefied natural gas). Temperaturen under lagring og transport er -161°C. På mottaksterminalen blir væsken gjort om til gass igjen, og ført inn på et distribusjonsnett.



Eksempler på utbygging av petroleumsfelt:

Norne - det første med flytende produksjon

Norne er et oljefelt med en overliggende gasskappe lokalisert om lag 200 km vest for Sandnessjøen og 85 km nord for Heidrunfeltet, og var i sin tid den nordligste utbyggingen på norsk sokkel. Havdybden i området er rundt 370 meter. Ved tildelingen var det fem rettighetshavere, med Statoil som operatør.

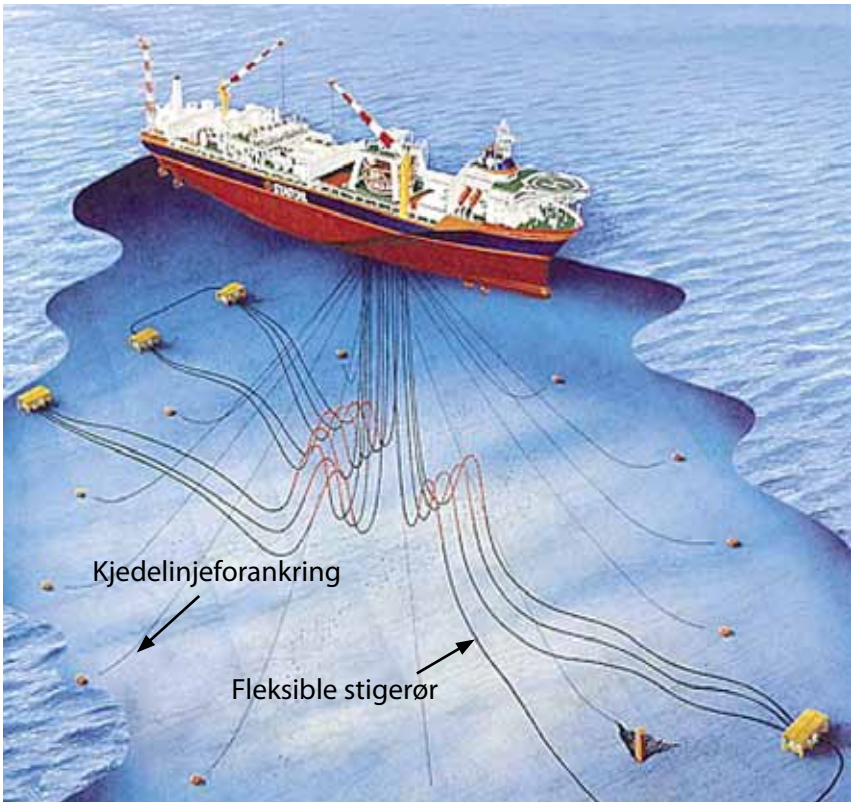
Leting og avgrensing

Det ble påvist en olje-vannkontakt på 2690 meter under havflaten. Hydrokarbonene finnes i en rundt 110 meter tykk oljesone med en overliggende gasskappe. Reservoartrykk og temperatur ble bestemt til om lag 275 bar og 98 °C. Det påviste hydrokarbonporevolumet ble beregnet til 263 mill. m^3. Ved overflatebetingelser tilsvarer dette 160 mill. Sm^3 olje og 29 mrd. Sm^3 gass, hvorav 18 mrd. Sm^3 assosiert gass og 11 mrd. Sm^3 fri gass i gasskappen.

Planlegging av utbygging

For å finne fram til en god dreneringsstrategi, ble ulike drivmekanismer studert, trykkavlasting, vanninjeksjon, kombinert vann- og gassinjeksjon og gassinjeksjon. Reservoarsimuleringer viste at ren vanninjeksjon ville vært en god løsning, men fordi det ikke fantes eksportmuligheter for gass ble det valg å satse på kombinert vann- og gassinjeksjon. Det ble imidlertid bestemt at det skulle legges til rette for at en på et senere tidspunkt skulle kunne gå over til ren vanninjeksjon med gasseksport.

En rekke utbyggingsløsninger ble vurdert. Bunnfaste plattformer ble vurdert som uaktuelle på grunn av vanndybden. Strekkstagplattform og dyptflytende betongplattform ble vurdert, men eliminert etter en grov kostnadsvurdering. De gjenstående løsningene var produksjonsskip, flytende plattform og SPAR-plattform (dyptflytende bøye). Etter inngående studier ble det valgt å satse på et produksjonsskip.



Norne-feltet ble bygget ut med undervanns brønnsystem tilkoblet et kombinert produksjons- og lagerskip.

Utbyggingsfasen

Så snart Plan for utbygging og drift var godkjent av Stortinget, startet utbyggingsprosjektet. I henhold til planen omfattet utbyggingen et kombinert lager- og produksjonsskip, og et undervanns brønnsystem tilkoblet skipet.

Skroget til produksjonsskipet ble bygget ved et verksted i Singapore. "Turreten" og dekksmodulene ble bygget ved verksteder i Norge og installert på Stord. Også brønnrammene ble bygget i Norge.

Prosjektet ble betraktet som et pilotprosjekt og gjennomført i henhold til prinsipper som var anbefalt av NORSOK – utbyggings – og driftsforum, hvor både oljeselskap, leverandørindustri og myndigheter var aktive. Prosjektet ble betraktet som meget vellykket og hadde en beregnet balansepris før skatt på kun 42 NOK'94 per fat, noe som ble ansett som særdeles gunstig. Balanseprisen er den oljeprisen som gir null i nåverdi,og kan tolkes som prosjektets lønnsomhetsgrense.

Dynamisk posisjonering av skytteltanker.
Under lasting må skytteltankeren bruke propellene slik at den hele tiden ligger på linje med, og i passende avstand til, produksjons- og lagerskipet. Dette krever et kompli-sert reguleringsteknisk system hvor avdriften måles og den nødvendige propellkraften beregnes. Nærmere beskrivelse er gitt på side 8-8/9.

Drift

Driftsfasen startet da produksjonen kom i gang i 1997, og anleggene har fungert bra. Produksjonsrekorden er på 236 000 fat pr. dag, som er godt over den opprinnelige designkapasiteten. De beste brønnene har levert opptil 50 000 fat pr. dag. Den assosierte gassen ble reinjisert de første årene, men så snart Åsgardrørledningen var på plass koblet Norne seg til denne, og har senere eksportert gass.

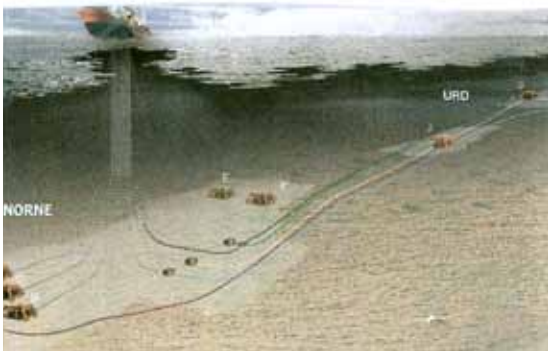
I dag snakker vi om Norneområdet, som omfatter feltene Norne, Urd og Alve. Urd er betegnelsen på et oljefelt som ligger 10 km nordøst for Nornefeltet, på om lag 380 meters havdyp. Alve er et gass- og kondensatfelt 16 km sørvest for Nornefeltet. Vanndypet i området er på 390 meter.

På denne måten håper en å kunne drive anleggene mest mulig økonomisk. Til slutt vil alderen på anleggene bli et problem. Selv med godt vedlikehold må en anta at utmatting og korrosjon vil gjøre det stadig mer krevende å holde anleggene i gang. Siden produksjonsinnretningen på Norne er et skip, kan det om nødvendig tas til land, dokksettes og oppgraderes i betydelig grad. Dette har vært gjort med andre flytende anlegg, bl.a. Veslefrikk, men det er en stor og kostbar operasjon.

Nedstengning og fjerning

Fjerning av installasjonene utføres i henhold til gjeldende regelverk. For Norne vil dette innebære: plugging av brønner, fjerning av brønnrammer, fjerning av stigerør og ankerliner, fjerning eller tildekking av rør og fundamenter som ikke allerede er nedgravd, samt opphogging av produksjonsskipet (og gjenbruk om mulig).

Som nevnt er det høye kostnader forbundet med fjerning. Som regel må en regne med at det vil tilsvare mellom fem og ti prosent av utbyggingskostnadene.



Oljefeltet Urd er også koplet til Norne-skipet. *Fra [10.2]*

Sikkerhet i olje- og gassvirksomheten

Dødsrisiko for transport av passasjerer i Norge 1988-93 og for ulike yrkesaktiviteter i Norge 1988-93 for personer 15-74 år.

Transportmiddel/ Yrkesaktivitet	Dødsfall pr 100 mill. person km	Dødsfall pr 100 mill. persontimer
Tung motor-sykkel	6,3	272
Moped	2,3	54
Sykkel [1]	1,7	17
Fotgjenger	4,0	20
Personbil [2]	0,4	18
Tog	0,12	6
Skip [3]	0,26	5
Fly	0,24	120
Fritidsbåt [4]		189
Jordbruk og skogbruk		9,1
Industri, bergverk, anlegg		1,7
Skipsfart		16,1
Olje- og gassutvinning		3,5
Fiskeri		29,4

[1] Gjelder syklisten [2] Private biler
[3] Innenlands [4] Gjelder opphold i båten

"Stup-livbåt". *Fra [10.6]*

Før vi går inn på sikkerhetsproblemer i olje- og gassvirksomheten, skal vi se litt nærmere på temaet sikkerhet i sin alminnelighet.

Hva mener vi med sikkerhet?

Sikkerhet vil si å unngå ulykker. Det vil si at

- mennesker ikke skal dø eller bli skadet
- naturmiljøet ikke skal forurenses av akutte utslipp
- materielle tap skal unngås

Sikkerhet er kort sagt knyttet til de tre m-er: mennesker, miljø og materiell.

Miljøutfordringene i olje- og gassutvinningen tas opp i neste kapittel.

Generelt om dødsrisiko for mennesker

Mennesker kan skades ved at de faller, får noe i hodet eller blir utsatt for en brann. Skader kan også oppstå når vi kjører motorsykkel, foretar dykking (som er en viktig aktivitet ved petroleumsvirksomheten), benytter helikopter (for eksempel for transport fra land og ut til plattformer), tar toget eller arbeider på et handelsskip eller en oljeplattform.

Mennesker kan også omkomme ved at en oljeplattform bryter sammen eller kantrer, slik som Alexander L. Kielland- plattformen gjorde (se sidene 10-30/31). Tap av menneskeliv kan enten skje direkte i tilknytting til den enkelte persons virksomhet, eller ved at plattformen bryter totalt sammen eller kantrer. Dette kan skje for eksempel etter at den er blitt skadet i hardt vær, ved skipssammenstøt, brann eller eksplosjon. Hvis plattformen eller skipet utsettes for mindre skade, vil det som regel ikke være fare for tap av menneskeliv.

Tabellene til venstre viser såkalt dødsrisiko ved ulike aktiviteter. Noen aktiviteter som innebærer høy risiko for dødsfall og skade er frivillige, slik som kjøring med tung motorsykkel, mens bruk av offentlige kommunikasjonsmidler er et samfunnsansvar, og samfunnet må således sørge for at sikkerheten er akseptabel.

Tiltak for å oppnå så stor sikkerhet som mulig

Det viktigste av alt er selvsagt å unngå at ulykker inntreffer i det hele tatt. Sikkerhetsforskriftene for en plattform eller et bore/produksjonsskip er derfor ekstremt strenge i de fleste sammenhenger. Generelt legges det stor vekt på å lære menneskene om bord til å "tenke sikkerhet" i enhver situasjon. I det etterfølgende er gitt eksempler på noen tiltak som er spesielt viktige, både for mennesker, miljø og materiell.

Gode rømningsmuligheter når ulykken først er ute

Hvis en ulykke, for eksempel i form av en brann, er i ferd med å utvikle seg på en plattform, er det avgjørende at mennesker om bord kan evakueres, altså forlate plattformen på en sikker måte. Hvis det er en brann, vil evakuering skje ved bruk av livbåter. I dag benyttes "fritt fall"- eller stup-livbåter, som glir på en rampe og stuper ned i sjøen, gjør et kontrollert dykk, og kommer så opp et stykke fra plattformen.

Tiltak for å unngå ukontrollerte utslipp av olje eller gass

Akutte, ukontrollerbare situasjoner kan skje både i forbindelse med bore- og produksjonsoperasjoner, slik at det oppstår kontinuerlig utstrømning fra reservoaret (utblåsing). Dette skjedde eksempelvis på Bravoplattformen i 1977 (se side 10—30) og i Mexicogolfen under Ixtoc i 1979 samt Deepwater Horizon i 2010. I alle tilfellene var det olje som strømmet ut.

Som kjent kan slike utslipp få katastrofale følger for strender, fugle- og dyreliv, og tiltak for å unngå dette har høyeste prioritet. Figuren til høyre viser flere barrierer som hver for seg skal kunne stanse eller forsinke utviklingen av en utblåsing.

Et av de viktigste tiltakene er installasjon av en eller to brønnsikringsventiler, også kalt BOP-ventiler (blowout preventer). Disse er omtalt foran på side 10—7. Under produksjon kommer en såkalt DHSV (Down Hole Safety Valve) i tillegg.

Regelmessige inspeksjon for å oppdage rust og sprekker

Hvis rust ikke oppdages og repareres i tide, kan det føre til sammenbrudd av en konstruksjon grunnet av redusert tykkelse på stålplater og stag, ofte i kombinasjon med utmatting av disse. Det er også av største viktighet å oppdage eventuelle *sprekkdannelser* i en konstruksjon tidlig, slik at utbedringer kan utføres. Alexander L. Kielland-ulykken er et eksempel på dette, (se side 6–26/27).

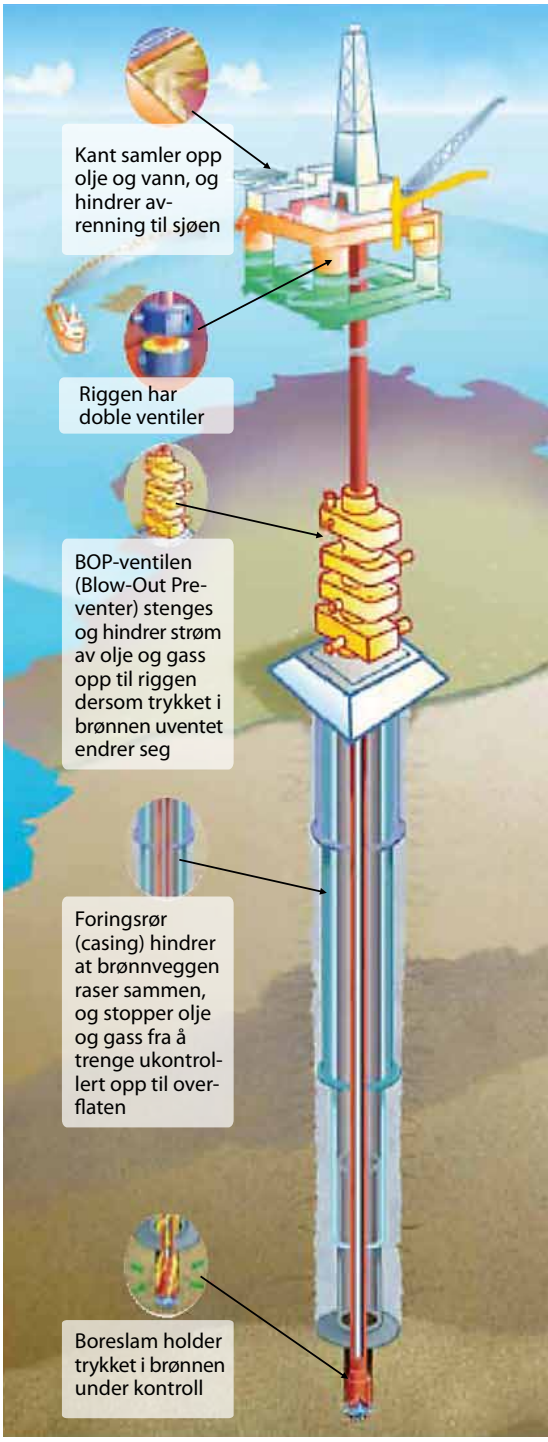
Tiltak mot brann – et av de største skrekkscenarioene[1)]

Branner, ofte i kombinasjon med forutgående eller etterfølgende eksplosjoner, har vært årsak til noen av de alvorligste ulykkene som har skjedd i forbindelse med olje- og gassvirksomheten. De kan medføre både store tap av menneskeliv og store forurensninger av naturmiljøet, i tillegg til de materielle tapene.

Eksempler på brannulykker. En av de verste ulykkene som har skjedd offshore, var brannen på gassplattformen *Piper Alpha* på britisk sokkel i 1988. Den krevde 167 menneskeliv. Brannen eskalerte voldsomt etter at høye temperaturer førte til sammenbrudd av stigerør med gass fra nærliggende plattformer. Dermed ble det åpnet opp for tilførsel av store mengder gass fra den lange rørledningen på sjøbunnen.

Eksplosjonen og brannen på oljeplattformen *Deepwater Horizon* i Mexicogolfen i 2010 er eksempel på at slike ulykker også kan hende i våre dager.

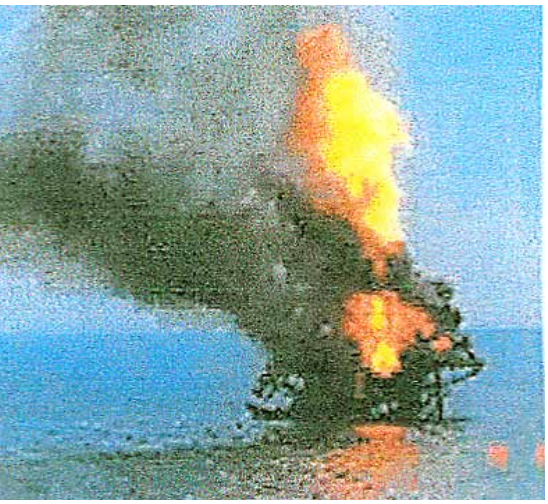
[1)] Forfatter: Jørgen Amdahl, som også er forfatter av kapittel 6



Brønnkontroll og barrierer

- *boreslam kontrollerer trykket.*
- *fôringsrør forsegler permeable soner og stabiliserer hullet.*
- *brønnsikringsventil (BOP) stopper strømning av olje og gass til overflaten hvis man mister kontroll på brønnen.*
- *lensesystemer nært riggen*
  - *responstid 2 timer*
  - *mobilisering av ytterligere ressurser innen 15-66 timer*
- *lukket dren og doble ventiler*

Piper Alpha i en kritisk fase av brannen. *Fra[10.7]*
Brannen eskalerte voldsomt da store gass-stigerør brast, noe som førte til utstrømning av flere tonn gass per sekund.



Piper Alpha plattformen i sluttfasen av brannen
Store deler av plattformen har kollapset og sunket.

Temperaturfordeling på undersiden av dekket på en flytende plattform under brann. *Fra [10.10]*
Basert på simulering med CFD-programmene Kameleon FireEX KFX® og FAHTS (www.computit.com). Temperaturen kan komme opp i 1000 °C i enkelte partier.

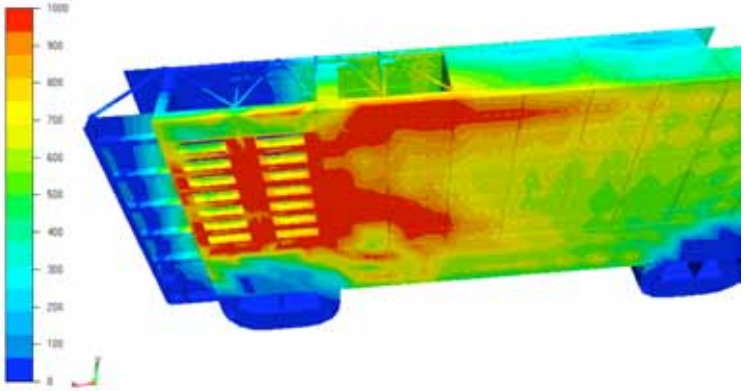
Høye temperaturer har stor virkning også på stålkontruksjoner. Vi skulle kanskje tro at brann i en konstruksjon, som i hovedsak er bygget opp av stål, ikke er så farlig. Men det er ikke tilfelle. I olje- og gassbranner kan temperaturen i forbrenningsgassene bli så høy som 1100 °C. Temperaturen bygges raskt opp i ubeskyttet stål som eksponeres for gasser med så høy temperatur. Det foregår varmeovergang både på grunn av stråling og konveksjon. God varmeledning i stål spiller også en rolle. De høye temperaturene har følgende virkninger på stålet:

- Materialet blir mykere (E-modulen reduseres). Dermed vil deformasjoner øke, men heller ikke dette er normalt av avgjørende betydning for sammenbrudd.
- Flytegrensen til materialet (se side 4—12) blir redusert. Denne virkningen skyter fart allerede når temperaturen blir mer enn 400 °C. Dette er alvorlig fordi styrken til plattformen reduseres etter hvert som temperaturen stiger. Til slutt kan flytespenningene bli mindre enn de virkelige spenningene, og det kan oppstå fullstendig sammenbrudd.
- Materialet utvider seg. Dette kan resultere i knekking i enkelte konstruksjonelementer, men fører som regel ikke til totale sammenbrudd.

Et viktig tiltak for å redusere virkningen av brann, er passiv beskyttelse. Viktige konstruksjonskomponenter i partier som i ubeskyttet tilstand antas å nå 600—800 °C, må gis passiv brannbeskyttelse. Mye brukt er epoxyprodukter, som legges på i fem-ti mm tykkelse på utsatte steder. Når det utsettes for brann, ekspanderer belegget voldsomt og gir god beskyttelse gjennom dårlig varmeledningsevne i én-to timer, inntil eksempelvis evakuering har blitt gjennomført. På partier hvor deformasjonene kan bli store, må slike belegg armeres med "netting" for å hindre at det faller av. Sementbaserte produkter brukes også i noen grad som beskyttelse på enkelte partier.

Tiltak for å begrense branners varighet er også viktig. Dette gjøres ved hjelp av en rekke nødstengningssystemer, noe som er særlig viktig for rørledninger som fører gass. Kvelning ved innsprøyting av forstøvet vann er enda et tiltak. Ofte kan man klare å kvele en brann etter 20 minutter. Kravet til passiv brannbeskyttelse kan dermed reduseres. Det er nemlig ikke ønskelig å bruke beskyttelsesbelegg i ubegrenset omfang, blant annet fordi det under dette kan danne seg rust som ikke oppdages i tide, og som dermed medfører kostbart vedlikehold.

Ved bruk av **avanserte dataprogrammer** har man etter hvert fått meget gode kunnskaper om hvordan branner oppfører seg i plattformer, og hvordan man best kan dimensjonere mot disse. Ikke minst er det utviklet CFD-programmer (Computational Fluid Dynamics) som simulerer brannprosesser på en svært realistisk måte.



Miljøutfordringer i olje- og gass-virksomheten

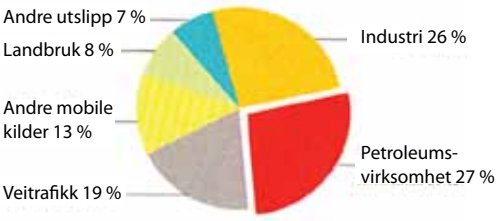
På de foregående sidene om sikkerhet i olje- og gassutvinningen, har vi sett på hvordan *akutte* utslipp, altså utslipp ved uhell, kan forurense naturmiljøet. Miljøet kan imidlertid også ødelegges av *kontinuerlige* utslipp av stoffer som er skadelige, men som ikke er til å unngå når bore- og produksjonsprosesser skal gjennomføres. Det er slike skadelige utslipp som er tema for dette kapitlet om miljøutfordringer.

Oversikt over løpende, skadelige utslipp i olje- og gassvirksomheten

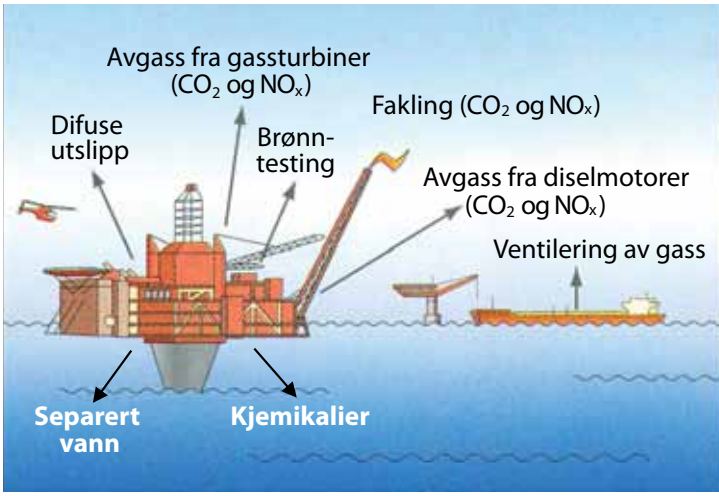
Vi skiller gjerne mellom utslipp til luft og utslipp til sjø. De viktigste av de skadelige stoffer som slippes ut, er sammenstilt nedenfor og illustrert i figuren til høyre.

Utslipp til luft:
- karbondioksid, CO_2
- nitrogenoksider, NO_x
- lettfordampelige hydrokarboner, nmVOC

Utslipp til sjø:
- diverse kjemikaler
- vann fra separasjon av brønnstrømmen
- akutte oljeutslipp



Kilder til utslipp av CO_2 i Norge i 2008. *Fra [10.2, data fra Statistisk sentralbyrå]*

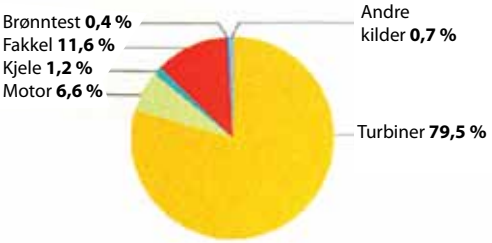


Oversikt over utslippskilder i olje- og gassutvinningen. *Fra [10.2]*

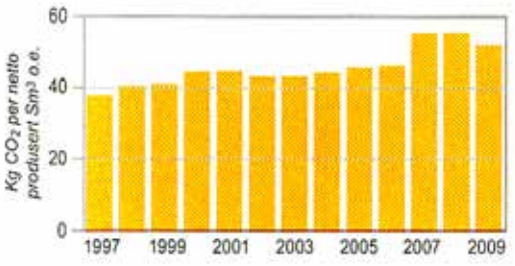
Utslipp av CO_2

Kilder til utslipp av CO_2 i olje- og gassvirksomheten

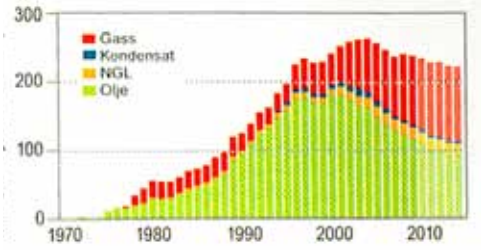
Skadelige virkninger av CO_2 er nevnt en rekke ganger tidligere i boka, og det er av største viktighet å begrense utslippene av denne klimagassen. Vi ser av figuren øverst til høyre at petroleumsvirksomheten er den største bidragsyteren til utslipp av CO_2 i Norge (27 %), og tiltak for å redusere disse utslippene har derfor høy prioritet. Som forklart nærmere foran i boka, dannes CO_2 når hydrokarboner (olje og gass) forbrenner. Som også ofte ellers, er det forbrenningsmotorene som er den største "syndebukken". I motsetning til hva som er tilfelle for skipsdrift (og i veitrafikken), er det imidlertid gassturbiner som står for mesteparten av CO_2-utslippene i olje- og gassutvinningen.
Nesten 80 % av utslippene kommer fra forbrenningen i disse motorene, mens bare 6,6 % skyldes dieselmotorer (se nederste figur).



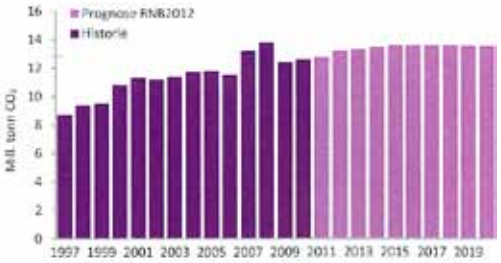
Kilder til CO_2-utslipp i olje- og gassutvinningen. *Fra [10.2, data fra Oljedirektoratet]*
Behovet for elektrisk energi til drift av utstyr og andre formål om bord er meget stort. Den elektriske energien skaffes først og fremst av gassturbiner, men delvis også av dieselmotorer, som igjen driver elektriske generatorer.



Gjennomsnittlig utslipp av CO_2 per produsert enhet olje og gass (målt i Sm^3 o.e.) på norsk sokkel. *Fra [10.2, data fra Oljedirektoratet]. Det kreves mer energi til produksjon av gass enn olje. Etter hvert som produksjonen av gass øker (se figur nedenfor), vil derfor de totale CO_2-utslipp fra olje- og gassutvinningen øke. Dette framgår for øvrig også av den nederste figuren på denne siden.*



Olje- og gassproduksjon siden petroleumsvirksomheten startet, samt prognoser fram til 2015. *Fra [10.2, data fra Oljedirektoratet]*



CO_2-utslipp fra petroleumsvirksomheten i Norge fram til 2009, samt prognoser for utslippene fram til 2020. *Fra [10.2, data fra Oljedirektoratet]*

Tiltak for å redusere utslipp av CO_2

Det er særlig fire typer tiltak som er mest aktuelle, og vi skal nedenfor se nærmere på disse.

Myndighetenes bruk av avgiftspolitikk og konsesjonsordninger. Norske myndigheter har vært flinke til å benytte seg av politiske virkemidler for å redusere miljøproblemer fra olje- og gassutvinningen.

CO_2-avgiften er et av de sentrale virkemidene. Fra 2010 er denne 47 øre per liter olje og per Sm^3 gass. Dette svarer til ca. 192 kr per tonn utslipp av CO_2 . Klimakvoteloven er et annet virkemiddel. I forbindelse med godkjenning av utbyggings-planer (PUD, se side 10—11) har myndighetene en tredje mulighet til å påvirke valg av CO_2-vennlige løsninger.

Energieffektivisering. I prinsippet er det tre "veier" å gå for å redusere CO_2-utslippene fra forbrenningsmotorer som brukes i forbindelse med produksjon av elektrisk energi:

- generell energiøkonomisering, altså reduksjon av behovene for elektrisk energi om bord.
- energiøkonomisering i prosessene som omformer energi i brensler til elektrisk energi (se nedenfor)
- overføring av elektrisk energi fra land (se egen overskrift)

Det er mulig å utnytte den termiske energien i de varme avgassene fra gassturbiner og dieselmotorer til å produsere damp, som i sin tur produserer elektrisk energi (såkalte kombikraftanlegg). Dette gir dermed bedre energiutnyttelse av brenslet, og tilsvarende mindre CO_2-utslipp. Eksempel på et kombikraftanlegg er nærmere beskrevet på side 7—33. Slike anlegg er installert på feltene Oseberg, Snorre og Eldfisk, noe som er enestående i verden i offshore olje- og gassvirksomhet.

Overføring av elektrisk energi fra land. Det vises til figur på side 7—3, hvor kurve a gjelder for den reduksjon som er vedtatt av Stortinget i det såkalte "Klimaforliket". Elektrifisering av offshorevirksomheten vil da være viktig for å kunne oppnå denne reduksjonen. Flere felt er allerede "elektrifisert", for eksempel Troll A og Ormen Lange. I 2009 kom 44 % av norsk gasseksport fra felt som fikk delvis eller all forsyning av elektrisk energi fra land. Men ikke alle felt er egnet for "elektrifisering". For eksempel er det som sikkerhetstiltak påkrevet at det skal være fakling på alle plattformer, noe som gir CO_2 -utslipp som vist i figur nederst på forrige side. Det må dessuten alltid tas hensyn til at kraftoverføring til havs kan gi for stor belastning på kraftnettene i relevante landområder

Lagring av CO_2. Dette er trolig den mest interessante løsning på CO_2 -problematikken. CO_2 kan injiseres og lagres i olje- eller gassreservoarer hvor produksjonen er avsluttet. Det finnes også andre geologiske formasjoner som kan gi plass for lagring av CO_2. Utsiraformasjonen, som tar imot CO_2 fra Sleipnerfeltet, er et eksempel på dette (se side 10–34). Et annet eksempel er Snøhvit-feltet, hvor CO_2 skilles ut på Melkøya og sendes tilbake til feltet. Lagring av CO_2 fra forbrenningsmotorer krever utskilling fra resten av motoravgassene.

Utslipp av NO_x

Kilder til utslipp av NO_x

NOx er stort sett en blanding av gassene NO og NO_2, og beskrives kjemisk sett med samlenavnet "nitrogenoksider" eller "nitrøse gasser". Dannelsesmekanismer og miljømessige skadevirkninger er nærmere beskrevet på side 7—29. Som det framgår, dannes NOx under de høye temperaturene som opptrer når hydrokarboner forbrenner. Utslippskildene i petroleumsvirksomheten er derfor de samme som for CO_2, altså gassturbinene, dieselmotorene og faklingen om bord i plattformene. Andre utslippskilder i Norge framgår av figur øverst til høyre. Veitrafikken gir utslipp på mer enn 60 %, mens petroleumsvirksomheten bidrar med ca. 25 %.

Kilder til NOx-utslipp i Norge, 2008. *Fra [10.2, data fra Statistisk sentralbyrå]*

Tiltak for å redusere utslipp av NOx

Som for CO_2-utslippene har myndighetene benyttet seg av sine muligheter til å påvirke også NO_x-utslipp. For det første er det innført en NOx-avgift, som for 2010 ble satt til 16,40 kr per kg NO_x som slippes ut. For det andre brukes prosessen med godkjenning av feltutbyggingsplaner til å stille krav, for eksempel til utstyrsutforminger.

Utslipp av nmVOC

Kilder til utslipp av nmVOC

NmVOC er diverse flyktige organiske forbindelser (unntatt metan),. som i mindre mengder fordamper fra blant annet råolje. Stoffene er skadelige for både miljø og menneskers helse. Petroleumsvirksomheten er den største bidragyteren til utslipp av nmVOC. Utslippene skjer særlig i under lagring og lasting av råolje ute på feltene.

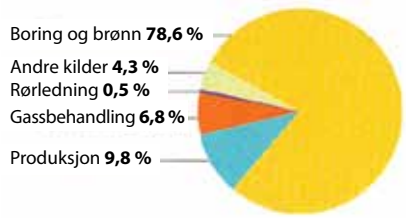
Tiltak for å redusere utslipp av nmVOC

Slike tiltak omfatter særlig teknologisk forbedring av de metoder som brukes under lasting av olje fra lagertanker. Fra 1990 har operatørselskapene klart å redusere utslippene av nmVOC med 43 %

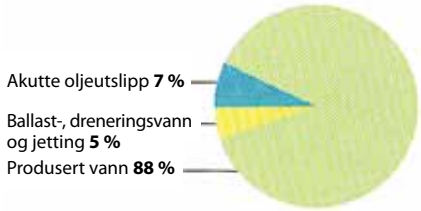
Utslipp til sjø

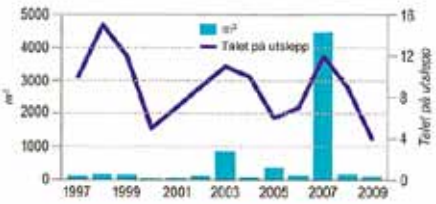
Utslipp av kjemikalier

Slike utslipp omfatter særlig kjemikalier og sement fra boreoperasjoner (se figur til høyre). 99 % av kjemikaliene som brukes i norsk petroleums-
virksomhet er stoffer som praktisk talt ikke er miljøskadelige.



Utslipp av kjemikalier fra petroleumsvirksomheten i Norge, 2009. *Fra [10.2, data fra Oljedirektoratet]*





Utslipp av vann og akutte årlige oljeutslipp fra petroleumsvirksomheten i Norge. *Fra [10.2, data fra Oljedirektoratet]. Akutte årlige oljeutslipp har i volum vært meget små, bortsett fra året 2007. Da var det et uhell på Statfjordfeltet. Akutte oljeutslipp fra skipsfarten er et vesentlig større problem.*

Utslipp av produsert vann og akutte oljeutslipp

Med produsert vann mener vi vann som blir separert fra brønnstrømmen. Nederste figur til høyre viser at det også kan forekomme akutte oljeutslipp, men disse har vært beskjedne og ikke ført til miljøskader.

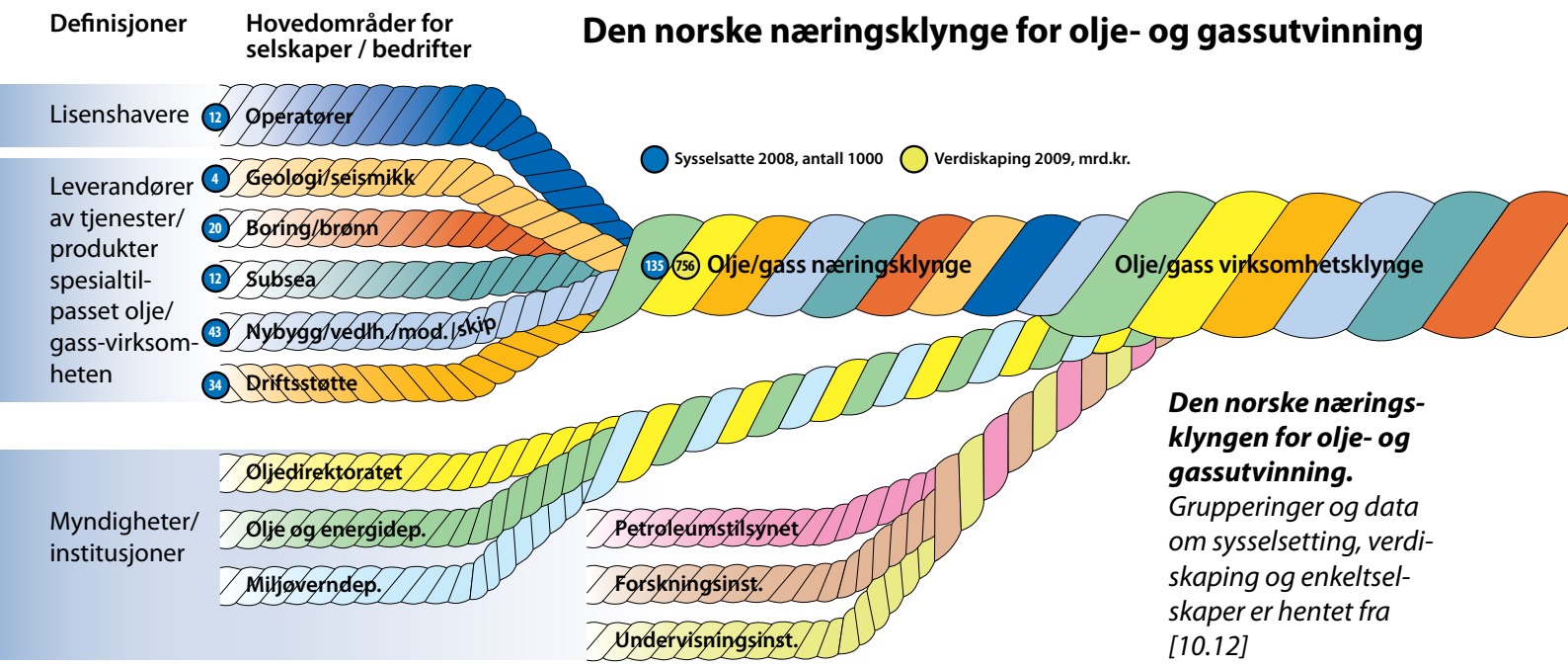
Den norske næringsklyngen for olje- og gassutvinning

Total verdiskaping relatert til havromsvirksomhet for 2008 og 2009 (tall i mrd. kr)

Næringsklynge for:	
Maritim virksomhet:	132
Olje- og gassutvinning:	756
Sjømat:	90
	978

Suverent den største næringen i Norge. Vi har foran, i kapitlet om skip og skipsfart, påpekt at betydningen av en næring blir tydeligst når bedriftene som kan relateres til næringen samles i en såkalt næringsklynge. Klyngen for virksomhet relatert til skip og skipsfart (den maritime klyngen) ble vist på side 9—21 og næringsklyngen for sjømat vil fremgå på side 12—10. En tilsvarende framstilling av den norske næringsklyngen for olje- og gassutvinning er vist nedenfor, og de tre næringsklyngene er sammenlignet i "boks" i margen. Ikke uventet er det olje/gass- næringen som er den klart største. Den står for mer enn 60 % av den totale norske verdiskapingen til havs. Men også de to andre næringsklyngene er blant våree aller største næringer.

Den norske næringsklynge for olje- og gassutvinning



Den norske næringsklyngen for olje- og gassutvinning. *Grupperinger og data om sysselsetting, verdiskaping og enkeltselskaper er hentet fra [10.12]*

Litt om de største enkeltselskapene.

Hovedpoenget med denne beskrivelsen er å gi leserne et innblikk i hvilket enormt omfang av bedrifter som arbeider innen næringsklyngen for olje/ gass-utvinning.

Operatørselskaper. Produksjonen av olje og gass ivaretas av såkalte *operatørselskaper*, som er samlet i den første gruppen. Det er disse som har fått tildelt status som rettighetshavere til å hente opp olje og gass. De omfatter 179 selskaper. Det største er Statoil (16 500 sysselsatte), og deretter følger ConocoPhillips og Shell.

Geologi og seismikk. De øvrige fem hovedområdene kan vi samlet kalle leverandørselskapene. Vi ser først på selskapene innen geologi og seismikk, som omfatter 149 bedrifter. De største innen dette hovedområdet er Schlumberger og Geoservices, som primært arbeider med IT-behandling av reservoardata). I tillegg kommer WesternGeco og PGS, som blant annet arbeider med marine operasjoner for å skaffe fram nødvendige data for letevirksomhet samt nærmere analyse av disse funnene.

Boring og brønn. Et annet hovedområde er *"Boring og brønn"*, som ivaretar kombinasjonen av boring- og brønnservice. Dette hovedområdet består av 235 selskaper, med tilsammen ca. 20 000 ansatte

Undervannsteknologi. Et tredje hovedområde innen "leverandør"-selskapene kan vi kalle undervannsteknologi (eller"Subsea"). Dette området omfatter bedrifter som først og fremst arbeider med utvikling og installasjon av utstyr som skal operere på havbunnen (se f.eks. illustrasjon side 0–12). Denne gruppen består av 96 bedrifter med 12 000 ansatte. Eksempler på kjente, norskbaserte firmaer innen denne kategorien er Aker Subsea, Framo Engineering og FMC. Gruppen omfatter også selskaper som planlegger og gjennomfører selve installasjonene, blant annet Subsea 7, Technip og DOF Subsea.

Nybygg, vedlikehold/modifikasjon og skipsbygging. Som vi ser av illustrasjonen ovenfor, er *"Nybygg, vedlikehold/modifikasjon og skipsbygging"* det største hovedområdet innen leverandørselskapene for olje/gass-næringen. Gruppen omfatter 404 selskaper med til sammen 43 000 ansatte. Her finner vi da ikke bare det vi kan kalle rene skipsverft for offshorefartøyer, som for eksempel STX, Ulstein verft og Kleven Maritime, men også andre verksteder som driver med nybygg, vedlikehold og modifikasjon av offshore installasjoner, som Aibel, Aker Solutions og Apply Sørco. Enda en viktig gruppe innen dette hovedområdet er utvikling, produksjon og salg av reguleringsteknologisk utstyr, eksempelvis Rolls Royce Marine og Kongsberg Maritime. I denne gruppen kan det lett oppstå overlapping med de bedrifter som i den maritime næringsklyngen på side 9—21 var postert som "Verft" og "Prod. maritimt utstyr". En viss grad av "dobbeltbokføring" er vanskelig å unngå.

Driftsstøtte. Dette er den nest største gruppen. Den omfatter 1393 selskaper, som til sammen sysselsetter 34 000 mennesker fordelt på tre undergrupper:

- selskaper som leier ut ingeniører og annet personell som assisterer i daglig drift av produksjonen,
- drift av forsyningsfartøy
- støttetjenester (transport, catering, o.a.)

En dynamisk næringsklynge

Hovedpoenget med gjennomgangen ovenfor er å gi leserne et innblikk i det enorme omfanget av bedrifter som er aktører innen den norske olje/gass-næringen. Summert omfatter operatørselskapene og de fem hovedområder av leverandørselskaper 2456 selskaper. Disse har samme mål , men kan noen ganger samarbeide, og andre ganger konkurrere. Resultatet blir at hele klyngen blir dynamisk og tilføres store innovative ressurser. Noen av de store gjennombruddene i utviklingen, er skjematisk vist i margen. Andre eksempler, hvor norsk ingeniørkunst har spilt hovedrollen, er mer detaljert omtalt på etterfølgende sider.

1977
Cod/Ekofisk.
Flerfase-transport

1979
Statfjord.
3D – seismikk

1986
Ekofisk.
Vanninn-sprøyting

1991
Oseberg/Troll.
Tilbakeføring av CO_2 til havbunnen

1996
Troll.
Horisontal-boring/ grenboring

1999
Gullfaks.
4D-seismikk

2003
Vallhall.
4C-seismikk

2003
Gullfaks C.
Styrt trykk-boring

2004
Åsgard.
Brønninter-vensjon uten stigerør

2007
Tordis.
Undervanns-prosessering

Viktigste teknologiske gjennombrudd som har gitt økt utvinning på norsk sokkel.
Fra [10.13]. Kilde: Tilpasset etter Aamutvalget og Fjose.

Eksempler på hvordan norsk ingeniørkunst har bidratt til den teknologiske utviklingen i olje- og gassvirksomheten på norsk sokkel

Olje- og gassutvinning baserer seg i stor grad på internasjonal kompetanse, men ren norsk ingeniørkunst har likevel markert seg tydelig. Nedenfor er gitt noen eksempler og forklaringer på dette.

1.Topp, teknologisk kompetanse innen norsk skipsfart og skipsbygging kunne raskt overføres til den nye næringen. Da petroleumsvirksomheten i Norge startet, hadde den lenge foregått til havs både i USA og andre steder. Det var derfor ikke overraskende at den første operatøren på norsk sokkel ble det amerikanske selskapet Conoco Phillips. Både Statoil og andre norske aktører lærte imidlertid fort, og kom tidlig med som operatører. Når det gjelder bygging av plattformer, var Norge med allerede fra letefasen. Gullalderen på 1960-tallet hadde medført en skipsteknologisk revolusjon og gitt Norge høy ingeniørmessig kompetanse innen skipsbygging (se side 9—13). Den første norskbygde plattformen ble derfor en enkel oppgave (Ocean Viking, levert fra Aker Verft i 1967, se figur side 10—3). Konstruksjonen var amerikansk, men allerede i 1975 kunne den først norskdesignede plattformen leveres fra samme verft. Dette var den velkjente Aker H-3- plattformen (se figur til høyre). Denne ble en stor suksess. Blant annet var konstruksjonen mye enklere enn amerikansk praksis.

I den videre perioden framover "eksploderte" norsk offshoreaktivitet, som vi skjønner blant annet av sidene 10—30/37. Fra 1975 satte-, som tidligere nevnt-, den såkalte skipsfartskrisen inn. Dette medførte stor ledighet av skipsbyggingskompetanse, som enkelt kunne overføres til utvikling og oppbygging av den nye næringen.

2. Condeep-konseptet for betongplattformer ble en annen stor, norsk suksess. Fordelene er omtalt på side 10—13. Den mest berømte Condeep-plattformen er Troll A. Mange mener at dette prosjektet var århundrets norske ingeniørbragd. Totalt ble det bygget 14 understell av Condeep-design ved Norwegian Contractors anlegg i Gandsfjorden ved Stavanger.

3. Imponerende, flytende prooduksjonsplattformer av norsk design var neste trinn, etter hvert som virksomheten flyttet seg ut på stadig dypere vann. H-3 var egentlig en flytende *bore*plattform, men den la også grunnlaget for flytende *produksjons*plattformer. Flytende konstruksjoner er generelt følsomme for bølgeinduserte bevegelser, og de tradisjonelt sterke, norske skipsingeniørmiljøene var sentrale i utviklingen av både typen halvt nedsenkbare plattformer, strekkstagplattformer. Eksempel på en halvt nedsenkbar plattform er Åsgard B (1999, se side 10—35). De mest kjente strekkstagplattformenene på norsk sokkel er Snorre A og Heidrun. Begge kom i drift i 1992. Heidrun er en helnorsk design, med understell av betong, og er både verdens eneste og verdens største strekkstagplattform i betong. Heidrun er et kjent navn fra mytologien (se figur til venstre).

4. Petrojarl I (1986) var det første produksjonsskipet som tålte det meget barske havmiljøet på norsk sokkel. Skipet var fullt ut norskutviklet, og bidro til å flytte grenser for bruk av skip til produksjon. Det kunne operere med god regularitet på felter hvor bølger, vind og strøm ga store ingeniørmessige utfordringer, med blant annet vanskelige krav til forankrings- og posisjoneringssystemene.

Heidrun – et kjent navn fra mytologien
En rekke av feltene på norsk sokkel har fått navn fra norrøn mytologi. For eksempel er Heidrun ei geit som går på taket av Valhall og spiser av et tre. Fra juret hennes renner det mjød ned i et kar som de døde krigerne som kommer til Valhall kan drikke av. Denne kilden blir aldri tom. (Illustrasjon fra et islandsk manuskript fra det 18. århundrede. Wikipedia).

5. Tidlig satsing på dykkerløs undervannsteknologi. Dette har resultert i en rekke norske selskaper som ligger i verdenstoppen når det gjelder løsninger for slik avansert teknologi.

6. Blant de fremste i verden innen marin kybernetikk. Som eksempler kan nevnes utviklingen av systemer for dynamisk posisjonering og autonome undervannsfarkoster (se side 10—27).

7. Verdens mest moderne og verdens nest største offshoreflåte, med over 450 offshorefartøy. Se side 9—21.

8. Norsk marinteknisk utdanning og forskning – verdensledende både når det gjelder kvantitet og kvalitet. Eksempelvis kan nevnes at NTNU i årene 1975—2012 har utdannet mer enn *3000 mariningeniører med mastergrad*. Olje/gass-virksomheten ble tidlig tatt inn i dette MSc-undervisningsopplegget, se [10.11] , som er blitt kjent som et av verdens beste på MSc-nivå. Praktisk talt alle med denne utdanningen får arbeid innen en av de tre nevnte næringsklyngene, de aller fleste innen olje/gass-klyngen. I den nevnte perioden har det også blitt utdannet *mer enn 300 kandidater med doktorgrad (PhD)*. Dette tallet forteller at også forskningsvirksomheten innen havromsteknologi har vært, og fortsatt er av ypperste klasse. Blant annet kan nevnes at "Centre for Ships and Ocean Structures" ved NTNU er utpekt som et såkalt Senter for Fremragende Forsking i Norge, og tiltrekker seg de beste forskere innen dette fagomrdet fra hele verden.

Eksempler på hvordan norsk ingeniørkunst har bidratt til den teknologiske utviklingen i olje- og gassvirksomheten gjennom 35 år. Framtiden gir en rekke nye utfordringer for norsk ingeniørkunst.

Norsk ingeniørkunst har helt siden starten gjort seg gjeldende i den teknologiske utviklingen innen olje- og gassvirksomheten til havs.
Collagen viser noen eksempler:

1. Aker H-3 boreplattform (1975)
Denne første helnorske plattformkonstruksjonen ble meget vellykket. Det ble bygget 37 stykker av dette konseptet, flere enn av noen annen plattformtype. Det ble også etterlignet av flere utenlandske selskaper.

Noen er fortsatt i drift. Plattformen hadde pongtonger formet som skipsskrog, og ble drevet av eget maskineri. Fra [10.11]

2. Troll A betongplattform (1990)
Århundrets norske ingeniørbragd. Se også side 10—13. Fra [10.3]

3. Heidrun strekkstagplattoform (1995). *Eksempel på flytende plattform. Verdens største strekkstagplattform, og den eneste i betong. Fra [10.2]*

4. Petrojarl I, skytteltankskip Petroskald. *Produksjonsskip for ekstreme værforhold. Skytteltanker med dynamisk posisjonering. Fra [10.11]*

5. Havbunnsrammer for gassfeltet Ormen Lange
Eksempel på avansert undervannsteknologi. Feltet har verken plattform eller produksjonsskip. Det ligger i Mørebassenget på 800—1100 m havdyp og omfatter 24 brønner fordelt på tre bunnrammer. Brønnstrømmen (gass og kondensat) føres gjennom to flerfaserør til landanlegget på Nyhamna. Her tørkes gassen, komprimeres og sendes videre i rør til England.

6. Ubemannet undervannsfartøy Hugin. *Helnorsk design (se side 10–27). Brukes over hele verden*

7. Offshorefartøy for inspeksjon, reparasjon og vedlikehold
Eksempel på fartøy i den moderne og meget store norske offshoreflåten. Fartøyet er designet og bygget ved Ulstein Verft, og levert av rederiet Marine Subsea TBN.

Hva har hatt betydning for utviklingen av norsk olje- og gass?

Reservoarene

Da oljevirksomheten startet, ble de mest lovende områdene undersøkt først. Det førte til en rekke store funn, som Ekofisk, Statfjord, Gullfaks, Oseberg og Troll. Det ble bygget store plattformer, lagt rørledninger og etablert store gassanlegg på land. Disse er fortsatt viktige, og de har gitt grunnlag for utvikling av en infrastruktur som nye felt kan knyttes opp mot.

Virksomheten startet i områder med forholdsvis grunt vann, men flyttet seg raskt nordover til områder med større havdyp. Plattformløsningene måtte tilpasses forholdene, og etter hvert ble det utviklet undervannsteknologi. Undervanns produksjonsanlegg benyttes både i kombinasjon med flytende produksjonsplattformer og skip, og som utbyggingsløsning for små felt der undervannsproduksjonsanlegget knyttes opp mot eksisterende plattformer.

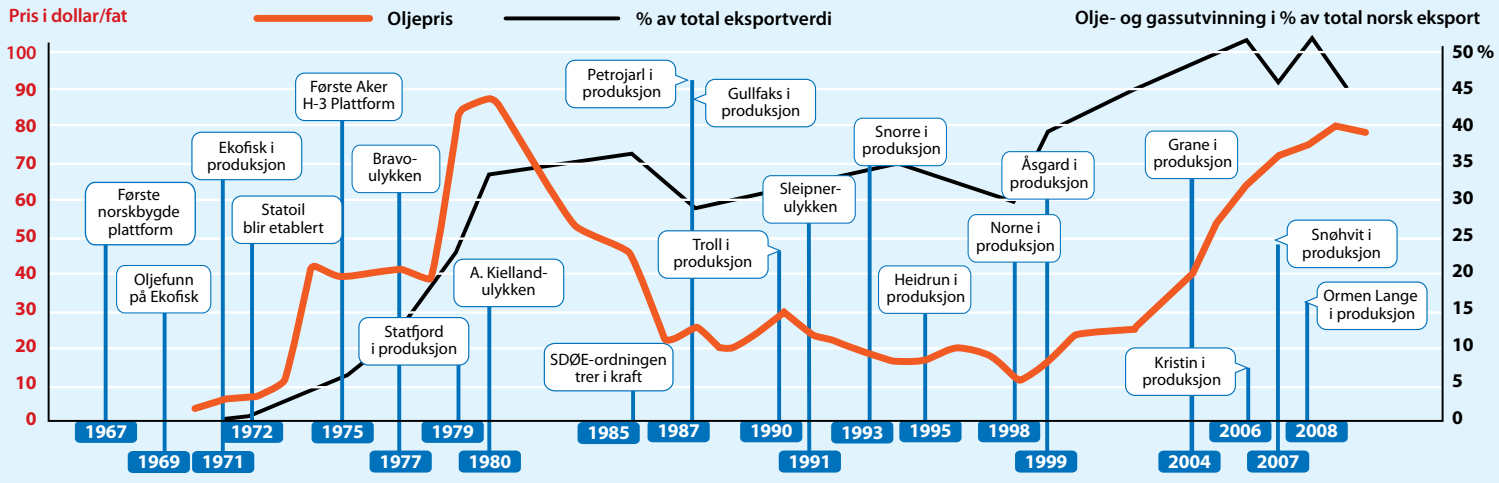
Pris på olje og gass

Mens olje selges nærmest last for last har det vært vanlig å selge gass under langsiktige kontrakter. Dette har sammenheng med at gass transporteres i rørledninger. For å sette i gang med store rørledningsprosjekter har det vært nødvendig å ha garantier for langsiktig produksjon og leveranse. De store gassprosjekter har derfor alltid vært komplekse og avhengige av avtaler selskaper og land imellom.
I perioder har det vært vanskelig å bli enige om slike avtaler, og store gassfunn er blitt liggende uutnyttet.

Det er enklere å selge olje, selv om det finnes råoljekvaliteter som ikke er like attraktive for alle raffineriene. Oljen kan lett transporteres over store avstander. Samtidig har oljeprisen variert, ofte på grunn av krig og storpolitiske hendelser, noe som har ført til store svingninger i aktivitetsnivået.

I perioder med høy oljepris øker optimismen. Flere prosjekter vurderes som lønnsomme og settes i gang. Leverandør- og serviceindustrien

Oljepriser (årsgjennomsnitt), eksportandeler og milepæler i norsk olje- og gassvirksomhet. *Grafen for oljeprisen er indeksregulert. For eksempel ser vi at maksimalprisen i 1980 kan avleses til 87 dollar/fat. Nominell (virkelig) oljepris det året var egentlig 37 dollar/fat. Forskjellen mellom nominell verdi og indeksregulert verdi blir mindre og mindre jo nærmere vi kommer "våre dager". I 2008 svingte oljeprisen voldsomt (mellom 136 og 40 dollar per fat).*



går for full kapasitet og kostnadsnivået øker. Når oljeprisen faller, blir oljeselskapene bekymret for lønnsomheten. Prosjekter som ikke er kommet skikkelig i gang, blir utsatt, og nye prosjekter holdes igjen. Leverandør- og serviceindustrien går etter hvert tom for oppdrag, og strukturen endres etter konkurser og oppkjøp. Hvis oljeprisen holder seg lav lenge, begynner hele bransjen å tenke nytt. Det satses kanskje på ny og billigere teknologi kombinert med nye former for samarbeid mellom leverandør- og operatørselskap.

Perioden fram til 1985 var preget av høye oljepriser. Dette bidro til robuste løsninger, høy kvalitet og høyt kostnadsnivå. Prisfallet i 1986 gjorde det helt nødvendig å redusere kostnadsnivået. Veslefrikk er eksempel på en "billigløsning". Etter at en serie store prosjekter var ferdigstilte (Snorre, Sleipner, Draugen og Heidrun) ble det "prosjekt-tørke". Nye konsepter og nye samarbeidsformer ble lansert. Dette ga grunnlag for en ny serie av mer kostnadseffektive prosjekter med Norne, Njord, Visund og Åsgard som eksempler. Men et raskt økende aktivitets-nivå førte til ny kostnadsøkning. Flere prosjekter fikk store kostnadsoverskridelser, noe som igjen førte til mer forsiktighet. Etter noen år med stabile forhold begynte oljeprisen å stige mot rekord-høyder. Igjen ble aktivitetsnivået drevet opp, og kostnadsnivået for-doblet seg i løpet av to-tre år. Det hele kulminerte med finanskrisen i 2008. Etter et dramatisk prisfall, har igjen oljeprisen stabilisert og styrket seg, men det er fortsatt stor usikkerhet i industrien om hvordan framtiden blir.

Teknologien

Utbyggingen startet i Ekofiskområdet på forholdsvis grunt vann (60–70 meter). Det ble bygget plattformer med stålunderstell av den typen som var vanlig i for eksempel Mexicogolfen. På så grunt vann er selve understellene ganske billige. Da er det ingenting i veien for å bygge flere små plattformer med broforbindelse.

Da aktiviteten flyttet seg nordover til Statfjordområdet, ble vanndyb-den større, ca. 150 meter. Det var store felt og dermed behov for store plattformer med dekksanlegg på over 40 000 tonn. Fordi bøyelasting var aktuelt, var det også viktig med oljelager.

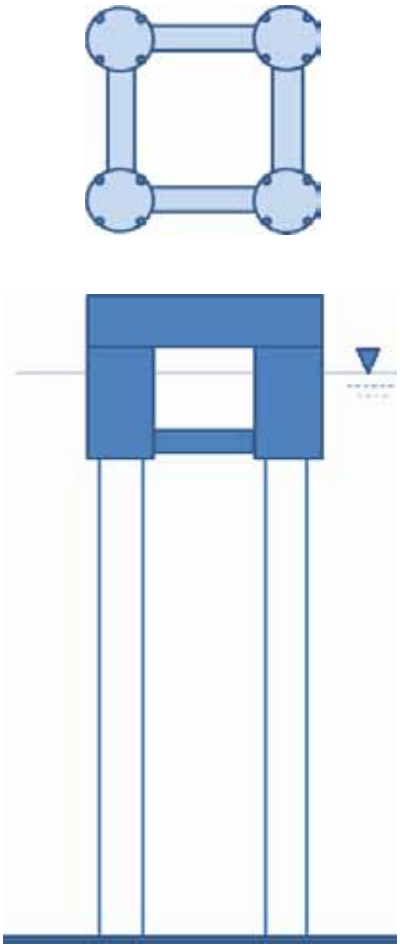
Det ble utviklet et norsk plattformkonsept basert på betong. Konsep-tet fikk navnet Condeep, og i forhold til de konvensjonelle stålunder-stellene hadde det mange fordeler som var svært viktige med tanke på utfordringene (se side 10–13).

Etter hvert som det ble behov for flere plattformer på havdyp mellom 300 og 400 meter, ble det klart at flytende plattformer ville måtte ta over. Utfordringen ved flytende plattformer er at brønnene da må være "havbunnskompletterte". Det betyr at utstyr og ventiler som ellers er plassert på plattformen må stå på havbunnen.

Siden uprosessert gass kan transporteres lange avstander gjennom rør, ble det tidlig sett som en mulighet å plassere hele prosessan-legget på land. Dette er blitt gjort i to tilfeller på norsk sokkel: Snøhvit og Ormen Lange.

I begynnelsen ble undervannsutstyr og rørledninger installert og koblet sammen ved hjelp av dykkere. I Norge ble det tidlig satset på såkalt dykkerløs teknologi som gjorde det mulig å installere utstyr uten bruk av dykkere.

Oppgaver



Viktige data for plattformen

Vanndyp.....310 m
Tetthet sjøvann..1.025 t/m3
Elastisitetsmodul for stål.....206000 MPa
Tyngdens akselerasjon.....9.81 m/s2

Søylediameter.....26 m
Dypgang.....37 m
Senteravstand søyler.....75 m
Pongtong-tverrsnitt.....140 m2
Plattformens masse.....90000 t

Antall strekkstag.....16
Ytre diameter.....1 m
Indre diameter....0.94 m

Oppgave 10.1 Strekkstagplattform

Figuren viser en strekkstagplattform som består av et dekk, 4 søyler og horisontale pongtonger nær nedre ende av søylene. Viktige data for plattformen er oppgitt i faktaboksen til venstre.
Oppgaven går ut på å beregne dynamiske egenskaper for denne plattformen.

a) Beregn plattformens oppdrift og samlet strekkraft i stagene. Alle størrelser skal oppgis i kN.
b) Du får vite at hydrodynamisk tilleggsmasse for horisontal bevegelse (jag) er 85 % av fortrengt vannmasse. Beregn plattformens totale masse ved den oppgitte dypgangen. Oppgi svaret i tonn.
c) Du får også vite at hydrodynamisk tilleggsmasse for vertikal bevegelse (hiv) er 60 % av fortrengt vannmasse. Beregn total masse også for hivbevegelsen.
d) Hva tror du er grunnen til at hydrodynamisk tilleggs- masse er ulik for de to bevegelsesretningene?
e) Stivheten for jagbevegelsen kan finnes som summen av stagkreftene dividert på lengden av et stag. Forsøk og forklar bakgrunnen for dette, og beregn plattformens egenperiode for jag.
f) I en gitt værsituasjon er vindkrafta 1000 kN og krafta fra strøm 4000 kN. Anta at de to kreftene virker i samme retning, og beregn hvor stor statisk forskyvning plattformen får. Beregn også horisontalkomponentene fra strekket i stagenes øvre ende. Kommenter svaret.
g) Den aksielle stivheten for et stag kan beregnes med formelen $K_{stag} = \frac{EA}{L}$ der E er materialets E-modul, A er stagets ståltverrsnitt og L er stagets lengde. Beregn stivheten for et stag og total stivhet fra alle stagene. Oppgi svaret i kN/m.
h) En flytende plattform vil også ha en vannplanstivhet som kan finnes ved formelen $K_{VP} = \rho g A_{VP}$, der ρ er vannets tetthet, g tyngdens akselerasjon og AVP er arealet til plattformens vannlinjeplan. Beregn også denne stivheten i kN/m, og sammenlign den med stivheten fra strekkstagene.
i) Beregn plattformens egenperiode for hivbevegelsen. Hvorfor tror du at denne egenperioden er svært forskjellig fra jageperioden?

Strekkstagplattform

Antall søyler	4	g	9,81 m/s^2
Antall stag per søyle	4	rho	1 t/m^3
Diameter	26 m	E	206000 MPa
Dypgang	37 m		
Senteravstand	75 m	strømhast	2 m/s
Pongtong-bredde	9 m		
Pontong-areal	81 m^2		
Pontong-volum, 1	15876 m^3	Stagdiam	1
Volum	94453,51545 m^3	Tykkelse	0,03 m
		Areal	0,091420346 m^2
Tørr masse	90000 tonn	Aksial k	68983,85099 kN/m
		sum K stag	1103741,616 kN/m
Oppdrift	926588,9866 kN		
Vekt	882900 kN	omega hiv	3,330169252
Sum stagkrefter	43688,98658 kN	T hiv	1,886746538 sec
Kraft pr. stag	2730,561661 kN		
		k jag	0,030656025
Vanndyp	310 m	T jag	204,9575994 sek
Staglengde	273 m		
Stivhet, jag	160,0329179 kN/m	Eksempel	
		F	5000 kN
Strømkraft 2 m/s	7696 kN	forsk	31,24357205
Forflytting	48,0901061 m	K_vannplan	20833,66018 kN/m
Faktor, hiv	0,6	K_tot	1124575,276 kN/m
Added mass, hiv	9525,6 t	T_hiv korr	1,869188089
Faktor, surge	0,85		
Added mass, jag	80285,48813 t		

Referanser

10.1 Statistisk sentralbyrå: Statistisk årbok 2009 (www.ssb.no/

10.2 Olje-og energidepartementet / Oljedirektoratet:
Fakta. Norsk petroleumsverksemd 2012

10.3 Bjørn Vidar Larsen: Dråper av svart gull. Statoil 1972-2002.
Statoil 2002

10.4 Dag Bakka, Marit Eggen: Skipsfartens bok . Norges maritime næringer 2007
Breakwater Publishing. 2007

10.5 Finn Gunnar Nielsen: Lecture notes in SIN 1546 Marine Operations.
Institutt for marin hydrodynamikk, NTNU, 2002

10.6 Torgeir Moan 1) : Marine Structures and Operations for a Future Safe and
Sustainable Use of the Oceans. Centre for Ships and Ocean Structures.
Keynote lecture, PRADS conference, Rio de Janeiro, 2010.
1) Norwegian University of Science and Technology. Trondheim, Norway

10.7 Hans Veldman, Georg Lagers: 50 years offshore. Foundation for Offshore Studies,
Delff, 1997

10.8 Frank Jahn, Mark Cook, Mark Graham: Hydrokarbon exploration and production.
Elsevier, 2008

10.9 Stein Fosser, Rune Elvik: Dødsrisiko i vegtrafikken og i andre aktiviteter.
TØI notat 1038/1996

10.10 T.Holmås 1), J. Amdahl 2): Fire resistance of offshore structures.
ECCM 2010. IV European Conference on Computational Mechanics
1) Usfos AS, Norway 2) NTNU, Norway

10.11 Stig Kvaal, Torgeir Moan, Johannes Moe, Gjert Wilhelmsen (red.): Et hav av muligheter.
Institutt for marin teknikk, NTNU, i samarbeid med Tapir. 2003

10.12 Y. Bai, Q. Bai : Subsea Engineeering Handbook. Elsevier. Amsterdam. 2010

10.13 Torger Reve, Amir Sasson: Et kunnskapsbasert Norge.
Universitetsforlaget. Oslo 2012

10.14 Torgeir Moan: Design of Offshore Structures. Design Procedures and Criteria.
Kompendium i fag TMR4195 ved Institutt for marin teknikk, NTNU. Trondheim 2004.

Forfattere: Anders Endal og Geir Johnsen

Livet i havet

Havromsteknologi

Innhold

Innledning....2
Kort om livets historie på jorda....4
Mer om forutsetninger for liv i havet....6
Vann, et livsviktig element....8
Biologisk produksjon i havet....10
Marine økosystemer. Næringskjeder....12
Bærekraftig utnyttelse av marine ressurser....14
Arktisk biologi. (Geir Johnsen, Asgeir Sørensen)....16
Oppgaver....19
Referanser....20

NTNU
Institutt for marin teknikk

11

Vi har flere ganger tidligere påpekt den enorme betydningen som olje- og gassutvinning og utenriks skipsfart har for verdiskapningen i det norske samfunnet(se f.eks. sidene 9–1 og 10–1). Tabellen nedenfor viser på nytt det samme bildet. Men vi ser nå at også eksport av fisk har et imponerende omfang.

Den viste plassering i tabellen bekreftes også av det faktum som er dokumentert på side 11–22, nemlig at produksjonen av sjømat i Norge i forhold til produksjonen totalt i verden er langt større enn landets befolkning på 0,1 % skulle tilsi.

Norsk eksport av varer og tjenester i 2010, eksportverdi i milliarder kroner:

1. Olje og naturgass	***481***
2. Utenriks skipsfart	***71***
3. Fisk og andre havdyr	***43***
4. Metaller	***34***
5. Mineraloljeprodukter	***30***

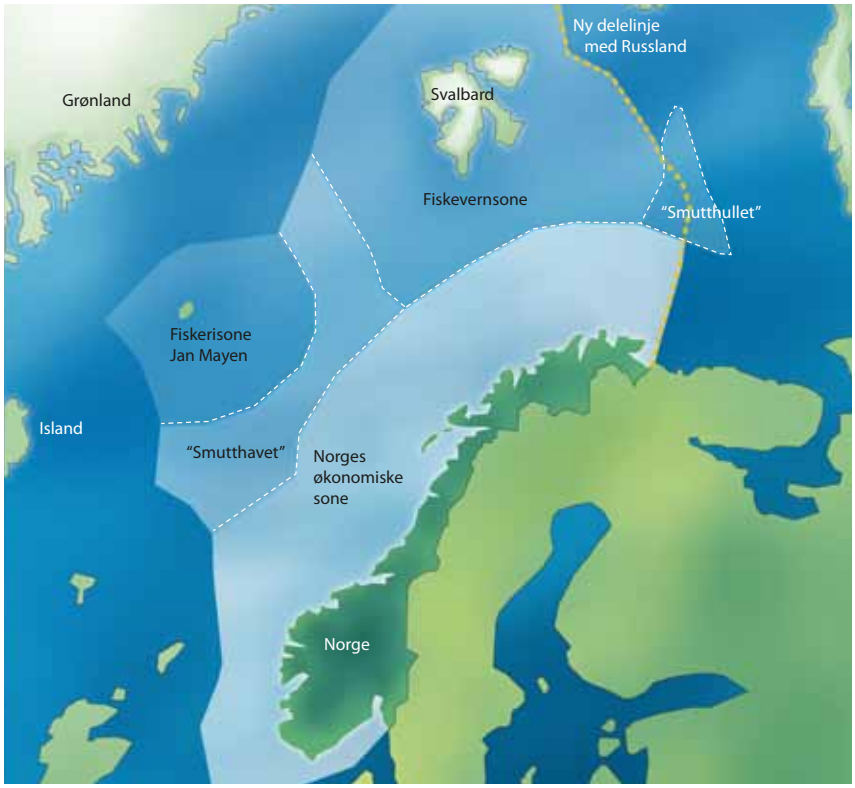
Norge - en stormakt til havs

En kyststats økonomiske sone er en havsone som ligger utenfor territorialgrensa. Sonen utgjør ikke en del av det området hvor nasjonale lover og regler gjelder fullt ut. I gammel tid hadde staten rådevelde over havet innenfor ett kanonskudd avstand fra land. Territorialgrensen er i dag tolv nautiske mil.

I den økonomiske sonen har kyststaten ikke full suverenitet, men suverene rettigheter over naturressursene både under og på havbunnen, samt i havområdet over. Dette innebærer at kyststaten har suveren rett til å utnytte, bevare og forvalte f.eks. olje, gass og fiskeressurser. FNs Havrettskonvensjon av 10. desember 1982 slår fast at sonen kan strekke seg ut til 200 nautiske mil fra land, med mindre den støter opp mot annen stats jurisdiksjonsområde. Andre stater har rett til bl.a. skipsfart og overflyving, og til å legge og vedlikeholde undersjøiske kabler og rørledninger i en kyststats økonomiske sone.

Norge har opprettet tre soner på 200 nautiske mil:
- en økonomisk sone rundt det norske fastland
- en fiskevernsone ved Svalbard
- en fiskerisone ved Jan Mayen

På grunn av de spesielle strømforholdene i disse områdene, hører norsk økonomisk sone og de andre sonene med til de mest produktive havområdene i verden.



Norsk økonomisk sone og fiskerirelaterte soner gjør Norge til en stormakt til havs. Den økonomiske sonen er syv ganger større enn fastlandsarealene.

Livet i havet

MÅL

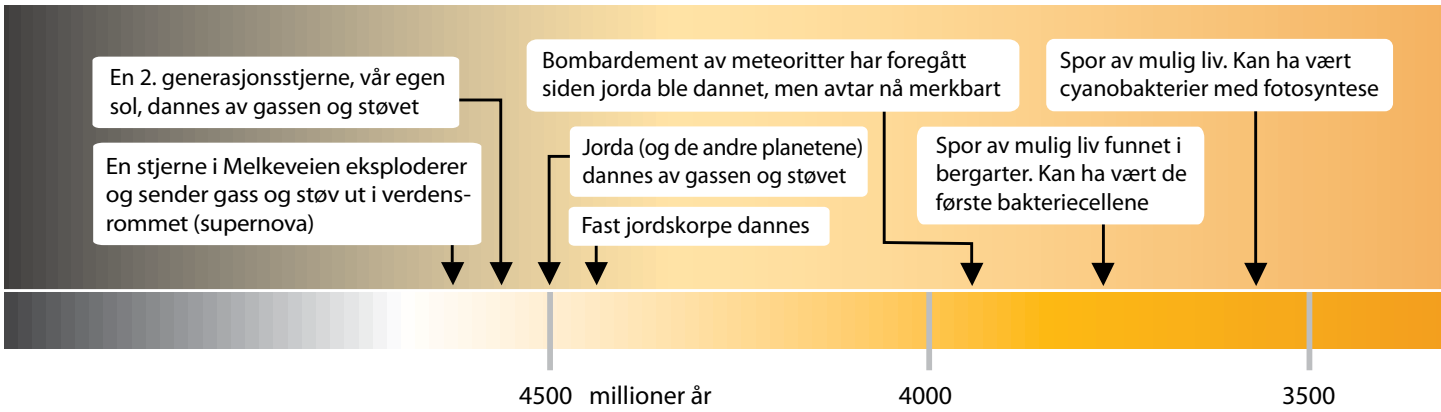
Etter å ha studert dette kapitlet skal du:

- **kjenne til hva som karakteriserer liv, de viktigste forutsetningene for liv og milepeler i utviklingen av liv**
- **kjenne til de viktigste egenskapene til vann og hvorfor vann er en avgjørende forutsetning for eksistensen av liv**
- **kunne sette opp kjemiske ligninger for fotosyntese og celleånding, og forstå hvorfor disse to prosessene er avgjørende for livet på jorda**
- **vite hvordan havstrømmer oppstår, og kjenne til havstrømmene i norske farvann**
- **ha fått gode, generelle kunnskaper om næringskjeder og den biologiske produksjonen i havet. Forstå hvordan denne ressursen kan utnyttes på en bærekraftig måte**

Hva er liv?

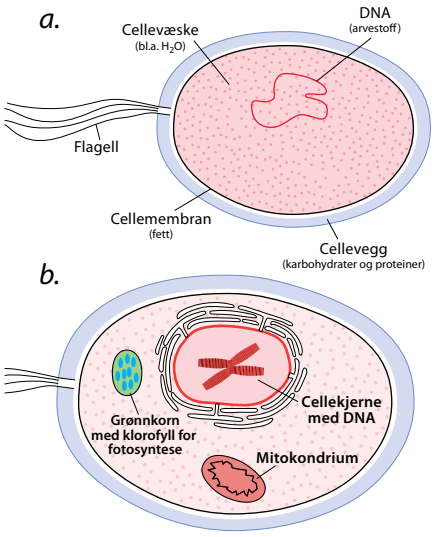
Liv kan defineres ved at det har en begynnelse og en slutt, — fødsel og død. I tillegg er det oppbygd av én eller flere celler, det omsetter energi, har et stoffskifte, det kan dele seg og føre arvelige egenskaper videre, og det kan utvikle seg og tilpasse seg miljøet.

Læren om livsprosessene kaller vi biologi.



Jordas og livets historie i de første 1000 millioner år. *De viktigste hendelsene for jorda før livet oppstod, er avmerket. De fleste forskere mener at livet kan ha oppstått for 3700—3900 millioner år siden, men de er ikke sikre. Første sikre spor av liv, finnes i 2,7 milliarder år gamle fossiler, men det må ha vært en utvikling forut for disse funnene. Livet må derfor være eldre.*

Kort om livets historie på jorda



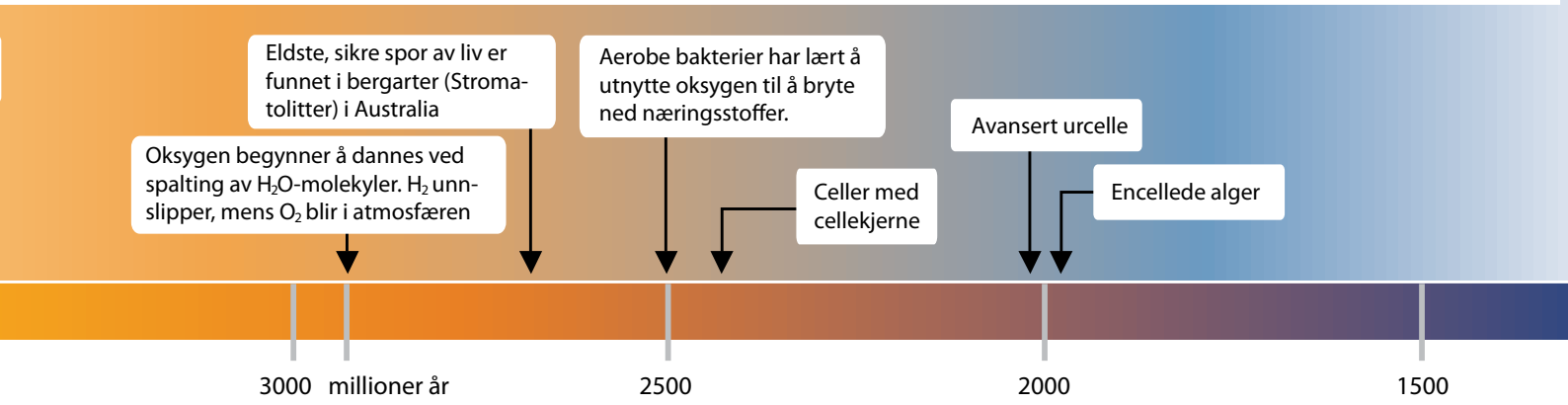
a. Den første bakteriecellen *kan ha sett slik ut.*
b. Avansert urcelle *"klar" for videre utvikling til planteceller.*

Cellenes "byggesteiner" er først og fremst fett, karbohydrater, proteiner, DNA og vann. Dette er stoffer som består av store molekyler bygget opp av noen av de vanligst forekommende grunnstoffene på jorda (se side 11–6 og oppgave 11.3). Karbonatomer inngår i de fleste stoffene.
Det ligger nesten 2000 millioner års "prøving og feiling" mellom de to viste cellene.

Livets urtid (3800—542 mill. år siden)

Milepelene i utviklingen er markert på tidsaksene foran og nedenfor.

- **De første bakteriecellene.** Alt liv er organisert ved hjelp av celler. Den første cellen som kunne kopiere seg selv, oppstod trolig for 3,7—3,9 milliarder år siden, og var kanskje bygget opp som vist øverst til venstre. Karbon inngår i alle "byggesteinene". To forhold gjør at dette har vært avgjørende for utviklingen av cellen. For det første har karbonatomer en fantastisk evne til å lage store molekyler sammen med andre grunnstoffers atomer (ref. side 10-8). For det andre hadde karbonatomene tid til å bruke hundrevis av millioner år på å utnytte denne evnen. Disse første cellene lignet på bakterier. Cellen skaffet seg energi ved å finne andre energirike stoffer, men trengte ikke oksygen for å bryte ned disse (anaerob celle).
- **Cyanobakterier.** For 3,6 milliarder år siden lærte bakteriene å hente energi fra sollys ved hjelp av fotosyntese (se side 11–7). Sollyset ble fanget opp vha. ulike fargestoffer. Energien ble brukt til å lage sukker. Å lage sin egen "mat" slik er mye mer effektivt enn å finne den tilfeldig.
- **Aerobe bakterier.** Disse har lært å utnytte oksygen til å bryte ned næringsstoffene. Dette kalles aerob forbrenning eller celleånding. Prosessen frigjør mer energi enn anaerobe prosesser. Disse bakteriene har altså fått et eget "kraftverk". Vi kaller dette et mitokondrium.
- **Celler med cellekjerne.** Arvestoffet har fått et eget, beskyttet rom.
- **Avansert "urcelle".** Også et mitiokondrium har nå flyttet inn i et eget rom i cellen med cellekjerne (se figur til venstre).
- **Encellede alger.** Videre utvikling fra "urcelle " til encellet alge er kort. Cellen har blitt større og fått flere oppgaver, bl.a. lagring av næringsstoffer. Algene blir god mat for andre.



Livets historie på jorda de neste 2000 millioner år. *Utviklingen har gått uhyre langsomt og har ikke kommet lenger enn til encellede organismer som lever i havet. Disse har imidlertid blitt ganske avanserte og kan ivareta mange flere oppgaver enn de første bakteriecellene. Utviklingen er nå klar til å gå videre til en- og flercellede planter.*

- **Encellede dyr** utviklet fra én celle med celle med cellekjerne og mitokondrium, men uten anlegg for fotosyntese.
- **Flercellede alger og dyr** utviklet ved samarbeid mellom encellede organismer. Sjansene for å overleve er blitt større.

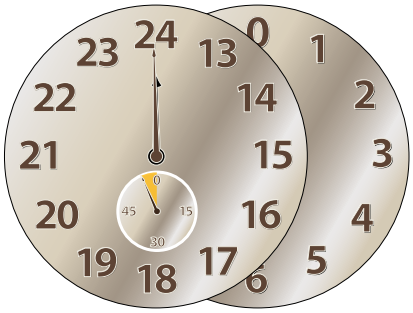
Livet i de geologiske perioder (542 mill. år – nåtid)

Livet har en lang historie på jorden. Alle arter som har slått rot, gått, krøpet eller svømt på jorden, har samme opprinnelse. Evolusjon er bakgrunnen for all biologisk tankegang i dag. Menneskene kan spores tilbake gjennom apene, de første pattedyrene, paddene som var de første landlevende virveldyr, helt tilbake til fiskene. Mennesket har gjennomgått en formidabel utvikling. Skilpadden, derimot, som har samme opprinnelse, har ikke endret seg noe særlig på 200 millioner år.

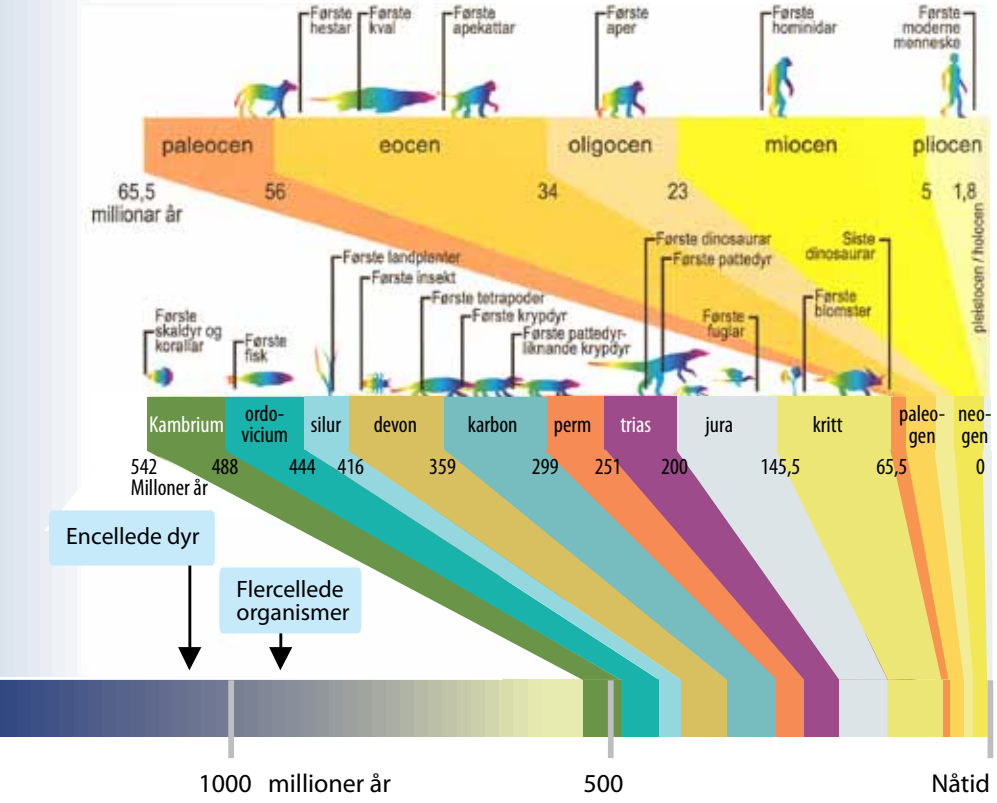
99 % av alle arter som har levd på jorden antas å være utryddet i dag. Livet på jorden har overlevd fem store utryddelser, den siste for 65 mill. år siden. Da forsvant blant annet dinosaurene og en rekke andre dyr.

Grunnlaget for mesteparten av kull ble lagt i karbonperioden, hvor det var en enorm plantevekst på jorden. Dette var før den tredje katastrofen for 260 mill. år siden.

Mesteparten av de første dyrene på jorden levde i havet. Livet i havet - slik vi kjenner det i dag - utviklet seg etter den siste store katastrofen, hvor en enorm meteoritt traff jorden i en periode med voldsomme vulkanutbrudd og skapte en global vinter, og førte til at de fleste havlevende krypdyr forsvant, beinfiskene begynte å utvikle seg og havpattedyrene oppstod.



Til ettertanke.
Hvis vi sammenligner perioden fra jorden ble dannet og fram til i dag med en klokkes 24 timer, og jorden ble dannet ved forrige midnatt, så kom de første planter, fisker og dyr mellom klokken 21 og 22.30, dinosaurene døde klokken 23.40. Mennesket, homo sapiens, med sine 200 tusen år på jorden har bare eksistert i fire sekunder!



Hvor gamle er reservoarene av kull, råolje og gass?
Mesteparten av kullereservoarene (for eksempel kullet på Svalbard) ble dannet i karbontiden, ved at døde planter, trær og dyr råtnet i myraktige skogbunner på jorda, uten tilgang på oksygen. Mesteparten av olje- og gassreservoarene i Nordsjøen ble dannet av små dyr og planter som levde i havet og sank til bunns når de døde.
Eksempler:
- *Statfjordfeltet (oljefelt) kommer fra overgangen mellom Trias og Juratiden.*
- *Ekofiskfeltet (olje- og gassfelt) er yngre, fra Paleocentiden.*

Livets historie på jorda i de geologiske periodene. Fra [11.1]. *Antall fossiler begynte å øke for 542 millioner år siden. Mange nye former dukket opp. Særlig var det nå blitt et yrende liv i havet. Landjorda ble "erobret" av planter for 425 millioner år siden, og i karbontiden var det blitt enorme sumpskoger på land. Kull ble dannet i denne tiden. Naturgass og råolje kommer på sin side fra små dyr og planter som levde i havet på et senere tids-punkt (se boks til høyre).*

Mer om forutsetninger for liv i havet

Livet i havet i dag

Livet er i kontinuerlig utvikling. Noen arter dør ut og nye oppstår. I dag omfatter livet i havet utallige varianter: fra de minste mikroskopiske virus, bakterier og alger, til den aller største levende skapning på jorden noen gang - blåhvalen.

Den kan bli opptil 35 meter lang, ha en vekt på 190 tonn, og er langt større enn de største dinosaurer. Bakterier har en størrelse på f.eks. fem mikrometer ($5 \cdot 10^{-6}$ m), mens virus er enda mye mindre (men defineres ikke som liv, fordi det ikke har eget stoffskifte). Hjertet til blåhvalen er like stort som en liten bil. [11.4] Se også oppg. 11.3.

Grunnstoffer som må være tilgjengelig for oppbygging av planteceller, rangert etter hvor mye av grunnstoffene som typisk inngår i cellenes molekyler:

Grunnnstoff	*Masse-%*
Oksygen, O	*48*
Karbon, C	*42*
Hydrogen, H	*6*
Nitrogen, N	*1*
Kalium, K	*2*
Kalsium, Ca	*0,5*
Magnesium, Mg	*0,2*
Fosfor, P	*0,2*
Svovel, S	*0,1*

Cellemolekylene er bygget opp av ni grunnstoffer, som alle er blant de mest utbredte på jorden. De finnes oppløst i havet, enten i form av gasser (O_2 og CO_2), næringssalter (nitrater NO_3, fosfater PO_4, sulfater SU_4) eller ioner. Vann har meget stor evne til å være løsemiddel (se side11-9), noe som er av stor betydning for stoffenes tilgjengelighet. Det vises også til i oppg. 11.1

Foran er det listet opp noen milepeler i livets utvikling på jorda. Selv om disse gir en svært forenklet beskrivelse av de prosesser som har foregått, skjønner vil likevel at:

Livets utvikling og eksistens er basert på tre superviktige forutsetninger. Det må være tilgang på: 1) karbon og andre grunnstoffer, 2) energi og 3) vann.

Det er klart at livet i havet også er avhengig av av en mengde andre forutsetninger. Vi kan imidlertid av plasshensyn ikke gå i detalj når det gjelder disse, men vi skal se litt nærmere på de tre hovedforutsetningene.

Tilgang på karbon og andre grunnstoffer

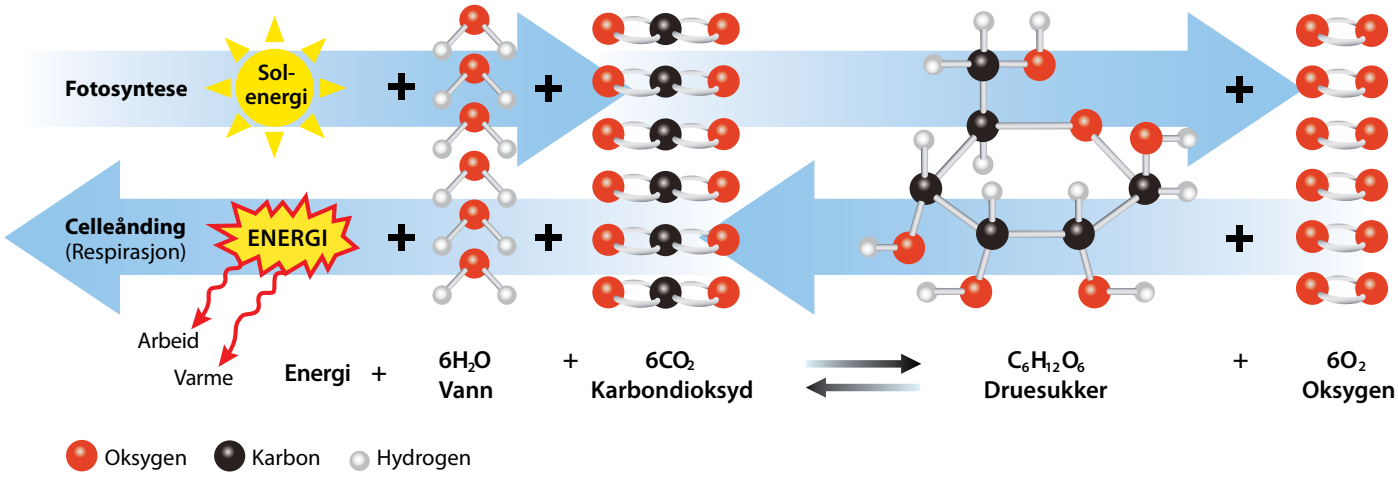
I tabellen til venstre er det satt opp en oversikt over hvilke stoffer som inngår i oppbyggingen av en plantecelle. Vi har foran (se figurtekst øverst på side 11–4) pekt på den enorme betydningen som grunnstoffet karbon har for eksistensen av liv. Dette bekreftes av den plass som karbon har i den viste tabellen.

Tilgang på energi. Fotosyntese og cellerespirasjon

Levende organismer kan ikke fungere uten energi. De kan ikke skape energi, men de kan omvandle en type energi til en annen. Planter kan forvandle lysenergi til kjemisk bundet energi, og dyr kan forvandle kjemisk energi til bevegelsesenergi ved hjelp av musklene, og herunder utvikle varme. Alt liv driver direkte eller indirekte med forvandling og overføring av energi, og får energien direkte eller indirekte fra solen ved fangst, lagring eller overføring.

Fotosyntese - grunnlaget for alt liv. Fotosyntesen er den ene av de to viktigste kjemiske reaksjonene på jorden. Den andre er cellerespirasjon. Fotosyntesen foregår ved hjelp av bladcellens klorofyll. Dette er et stoff (pigment) som absorberer energien i de blå, og delvis de røde frekvensene i sollysets spektrum. Den grønne delen av spekteret reflekteres. Derfor er bladene på plantene grønne. Energien brukes til å holde fotosyntesen i gang (se figur). Solen leverer enorme mengder energi til jorden. Mindre enn en promille av denne fanges av fotosyntesen, men dette er nok til å drive all vekst og aktivitet av levende organismer på

vår klode. Denne klorofyllbaserte primærproduksjonen er grunnlaget for alle de næringskjeder som menneskene utnytter i sin matproduksjon fra land og hav. Som tidligere nevnt, finnes det bakterier og en del uvanlige skapninger i havet, også på store dyp, som kan produsere energi på andre måter. Vi kaller dette anaerob forbrenning (energiproduksjon som foregår uten bruk av oksygen). En har antatt at slik produksjon har liten betydning, men de siste årene har forskningen på dette området økt.



Fotosyntese og cellerespirasjon er de viktigste kjemiske reaksjoner på jorda. Reaksjonene kan gå begge veier.

Omtrent alt liv på vår klode drives av fotosyntese. Planter, alger og bakterier bidrar med en årlig biomasseproduksjon på omkring 250 milliarder tonn. Alger og bakterier i havet bidrar med litt under halvparten av dette. Energiomsetningen i havet går mye raskere enn på land. Den biomassen som lever i havet er derfor mye mindre enn den som finnes på land, og utgjør kun noen få prosent. Trær kan jo bli flere hundre år gamle. Skogene representerer enorme lager av karbon bundet som cellulose.

Primærproduksjonen i havet begrenses av tilgangen på sollys og næringsstoffer som nitrat, fosfat og silikat (næringssalter). Næringsstoffene kreves bare i små mengder, men er likevel av livsviktig betydning.

Disse stoffene blir i stor grad resirkulert. Når organismene dør eller forbrenner energi og produserer avfallsstoffer, frigjøres næringsstoffer som går tilbake til vannet. De siste årene er det også blitt klart at jern kan være en viktig faktor i primærproduksjonen.

Celleånding (respirasjon)

Livsprosessene i havet krever energi. Denne energien frigjøres ved celleånding (respirasjon), eller for høyerestående dyr ved forbrenning. I denne prosessen reverseres fotosyntesen: sukker og oksygen reagerer, og frigjør energi, karbondioksid og vann (se figur).

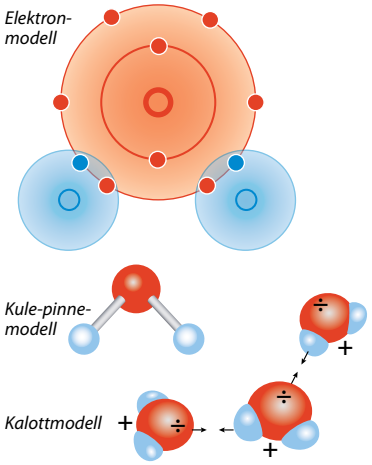
Ved økende vanndyp reduseres fotosyntesen på grunn av manglende lys. På en dybde kalt kompensasjonsdybden, er energien lagret av fotosyntesen lik respirasjonsenergien, og netto produksjonen av biomasse stopper opp.

Fotosyntesen lagrer solenergi som kjemisk energi i druesukkeret. Cellerespirasjon i mitokondriene frigjør energien igjen, slik at den kan omformes til varme, bevegelsesenergi, energirike molekyler for diverse livsfunksjoner, osv. Det er bare plantene som utfører fotosyntese. Dyr må derfor skaffe seg nødvendig energi ved å spise planter og alger eller andre dyr eller matvarer.

Populært kan vi si at en plantecelle inneholder både en "matfabrikk" (fotosyntesen) og et "kraftverk" (cellerespirasjon). I perioder hvor det produseres mer "mat" enn det er behov for, lagres overskuddet f.eks. i form av stivelse. "Matfabrikken" arbeider bare når det er tilførsel av solenergi, mens "kraftverket" er i virksomhet så lenge det er tilgang på lagret mat.

Vann, et livsviktig element

Den blå planeten – hav og vann. *"Vannkloden" eller "havplaneten" hadde kanskje vært et mer dekkende navn enn "jorda" på planeten vår.*



Kjemisk oppbygging av vannmolekylet
Oksygenatomets åtte elektroner er fordelt med to i innerste skall og seks i ytterste skall (se øverste figur). Hvert av hydrogenatomene bruker da et elektron felles med oksygenatomet, som dermed får åtte elektroner i sitt ytterste skall (ref. side 10-8). Atomene ligger imidlertid ikke på en rett linje, men danner en vinkel. En slik oppbygging gir en skjev fordeling av de elektriske ladninger internt i molekylet. Vannmolekylet har derfor en negativ og en positiv pol, og vi kaller det defor et polart molekyl. Polare molekyler tiltrekker hverandre, forårsaket av elektrostatiske krefter (hydrogenbinding, se nederste figur).

Over 70 % av jordas overflate er dekket av vann. Havet styrer klima og vær, regulerer temperaturen, skaffer oksygen, absorberer CO_2 og gjør vår planet beboelig for menneskene. Det anses som sikkert at livets vugge stod i havet.

Jordas ytre domineres av hav og vann

Havet inneholder 97 % av vannet på jorda, og primærproduksjonen av biomasse i havet er omtrent like stor som på land, ca. 50 mrd. tonn/år. Vann er en forutsetning for alt liv. Kunnskap om vannet er grunnleggende for all vår viten om marin biologi og økologi, og dermed for vår evne til å utnytte og forvalte de levende ressursene i havet på en bærekraftig måte.

Utjevner temperatursvingninger på jorden. Vann er velkjent for oss alle, men det har uvanlige egenskaper som vi sjelden tenker på. I forhold til andre væsker krever vannet stor tilførsel av varme for å øke temperaturen, for å smelte is og for å forandres til damp. Vannets termiske egenskaper har stor virkning på temperaturforholdene i verden: Varme fra sola lagres om dagen og avgis om natta. I tillegg lagres store mengder varme om sommeren og avgis om vinteren. Havet bidrar slik til å jevne ut temperatursvingningene på jorda.

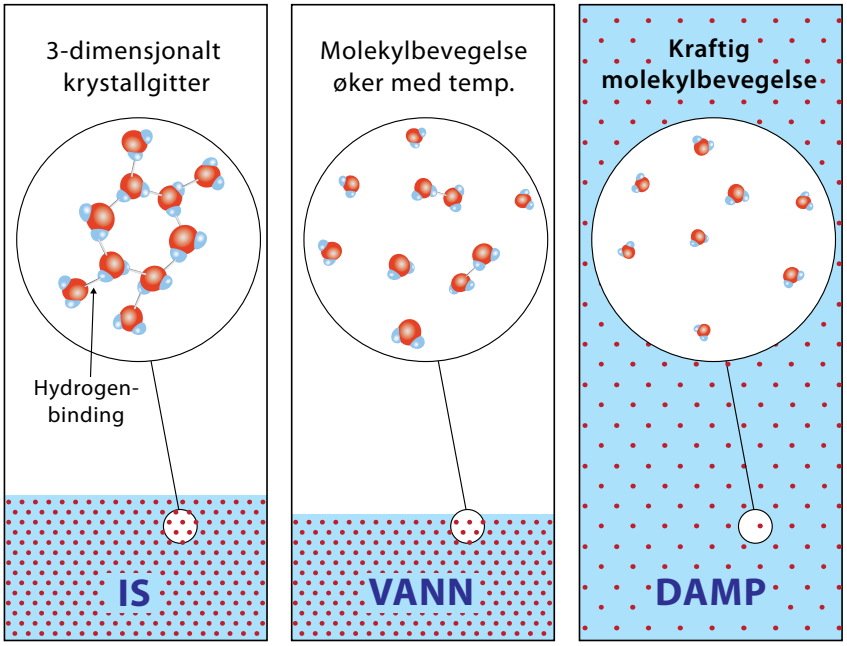
Løsemiddel for næringssalter. Vann er et fremragende løsemiddel som løser nesten hva som helst, og dette er av fundamental betydning for livet i havet. Viktige salter er oppløste i havet, deriblant essensielle næringssalter som nitrater og fosfater, som finnes i produktive havområder.

Gjennomsnittlig saltholdighet i havet er på ca. 3,5 %. Hvis alt vannet i havet fordampet, ville saltet dekke planeten vår i et lag med en tykkelse på 45 m. Tettheten for sjøvann er 1,025 kg/dm^3. Tettheten øker når saltholdigheten stiger og synker når temperaturen stiger. Endringer i temperatur og saltholdighet fører til horisontale trykkrefter som skaper strømninger i havet.

Vannmolekylets oppbygging

Et molekyl er en gruppe av to eller flere atomer som kan holdes sammen av felles elektroner (se side 10-8). Vann er en kjemisk forbindelse, og er et polart molekyl. Formelen er H_2O, som betyr at molekylet består av to hydrogenatomer og ett oksygenatom. Vi ser fra figuren at de to hydrogenatomene er plassert på samme side. Dette er årsaken til de spesielle egenskapene vannet har. Molekylet får en positiv og en negativ pol, slik at molekylene tiltrekkes av hverandre, som vist på kalottmodellen på figuren. Dette kalles en hydrogenbinding.

Vannmolekylets oppbygging forklarer dets spesielle termiske egenskaper. Hydrogenbindingene medfører at vann har et høyt kokepunkt, dette fordi det krever mye energi å bryte disse bindingene ved overgang til dampfase.



Temperaturen i et legeme, i en væske eller en gass avhenger av hvor raskt molekylene vibrerer og beveger seg. Tilførsel av varme medfører at molekylbevegelsene øker, is smelter til vann, væsken føles gradvis varmere og til slutt fordamper den.

På grunn av bindingene mellom de polare vannmolekylene, kreves mye energi for å øke molekylbevegelsene, altså vanntemperaturen. Vannet får dermed høy spesifikk varmekapasitet, langt høyere enn for andre vanlige væsker. (og dobbelt så høy som for olje/bensin). Energien som kreves for å smelte og fordampe vann er også svært høy.

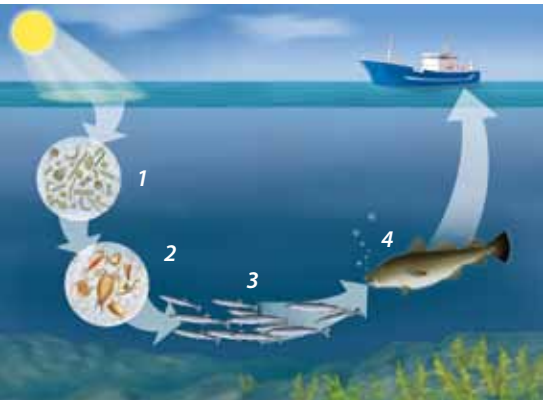
Livsviktige bindinger mellom molekyler og mellom atomer. H_2O-molekyler krever mye større varmetilførsel eller bortførsel for å gjennomløpe de prosesser som er vist på neste side, enn molekyler for andre stoffer. Dette betyr at både temperatur-variasjoner og forandringer i aggregattilstander, for eksempel frysing, blir vanskeligere. Dette har vært gunstig for utviklingen av livet. Dessuten, hvis frysing likevel skulle skje, legger isen seg på overflaten istedenfor å synke ned og gi bunnfrost. Vann er nesten det eneste stoffet på jorda som har denne egenskapen. Alt dette kan forklares ved hjelp av hydrogenbindingen mellom H_2O-molekylene. Denne bindingen, som skyldes elektrostatiske krefter, forklarer også vannets fabelaktige evne til å løse opp andre stoffer (for eksempel næringssalter). På grunn av alt dette sier mange at *hydrogenbindingen mellom vannets molekyler har vært av avgjørende betydning for utviklingen av livet.*

Benytter vi anledningen til å se på bindinger mellom *atomer*, finner vi også en bestemt type som har vært superviktig. Vi tenker da på kjemiske atombindinger som forklares ved felles bruk av elektronpar, såkalte kovalente bindinger. Disse er spesielt viktig ved oppbygging av molekyler (se side 10-8). Det er denne type atombindinger som forklarer karbonatomets fantastiske evne til å danne forbindelser med andre atomer i utallige varianter. Kjemiens *kovalente atombindinger har også vært livsviktig.*

H_2O-molekylets aggregat-tilstander

- ***Is.*** *Legg merke til at volumet øker når vann fryser til is. Det er nesten bare vann som har denne egenskapen. Den skyldes hydro-genbindingen. Is er 9 % lettere enn ferskvann og blir altså liggende oppå. Spesifikk frysevarme er stor. Alt dette er viktig for livet i vann; Det forhindrer at innsjøer bunnfryser og ødelegger nærings-skjedene.*
- ***Vann***
- ***Damp.*** *Når vann går over til damp ved 100 °C og 1 atm trykk, øker volumet 1673 ganger. Avstanden mellom molekylene øker da dramatisk.*

Biologisk produksjon i havet



Biologisk produksjon i havet, fordelt på ulike trofiske (næringsmessige) nivåer i en næringskjede.
Hvert nivå omfatter bestander som spiser av bestandene på det lavere nivået, og dermed utnytter noe av næringsenergien (kjemisk energi) som er samlet opp her. Energiandelen som på denne måten føres videre til neste nivå, er imidlertid lite. Tapene vil øke med antall trofiske nivåer som energikjeden består av.

- *Trofisk nivå nr. 1: planteplankton (primærproduksjon). Produksjonen skyldes fotosyntese*
- *Trofisk nivå nr. 2: dyreplankton (sekundærproduksjon).*
- *Trofisk nivå nr. 3: småfisk som for eksempel sardiner, sild makrell og lodde*
- *Trofisk nivå nr 4: rovfisk, som for eksempel torsk*

Biomasseproduksjon i havet

I dette kapitelet vil vi i hovedsak ta for oss de marine organismer som utnyttes eller er viktige i produksjonen av mat: alger, bløtdyr/skalldyr, krepsdyr og fisk. Fiskeri og fiskeoppdrett skaffer mat og inntekter til millioner av mennesker. Fiskeri og havbruk høster bare en ørliten del av den biomasseproduksjonen som foregår i havet. Figuren til venstre viser produksjonskjeden. Energitransporten gjennom næringskjeden foregår ved at glukose fra fotosyntesen kombineres med næringssalter og danner stivelse, fett, cellulose osv.

Alger

Alger er den suverent største gruppen av primærprodusenter i havet, og deles inn i to grupper: de som svever fritt i vannet, og de som er knyttet til bunnen. De største av disse er tang og tare, som vi blant annet finner i fjæra. Et planteplankton (plankton, fra gresk – "det som svever") er svært lite, fra noen få tusendels millimeter opptil et par – tre millimeter. Hvert individ består vanligvis av én celle. Utrolig nok er disse bitte små plantene grunnlaget for den enorme primærproduksjonen og dermed for så godt som alt liv i havet. Dette er utgangspunktet for den "foredling" som skjer videre i næringskjeden. *Hvert trinn i næringskjeden antas å representere et energitap på 90 %.*

Planteplanktonet står for nesten hele primærproduksjonen (fotosyntesen) i havet, og er dermed hovedgrunnlaget for livet der.

Enorme energitap

I figuren til venstre forvandles 500 000 enheter solenergi til 10 000 enheter energi i den glukosen som skapes ved fotosyntese i planteplankton. Dyreplankton som beiter på det klorofyllholdige planteplanktonet, får med seg bare en liten del av energien (1000 enheter). Dette planktonet spises så av arter som sardiner, sild, makrell og lodde, som bare får med seg 100 enheter av energien som økt biomasse. På figuren ser vi deretter rovfisken torsk som da sitter igjen med 10 enheter energi lagret i sin biomasse. Når mennesket så til slutt fanger denne fisken og spiser den, bidrar dette til en økning av den menneskelige biomasse som tilsvarer en eneste energienhet.

Stor fossil energisubsidiering i dagens fiske- og landbruksprodukter

Denne framstillingen var korrekt den gangen våre forfedre på 1800 - tallet drev fiske med seil og årer. Da måtte de nødvendigvis hente hjem mer matenergi enn den muskelenergien de brukte i fisket, for å kunne fø seg og sine. Det var dette som avgjorde om matproduksjonen var bærekraftig. I dagens høyteknologiske fiskerier foregår det en dramatisk subsidiering av matenergiproduksjonen. Avhengig av hvilke fangst- og foredlingsmetoder som anvendes, bruker vi fra 10 til 20

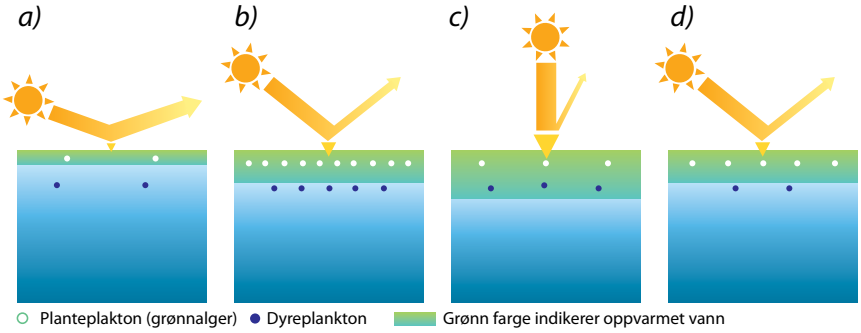
ganger mer fossil energi til å få fisken fram på middagsbordet, enn den energien maten representerer. Industriell landbruksproduksjon bruker også mye fossil energi. Produksjonen av nitratholdig kunstgjødsel krever store mengder fossil energi, og energibruken i jordbearbeiding, transport og logistikk er også omfattende.

Å skape bærekraftig matproduksjon for ni milliarder mennesker innen 2050 (prognose fra FN-rapport) er – som vi skjønner – en utfordrende oppgave.

Primærproduksjonen i norske farvann

Denne avhenger – som vi vet – av næringssalter og sollys. Figuren nedenfor viser først situasjonen om vinteren, med lav sol, næringsrikt blått vann og lite plankton. Gjennom vinteren har dårlig vær ført til en kraftig omrøring og tilførsel av næringssalter til de øverste vannlagene. Produksjonen er liten (figur a). Etter hvert som solen stiger, øker produksjonen kraftig, og vi får en "vårblomstring" av både plante- og dyreplankton (figur b).

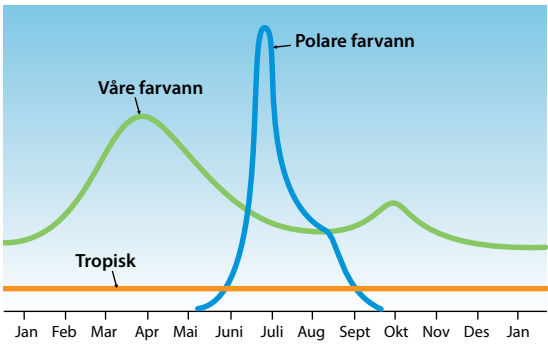
Biomasse produksjonen fører til at næringssaltene blir oppbrukt. Temperaturen i overflaten stiger når solen kommer høyere, og vi får en markert termoklin, et lag av "lett" vann på toppen, som forhindrer tilførsel nedenfra av næringsrikt vann (figur c). Utover sensommeren blir det ofte mer vind, nordavind gir oppvelling og vi får en ny oppblomstring, men ikke like kraftig som om våren (figur d).



Variasjon av plankton gjennom året i norske farvann. I figur c er vannet også fattig på både næringssalter og oksygen.

Forholdene i Barentshavet

I Barentshavet er det lite lys om vinteren, og is på havet hindrer i tillegg lyset å trenge ned i havet. Storm og strøm fører til omrøring, avkjøling og utfrysing av salt fra havisen fører til at overflatevannet blir tungt og synker, mens varmere vann stiger opp fra dypet. Det finnes derfor mye næringssalter i havet når isen smelter. Det lette smeltevannet legger seg på toppen, og sammen med oppvarming forhindrer dette omrøring. Dermed blir algene værende oppe i lyssonen. Vårblomstringen blir derfor eksplosiv langs iskanten (se figur til høyre), og etter som iskanten trekker seg nordover avdekkes stadig nye områder, og primærproduksjonen spres ut over lenger tid. Dette fører til at den kan utnyttes bedre av dyreplankton og andre høyere organismer. Den delen av primærproduksjonen som ikke blir spist, dør og avgir næringssalter. Mye synker til bunns, hvor plante- og dyreplankton råtner og blir bakteriemat. Dermed frigjøres næringssaltene som senere kan komme opp igjen i sollyset ved omrøring/oppvelling og brukes på nytt av primærprodusentene. Det kan være snakk om både ny og regenerativ produksjon, der næringssalt blir gjenbrukt i lukkede områder. I våre hav er nesten all produksjon ny, basert på tilførsel av næringssalter fra dypet.



Figuren viser phytoplanktonbiomassen i havet gjennom året, i tropene (rødt), i våre tempererte farvann (grønt) og i polare farvann (blått). Grunnen til den lave produksjonen i tropene er mangel på næringsstoffer i det varme vannet.

Marine økosystemer. Næringskjeder

Planteplankton og dyreplankton
Både planteplankton og dyreplankton (nederst) består av en en rekke organismer av svært varierende form og størrelse. De fleste er encellede. Mange arter er krepsdyr son raudåte, småkrill og krill. Disse blir henholdsvis 3, 25 og 45 mm store.

Raudåte** (øverst) **og krill
Raudåten er det viktigste dyreplankton i norske farvann.

Hva er et økosystem?

Ordet økosystem er i flittig bruk når det gjelder diskusjonen om bærekraft. Det omfatter de levende organismene, de fysiske omgivelsene og samspillet mellom disse i et gitt område. Økosystemene kan defineres på ulike vis, og havet blir ofte referert til som det marine økosystemet. Det er imidlertid nyttig å ha en mer nøyaktig inndeling. Ulike arter kan ha samme rolle i systemenes ulike lokaliteter. Det er derfor praktisk å definere dem geografisk, for eksempel som tropiske eller arktiske systemer, eller som Nordsjøen eller Barentshavet. I de to nevnte havområdene har de to ulike planktonspisende artene sild og lodde samme rolle. Det kan også være hensiktsmessig å dele dem inn etter hvor i vannmassene de befinner seg. I nærheten av bunnen finnes de demersale økosystemene, mens de pelagiske systemene finnes i de frie vannmassene som ikke er nær bunn eller land. Pelagiske systemer har enkle næringskjeder, mens energiflyten i et demersalt system kan være svært komplisert uansett hvilket geografisk område de befinner seg i.

En del viktige begreper er i bruk i forbindelse med økosystemer:

- **Bestand**, også kalt populasjon - dette er de individene av en art som lever i et økosystem.
- **Nisje** – dette er det fysiske stedet hvor en art oppholder seg i økosystemet. Desto større variasjon det er i omgivelsene, desto flere organismer vil finne sin nisje der. Et vrak som synker ned på en stor mudderslette, vil føre til stor økning i antall organismer som finner en nisje der. Dette gjelder både alger og dyr av ulike slag. Artsmangfoldet eller biodiversiteten øker, og fiske i nærheten av vrak kan derfor gi gode fangster.
- **Energitransport** gjennom næringskjeden er et sentralt begrep. Sollysets rolle i første trinn i næringskjeden er vist i figur på side 11-16. Næringskjeden opprettholder en kontinuerlig strøm av energi gjennom økosystemet. Det kan på mange måter sammenlignes med en maskin som drives av sollyset. Sett på som maskin, er den lite effektiv, tapene i hvert ledd i kjeden er svært høye.

Hvem som spiser hvem i næringskjeden, er stort sett bestemt av hvem som er størst. Lange næringskjeder produserer biomasse mindre effektivt enn korte kjeder. Når høyere organismer spiser planter, snakker vi om beiting på trofisk[1)] nivå nr. 1. Innenfor jordbruk kan mennesket som vegetarianer lett livberge seg på laveste trofisk nivå: planter og røtter som skapes direkte gjennom fotosyntese. Det er ikke like attraktivt for mennesker å "beite" på det *marine* primærnivået. Tang og tare spises det jo mye av i Østen, men flagellatsuppe[1)] høres ikke særlig innbydende ut. Dyreplankton-suppe[2)] kokt på raudåte, smaker derimot nydelig.

Når vi mennesker spiser rovfisk som torsk og laks, beiter vi på trofisk nivå 4 og/eller 5. Sammenligner vi med næringskjeden på land, blir dette som å ernære seg ved å spise ulv. Da ville det ikke blitt mulig å ernære særlig mange. De lange næringskjedene i havet innebærer nemlig – som vi har sett – store energitap.

1) Flagellat = encellet organisme som svømmer ved hjelp av svingtråder (flageller).

Næringskjeder i havet

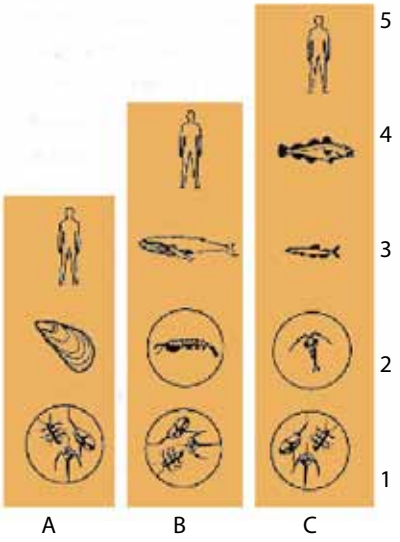
Som vi har nevnt tidligere, er marine planter primærprodusentene av organisk materiale i havet. Mesteparten består av encellede organismer kalt planteplankton eller planktonalger. Disse spises av dyreplankton. Dyreplankton eller zooplankton er en samlebetegnelse på mange ulike virvelløse dyr som stort sett finnes i de frie vannmassene. De fleste er små og knapt synlige. Noen av artene (som krill) er rovdyr og beiter på andre dyr, mens andre (som raudåte) har planktonalger som hovedføde. En av de største dyreplanktonartene er maneter, et nesledyr, som spiser plankton og små partikler. Den spiser også småfisk. De finnes i store mengder langs kysten, og terskelfjorder viser seg å være et eldorado for maneter.

Muslinger (som blåskjell) er skalldyr som spiser planteplankton de filtrerer fra havvannet. Mennesket spiser i enkelte områder tang og tare, på første trofiske nivå. Skjell er imidlertid det laveste nivået vi har tradisjoner for å utnytte i vårt land, og dette gir den korteste marine næringskjeden vi i praksis benytter oss av. På verdensbasis er muslinger derimot en nokså betydelig ressurs. Figuren til høyre viser tre enkle næringskjeder.

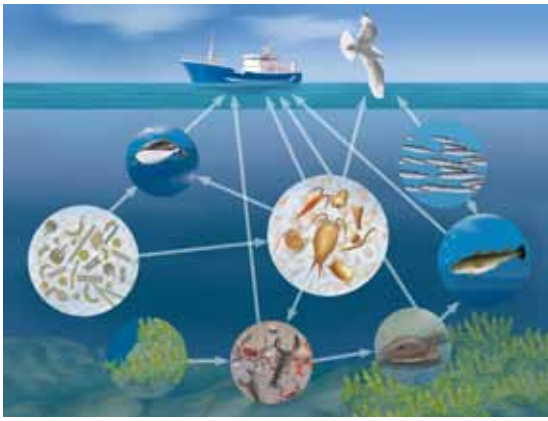
Robuste næringsnett i norsk farvann. Slike enkle næringskjeder er sårbare. Hvis ett av leddene skulle falle bort på grunn av sykdom, overfiske eller andre forhold, blir det krise på høyere nivå. I norske farvann har vi stort sett ganske komplekse næringsnett, som vist nedenfor. Disse er svært robuste og bidrar til større stabilitet. Det er spesielt i demersale (bunn) økosystemer vi finner kompliserte næringsnett.

Raudåten er en interessant ressurs. Det er i praksis mulig å fange raudåte og krill. Den årlige produksjonen av raudåte i norske farvann er av våre havforskere anslått til om lag 150 millioner tonn, og noe tilsvarende for krill. Raudåte – som hører til på det andre trofiske nivå – er en av flere viktige motorer i energitransporten. Den er viktig som mat for planktonspisende fisk som lodde og sild, samt som føde til torsken i dens første leveår. Det virker svært interessant å kunne utnytte disse ressursene i havbrukssammenheng.

I motsetning til vill laks og vill torsk, som trenger ti kg mat fra pelagisk fisk for å legge på seg én kg, trenger oppdrettsfisk fire kg naturlig fôr for å øke vekten med én kg. For å produsere ti kg har den pelagiske fisken spist 100 kg raudåte. Fôres oppdrettsfisk direkte med raudåte, trengs bare fire kg for å produsere én kg fisk. En slik kortslutning av næringskjeden kan ha et stort potensial for produksjonen av fôr, men i første omgang maner havforskerne til forsiktighet, fordi raudåte er den viktigste maten for en rekke planktoniske og svømmende organismer, slik som torskeyngel, og fordi en foreløpig ikke har full oversikt over konsekvensene av et fiske på disse artene. I Antarktis er det imidlertid åpnet for et betydelig fiske av krill til liknende formål.



Tre næringskjeder med ulik lengde og dermed ulik effektivitet
Hvis mennesker kunne tenkt seg å leve hovedsakelig på innmat fra skjell (næringskjede A), ville det gitt en vesentlig mer effektiv næringskjede enn en som baserte seg på for eksempel torsk (næringskjede C). To trofiske nivåer med store tap av næringsenergi ville da vært unngått.



Næringsnett
I mange økosystemer ligner forholdene mer på næringsnett enn næringskjeder. Dette gjelder for eksempel for norske farvann.

Bærekraftig utnyttelse av marine ressurser

Bærekraftig utnyttelse av marine ressurser

Norge har ansvaret for å forvalte noen av verdens mest produktive havområder, 7-8 ganger større enn fastlands-Norge. For å kunne forstå utfordringene dette innebærer, trenger vi innsikt i grunnleggende prosesser knyttet til utviklingen av primær- og sekundærprodusenter og fiskebestandene. Verdens fiskebestander trues av overfiske, og enkelte steder er viktige bestander i ferd med å bli borte. Verdens største bestand av torsk på bankene utenfor Newfoundland er nesten helt forsvunnet, trolig på grunn av overfiske. Fangstforbud siden 1992 har ikke bidratt til økning av bestanden, som nå er på noen få prosent av tidligere størrelse.

Ned og opp for sildefisket. I 1960 - årene ble den enormt store norske sildebestanden utfisket. Ny teknologi kombinert med manglende kunnskap om forholdene i havet førte til et massivt overfiske. Fangstene gikk på få år ned fra over en million tonn i året til ingen ting. Ny teknologi som ekkolodd, sonar og utvikling av matematiske modeller, ga imidlertid også havforskerne nye verktøy som gav bedre innsikt i forholdene i havet. Det tok tretti år å bygge bestanden opp igjen slik at sildefisket kunne gjenopptas. I 2010 var de fleste norske fiskebestander i god forfatning.

Biologiske forhold ved fiskebestander

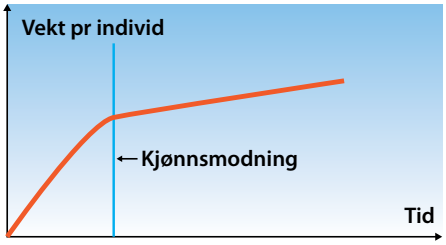
Vi har sett at de enkelte fiskeartene avhenger av hverandre i næringskjedene, og at overfiske i en bestand derfor kan påvirke resten av økosystemet. Det er ikke lett å ha oversikten over fødsel, død og hvordan fisk formerer seg, når vi ikke kan se noe til den før vi drar den over ripa. Et av de viktigste målene for fiskeridirektøren, som har ansvaret for fiskeriforvaltningen, er å oppnå størst mulig utbytte fra fiskebestandene. Samtidig må han sørge for at gytebestanden er stor nok til å sikre nye generasjoner av småfisk. Havforskningsinstituttet er svært viktig i denne sammenheng, nettopp fordi det er nødvendig å ha innsikt i de biologiske prosessene i våre fiskebestander.

Gyting. Gyting foregår på vidt forskjellige måter. De ulike artene har ulike strategier. Mens laksen gyter i elvene, og graver noen få og store egg og melke ned i elvegrusen for å sikre befruktning og overlevelse, så gyter hann- og hunntorsken samtidig i store stimer i åpent hav og håper det beste. Hver hunntorsk legger millioner av egg. (ca. 1 million per kg kroppsvekt). I motsetning til lakserogna er det en svært liten del av torskeeggene som blir befruktet

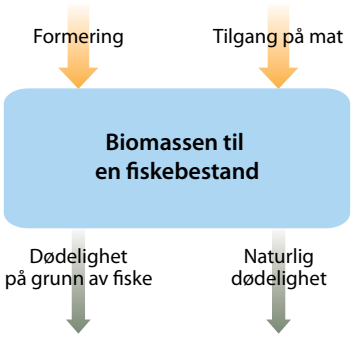
Torskeeggene og yngelen er svært avhengige av forholdene i naturen for å overleve. Antallet overlevende varierer sterkt fra år til år, avhengig av vær og temperaturforhold som påvirker algeproduksjon og tilgang på mat. Torsken gyter over en lang periode, trolig for å sikre overlevelse. Sild og lodde gyter på bunnen, mens egg og yngel fra sei og makrell lever pelagisk. Felles for mange av de viktigste bestandene er at egg og/ eller yngel transporteres nordover til oppvekstområdene av kyststrømmen, samtidig som oppblomstringen av raudåte også flytter seg nordover. På dette viset sørger naturen for at fiskelarver og yngel har god tilgang på mat mens de driver nordover.

Gytetiden er en stor påkjenning for både hunn- og hannfisken, og hos enkelte arter, f.eks lodde, dør hunnene og en stor del av hannene etter gytingen.

I oppvekstområdene vokser yngelen raskt. Fiskevekten øker raskest før fisken blir kjønnsmoden (se figur nedenfor), og det er ikke lurt å fange småfisk før den får formert seg. Dette er den perioden vekten øker mest i forhold til hvor mye den spiser. Derfor prøver en å unngå å fange småfisk, for eksempel ved å sette krav til maskevidde i garn, tråd og teiner, og ved å stenge fiskefelt hvis det er mye småfisk til stede.



Vektøkning av fisk før og etter kjønnsmodning



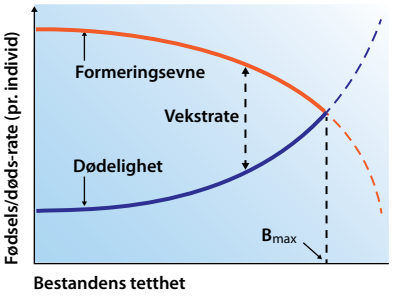
Faktorer som bestemmer utviklingen av den totale biomassen til en fiskebestand

Biomassen av en fiskebestand avhenger av balansen mellom de fire faktorene vist i figur til høyre. Dødelighet og formering avhenger imidlertid også av konkurranse om maten.

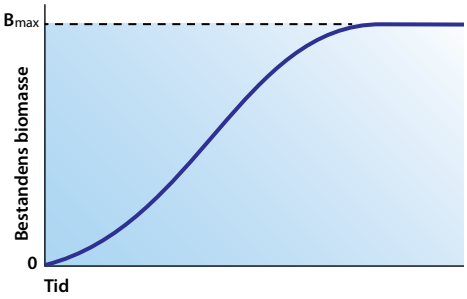
Maksimalt bærekraftig utbytte som kan hentes ut av en fiskebestand.

Denne kan bestemmes som det framgår av prinsippskissene nedenfor, fra [11.8].

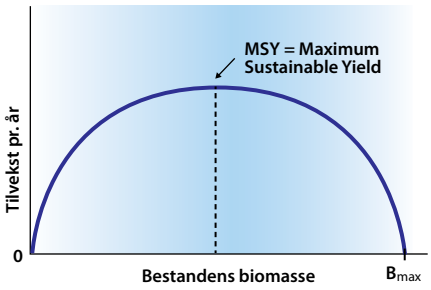
a)



b)



c)



Figur a *viser grafer for formering og dødelighet (uten fangst) pr. individ i en fiskebestand, som funksjon av bestandens tetthet. Grafenes forløp skyldes konsekvenser av at økende tetthet gir økt konkurranse om mat og plass, samt økt kannibalisme og sykdom. Stiplet linje viser den maksimale størrelsen som bestanden selv ville regulert seg inn på dersom det ikke ble fisket på den. Da er årlig tilvekst lik null (tilgang på nye individer tilsvarer dødelig-heten).*

Figur b *viser hvordan bestanden ville vokst som funksjon av tiden fram til den når sin maksimale verdi (B_{max}), forutsatt at det ikke foregår fiske på bestanden. Til å begynne med vil bestanden øke sakte fordi den er liten. Etter hvert vokser den raskere. Til slutt flater bestanden ut, fordi stor tetthet gir konsekvenser som beskrevet under figur a.*

Figur c *viser hvor* ***fort*** *tilveksten skjer i bestandens biomasse. Det gunstigste er å fiske på bestanden slik at den holder seg på en størrelse hvor tilveksten pr. år har sitt maksimum,og altså høste denne maksimale tilveksten hvert år. Denne fangsten kaller vi det maksimale, bærekraftige utbyttet (maximum sustainable yield).*

Arktisk marin biologi

Foto: Geir Johnsen

Ishavstaren Laminaria solidungula *trenger tre år for å fullføre en livssyklus. Denne arten gror i mørket og er tilpasset et liv under ekstremte lysmiljøbetingelser.*

Foto: Geir Johnsen

Fjernstyrt undervannsfarkost under havisen i nordpolbassenget.

Foto: Geir Johnsen

Utdanning av framtidens generasjoner av havforskere i Arktis. *Universitetsenteret på Svalbard (UNIS) har flere studenter ved NTNU hvert år. Disse får «hands on» utdanning i havisen nord for Svalbard.*

Allerede i kapittel 0, sidene 0-18/19, pekte vi på framtidige behov for bedre kartlegging og overvåking av havrommet og havmiljøet. Videre beskrev vi i kapittel 1, sidene 1-38/43, ny, avansert teknologi og tenkemåte som er aktuell for slik kartlegging.. Det er dette vi nå ytterligere skal begrunne ytterligere her på de siste sidene. Disse handler om arktisk marin biologi, men du bør generelt også lese mer om både livet i havet foran i kapittel 11 og om forholdene i Barentshavet på side 1-35.

Marine nordområder

Reproduksjon også i polarnatten. Havområdene rundt Svalbard, Barentshavet og nordpolbassenget er et økosystem preget av kalde vannmasser, havis og stor årstidsvariasjon i lysmiljø (lysintensitet, fargesammensetning og daglengde). Dette området, fra Finnmarkskysten i sør til Nordpolen i nord, er karakterisert med polarnatt i vinterhalvåret og midnattssol i sommerhalvåret. Nyere forskning har vist at polarnatten (arktisk vinter), med stummende mørke, er sesong for masseforekomster av mange marine organismer, og at dette også er tid for reproduksjon.

Økt havovervåking/ kartlegging av habitater og organismer viktig. Med økende menneskelig aktivitet i nordområdene, er det svært viktig å ha kunnskap om hvordan økosystemet her fungerer. Vi må da ta i bruk ny teknologi for å kartlegge habitater og viktige organismer over store havområder. De marine naturressursene må overvåkes slik at Norge kan forvalte dem på en klok og bærekraftig måte.

Økt menneskelig aktivitet gir nye utfordringer. Minkende hvisutbredelse og tykkelse har dette ført til større menneskelig aktivitet i nordområdene med hensyn til olje- og gassleting, mineralutvinning på havbunn, fiskeriaktivitet, turisme samt nye transporter langs Sibirkysten (Nordøstpassasjen) og langs Canada og Alaska (Nordvestpassasjen). I tillegg har nå nye transportruter startet tvers over nordpolisen, med skip som kommer fra Asia via Nordpolen, og går langs Svalbard med kurs mot norskekysten og Europa. Dermed får også forurensning og redningsarbeid økt aktualitet i Arktis.

Kunnskapsbasert forvaltning. Når mange nasjoner nå begynner å bli ivrige i jakten på nye naturressurser og transportmønster i nordområdene, blir det spesielt viktig med kunnskapsbasert forvaltning for å ta kloke beslutninger i framtiden. Universitetene har derfor nå sterk fokus på utdanning av neste generasjons naturforskere og teknologer, slik at ressursene kan bli forvaltet og utnyttet på en forsvarlig måte.

Planktonalger, isalger og makroalger

Planktonalger – "sjøens gress". Matkilde for dyreplankton, som igjen spises av fisk og marine pattedyr. Planktonalgene er i hovedsak fotosyntetiske, og av denne grunn finner vi dem i øvre vannlag (0-100 m), hvor det er nok lys til å utføre fotosyntese. I sommerhalvåret kan det være mer enn 100 ganger større biomasse (antall celler) av planktonalger sammenlignet med vinteren. Om vinteren vil det være en stor del heterotrofe flagellater og små dyreplankton som holder liv i større dyreplankton som krill. Planktonalgene spises altså av dyreplankton som igjen spises av fisk, sel og hvaler.

Isalger under isen beites av tanglopper. Havisen kan deles inn i årsis (pakkis) og flerårsis. På undersiden av havisen er det i vår- og sommersesongen mikroskopiske isalger (isflora) som blir beitet av isfauna. Isalgene danner en biofilm som ofte domineres av algeklassen kiselalger (diatomeer). De mest kjente representantene for isfauna er isamfipoder (tanglopper). Disse lever på undersiden av isen og spiser isalger, dødt organisk materiale (detritus) og smådyr.

Makroalger, spesielt tilpasset polarnatten. Rundt Svalbard er det en tett tareskog på 3-30 meters dyp. Dess klarere vannmasser, dess lenger ned vil algene finnes. Distribusjon og tetthet av makroalger (grønne, brune og røde alger) er avhengig av havisskuring i de øverste 0-3 metere. Av denne grunn finner vi ikke flerårige tarearter på grunt vann, slik som langs norskekysten. Stort sett finner vi kun ettårige arter i fjæresona. Tareskogen er derimot frodig fra tre meter og dypere, så lenge det er lys nok og hard bunn, slik at algene kan feste seg med festeorganet sitt (hapter). Ingen makroalger har røtter; festeorganet er kun til å holde seg fast, og alle næringssalter blir tatt opp av hele algen (i motsetning til hos planter). De fleste tarearter gror i vintermørket og om våren, og er dermed spesielt tilpasset polarnatten.

Dyreplankton

Raudåte er en spesielt interessant ressurs. Dyreplanktonet i Arktis er dominert av hoppekreps (kopepoder), som er en særdeles viktig matressurs til større dyreplankton, fisk, sjøfugl sel og hval. Hoppekrepsslekten Calanus er den viktigste, og her har vi tre arter som er nøkkelarter i økosystemet. Disse heter *Calanus finmarchicus* (raudåte), *C. glacialis* (ishavsåte) og *C. hyperboreus* (feitåte). Raudåta er minst av disse, feitåta er størst og er ca. 20 ganger større enn raudåta. Feitåta er blant annet favorittmaten til alkekongen, en 180 grams alkefugl som spiser opptil 80 % av sin egen kroppsvekt hver dag i hekkesesongen for å fôre seg selv og ungene. Du kan lese litt mer om raudåte også på sidene 11-12/13.

Noen dyreplanktonarter har utviklet fantastiske metoder for å unngå å bli spist av sine predatorer. Hoppekrepsene og annet dyreplankton vandrer opp og ned i vannkolonnen hvert døgn (døgnmigrasjon), fra 200 m dyp om dagen og opp til overflaten om natten. Dette er for å unngå predatorer når disse kommer opp for å beite på planktonalger og mindre dyreplankton. Andre arter av dyreplankton kan produsere morild for å unnslippe predatorer. Morildorganismer (bioluminescens) er organismer som produserer eget lys av forskjellige farger. Disse kan brukes til forskjellige formål. Eksempler på bruksområder for morild kan være: forvirre og unnslippe predatorer, parringssignaler, kommunikasjon og varsling av at fare er på ferde.

Under nordpolisen og i Grønlandshavet oppdaget norske og amerikanske forskere for første gang i 2010 at det er en rekke morildorganismer som lyser opp i dypet i polarnatta. Her ble autonome undervannsroboter (AUV) med morildsensorer brukt til å finne forskjellig "morildplankton" på forskjelige dyp. Hvordan disse organismene kan følge en døgnrytme i mørketiden, er foreløpig et mysterium som blant annet forskere fra NTNU for tiden prøver å løse.

Mikroskopiske mikroalger *er en viktig bestanddel av planktonet om våren og er den viktigste kilden for mat til dyreplankton som igjen spises av fisk, sjøfugl, sel og andre marine pattedyr.*

Parrende tanglopper ved Ryke Yse øya.

Snøkrabbe fanget i teine. *Denne arten er en ny art som kommer inn i Barentshavregionen.*

Foto: Geir Johnsen

Vanlig ulke på havbunnen

Foto: Geir Johnsen

***Storkobbe** er som ringsel avhengig av havis for beskyttelse mot predatorer, sikker ungepleie og for å få rask tilgang til mat.*

Foto: Geir Johnsen

***Isbjørn på 82 grader nord.** Stadig mindre og tynnere havis gjør det vanskeligere for isbjørn å finne sel.*

Fisk

Polartorsken er en nøkkelart. I Arktis er polartorsken spesielt viktig. Den fanges vanligvis i de åpne vannmasser, men også i nærheten av havis. Polartorsken blir sjelden større enn 20 cm, men finnes i stort antall og er svært næringsrik. Dette er en arktisk nøkkelart som er viktig matkilde for større fisk, sjøfugl, sel og hval. De største fiskeforekomstene finnes i Barentshavregionen og i de grunne farvannene rundt Svalbard. Her er middeldybden på 250 meter. Slike hav kalles ofte for sokkelhav.

Nord for Svalbard går sokkelkanten fra 250 meters dyp og ned til dypvannsbassengene i nordpolområdet, med dybder på 4-5000 meter. Her har det blitt utført liten forskning, men områdene står nå for tur til å bli utforsket i større grad.

Marine pattedyr

Selarter. En rekke pattedyrarter spiser større dyreplankton og fisk, spesielt polartorsk og lodde. De viktigste selartene er grønlandssel, klappmyss, ringsel og storkobbe. Mindre og tynnere sjøis er en trussel for disse artene, da pakkis og fjordis (fastis) er deres leveområder med hensyn til ungestell, beskyttelse og lett tilgang på mat.

Hvalarter. Av hvalarter har vi større forekomster av vågehval, som er den eneste utsatt for kommersiell fangst. Noen av de viktigste områdene for denne hvalfangsten er nordvest for Spitsbergen. Hvithval finnes typisk i grupper på 100—200 dyr og er et vanlig syn rundt Svalbard. Av de større hvalene som var nær utrydding, har en i de siste årene hatt flere årlige observasjoner av verdens største dyr – blåhvalen (30-35 meter, se side 11-6). Den nest største hvalarten er finnhval (28 meter). Denne har også økt i antall, og sommeren 2013 kunne en se mer enn 16 dyr samtidig i Isfjorden på Spitsbergen. Blåhval, finnhval, knølhval og vågehval vandrer mellom varmere havområder om vinteren og har sommerbeite ved polarfronten og iskanten.

Isbjørn. I de siste årene har minkende havisdekke og tykkelse ført til at isbjørnen begynner å få vanskeligheter med å jakte på selen som følger havisen. Spesielt ringsel (snadd), storkobbe, klappmyss og grønnlandssel trenger havis for å eksistere. Med minkende havis blir det mindre områder som er brukbare for sel og isbjørn, og disse dyrene er de første til å merke et varmere klima på jorden.

Framtidsperspektiver

Økosystemene påvirkes av miljøvariable som lysklima og temperaturvariasjoner, og vi ser effektene av dette ved at noen organismegrupper forsvinner, og andre kommer inn. Forståelse av denne populasjonsdynamikken er et stadig viktigere fokusområde. Forskjellige fagområder og kompetanse trengs nå for å utdanne neste generasjons teknologer, naturvitere og forvaltere, slik at vi kan ta vare på våre naturressurser på en bærekraftig måte.

Oppgaver

Oppgave 11.1

a) Hva er biologi?
b) Hva mener vi med en celle i biologien?
c) Hva er den viktigste forskjellen mellom bakterieceller, planteceller og dyreceller?
d) Cellene er bygget opp av fem hovedtyper "byggesteiner" (molekyler), som igjen er bygget opp av ni forskjellige grunnstoffer. Oppgi navnene på disse "byggesteinene" og grunnstoffene.
e) En av de viktigste karbohydratene er druesukker (glukose). Se side 11-7. Her er både såkalt strukturformel og såkalt sumformel (sum av antall av de forskjellige grunnstoffatomer som inngår i en kjemisk forbindelse) for et glukosemolekyl oppgitt. Bruk sumformelen til å beregne sammensetningen i masse-% av de tre grunnstoffene som inngår i et glukosemolekyl.
f) En av de viktigste enzymene (katalysatorene) i en plantecelle er klorofyll, som har sumformel $C_{38}H_{65}O_4N_4Mg$. Beregn sammensetningen i masse-% for klorofyll.

Oppgave 11.2

Det vises til side 11-7. Se også side 7-28
a) Beskriv fotosyntesen med ord. Hvorfor er denne en av de viktigste kjemiske prosessene for livet på jorda?
b) Bruk den kjemiske reaksjonsligningen til å bestemme hvor mye sukker som dannes pr. kg forbrukt vann i fotosyntesen.
c) Hvor mye oksygen dannes det pr. kg forbrukt vann?
d) Beskriv celleånding med ord. Hvorfor er dette en av de viktigste kjemiske prosessene for livet på jorda?
e) Hvor mye karbondioksid (CO_2) dannes ved "forbrenning" av 1 kg sukker i en celleåndingsprosess? Hvor mye utgjør dette i % av den mengde CO_2 som dannes ved forbrenning av 1 kg bensin i en bilmotor?

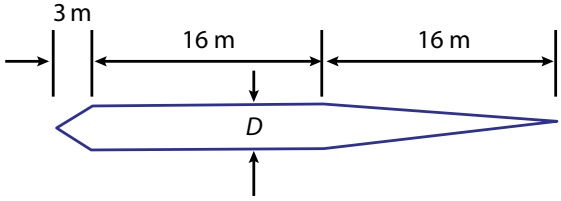
Oppgave 11.3

Lag en disposisjon, med stikkord, for et 15 min. kåseri om vann og hvorfor det nettopp er vann som er en avgjørende forutsetning for liv.

Oppgave 11.4

Du og to klassekamerater diskuterer hvor stor nyttig effekt musklene til en blåhval må yte for at den skal kunne svømme med en fart på 50 km/t, som er den største farten den kan oppnå (i en kort periode). Forslagene er: <100 kW, ca. 300 kW og >600 kW. Dere diskuterer også om hvalen kan kalles "hurtiggående" eller ikke. For å avgjøre hvem av dere som har mest rett, og for å få repetert deler av hovedkapittel 3 om motstand og framdrift, skal dere forsøke å gjøre en overslagsberegning av effektbehovet. Først må dere da forsøke å bestemme frikfriksjonsmotstand som hvalen har ved 50 km/t. Vi forutsetter at den svømmer i en dybde som gjør at det ikke danner seg bølger på vannets overflate. Videre skal det regnes med at den har lengde 35 m, masse 190 tonn og at den tilnærmet kan beskrives ved hjelp av to kjegler og en sylinder (se figuren).

Beregn:
a) Beregn hvalens fart i knop og m/s
b) Den diameter D som gjør at hvalen får en oppdrift som er lik dens tyngde
c) Hvalens overflate
d) Reynolds tall og Froudes tall ved en fart på 50 km/t. Hvor stor er hvalens maksimale hastighet regnet i knop? Marker hvalen som et punkt i figuren på side 3-19. Kan hvalen kalles "hurtiggående"?
e) Friksjonsmotstandstallet vha. ITTC-formel på side 3-10. For en tilnærmet sylindrisk form skal denne verdien økes ved å multiplisere med en såkalt formfaktors som i dette tilfellet kan settes lik 1,3
f) Friksjonsmotstanden (se side 3–11)
g) Effektbehov som svarer til friksjonsmotstanden
h) Hvilke feilkilder har vi i denne beregningen?
i) Hvorfor må hvalens muskler yte en effekt som er vesentlig større enn det beregnede effektbehovet?



Referanser

11.1 Olje- og energidepartementet / Oljedirektoratet:
Fakta: Norsk petroleumsverksemd 2009

11.2 Hanne S. Finstad, Jørgen Kolderup, Eva C Jørgensen:
Trigger 8, 9 og 10.Naturfag for 8., 9. og 10. klasse
N. W. Damm & Søn AS. 2006

11.3 Per Roar Ekeland, Odd-Ivar Johansen, Siri B. Strand, Odd Rygh,
Ann-Beate Hesenget: Tellus 8, 9 og 10. Naturfag for ungdomstrinnet.
H. Aschehaug & Co (W. Nygaard). 2008

11.4: Wikipedia, the free encyclopedia

11.5 Statistisk sentralbyrå: Statistisk årbok 2009 (www.ssb.no/aarbok)

11.6 Tor Brandt, Harald Brandt, Inger Johansen, Arvid Mostad:
Kjemi 3KJ. Grunnbok. H. Aschehoug & Co (W. Nygaard). 1998

11.7 Merethe Frøyland, Merete Hannisdal, John Haugan, Jørn Nyberg:
Eureka 8, 9 og 10. Naturfag for ungdomstrinnet. Gyldendal Norsk Forlag AS. 2006

11.8 Simon Jennings, Michel J Kaiser, John D. Reynolds:
Marine Fisheries Ecology. Blackwell Science Ltd. Oxford. 2001

Forfatter: Anders Endal

Fiskeri og havbruk

Havromsteknologi

Innhold

Innledning....2
Fiskeriene – en bærebjelke i det norske samfunnet gjennom århundrer....4
Havbruk - en ny bærebjelke, allerede viktig nå, superviktig i framtiden....8
Den komplette norske næringsklynge for sjømat. Fremtidig uvikling....10
Fiskeriteknologi....12
- Hvordan finne fisken?....12
- Hvordan fange fisken....14
- Den norske fiskeflåten....16
- Energiforbruk ved tråling....18
- CO_2e-utslipp fra fiskeriene....20
- Hydraulikksystemer for dekksmaskineri....22
- Kjøleprosesser. Kompresjonsarbeid og entalpi....24
- Bærekraft og framtidens fiskebåt....26

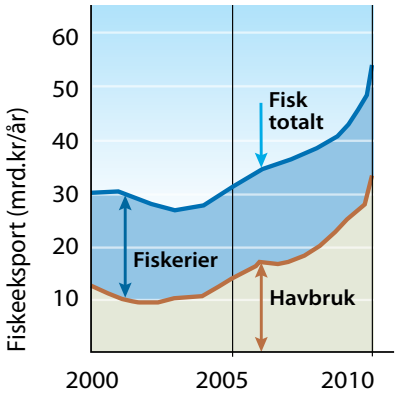
Havbruksteknologi....28
- Fôr, energi og CO_2e-utslipp....28
- Helse og velferd. Rømt fisk og økologiske effekter....30
- Merder og fôring....32
- Brønnbåter. Lasting og lossing....34

Oppgaver....36
Referanser....38

NTNU
Institutt for marin teknikk

12

Verdens befolkning øker sterkt. I 2010 var den på omkring sju milliarder, og den forventes å stige til bortimot ni milliarder i 2050. Menneskehetens største utfordringer er å skaffe nok mat, ferskvann og energi - uten å ødelegge miljøet.



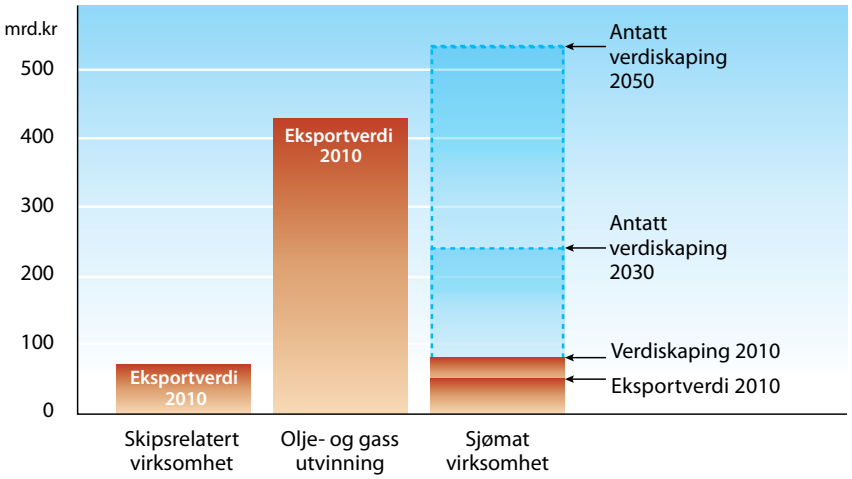
Eksportverdien av fisk økte med mer enn 70 % i perioden 2000-2010. Dette skyldtes først og fremst havbruksnæringen, som hadde en eventyrlig vekst. [12.4].

Norsk produksjon av sjømat av stor betydning i verden

Landarealene vil ikke gi nok mat i framtiden. Gjennom begynnelsen av 2000-tallet har vi sett at matsituasjonen begynner å bli prekær. Matlagrene i verden er sterkt redusert, samtidig som prisene øker. Verden mangler ferskvann og jord til å øke matproduksjonen. Etter hvert vil det også bli mangel på næringssalter og kunstgjødsel. I våre havområder finnes det både vann, areal og mye næringssalter. Dette gir oss store muligheter til å produsere både mat og biomasse for biodrivstoff i havet.

Verdens nest største eksportør av sjømat. Norsk sjømatproduksjon vokste dramatisk i 2010, og vi var da verdens nest største eksportør av sjømat etter Kina, som snart vil få problemer med sin egen matproduksjon. Nedenfor følger noen tall som viser omfanget av den norske sjømatproduksjonen.

- Norsk sjømateksport var i 2010 på 53 milliarder kroner. Av dette kom 33 mrd. fra havbruk og 20 mrd. fra fiskeri. Økningen var på hele ni milliarder kroner fra 2009.
- Det ble eksportert 2,7 millioner tonn sjømat. Det var en økning på 93 000 tonn sammenlignet med 2009.
- I 2010 ble det servert 37 millioner måltider norsk sjømat hver dag.
- Den totale fangstmengden i fiskeriene var 2,7 millioner tonn, produksjonen av laks og ørret var litt over 1 million tonn.



Eksportverdi 2010 for de tre største næringsklyngene i Norge. Alle er relatert til virksomheter i havet. Først på 4. plass kom en landbasert vareklynge, nemlig eksport av metaller. *Figuren viser også verdiskaping 2010 i sjømatklyngen og at denne i 2050 kan komme til å være viktigere enn olje/gass-virksomheten for landet vårt. Tall fra [12.1] og [12.4].*

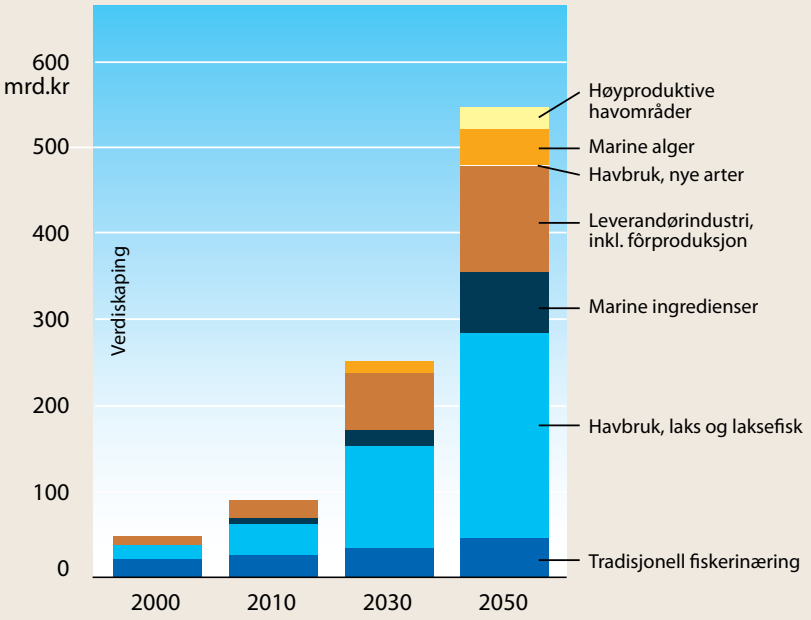
Fiskeri og havbruk

- Dette var da Norges raskest voksende næring, og den tredje største eksportnæringen, etter olje/gass- utvinningen og inntekter fra utenriks sjøfart (se figur på forrige side).
- Norsk fiskeri- og havbruksteknologi er i verdenstoppen, og den eksporteres til store deler av verden.
- Norges tilnærming til forvaltningen av våre fiskeressurser har også gitt svært gode resultater. I 2009 var alle våre viktige fiskebestander i god forfatning.

Enorm framtidig vekst av næringsklyngen for sjømat

Figuren nederst i venstre marg viser at eksporten av fisk økte kraftig i årene 2000-2010 (med gjennomsnittlig ca. 6 % årlig, og enda mer for laks og laksefisk). Eksperter regner med at en lignende vekst kan fortsette også i framtiden. I tillegg til tradisjonell fiskerinæring og havbruk kommer også blant annet en betydelig leverandørindustri (for både teknologisk utstyr og fôrproduksjon), produksjon av marine ingredienser (se side 12-11) og energi- og matproduksjon fra alger. Alt dette kan gi en eventyrlig framtidig vekst.

Ser vi langt nok inn i "krystallkula", kan næringsklyngen for sjømat bli av samme størrelsesorden som dagens olje/gassklynge, for eksempel målt i verdiskaping. Se forøvrig sidene 12-10/11



Framtidig utvikling av verdiskapingen i den norske næringsklyngen for sjømat, målt i milliarder kr. [12.1].

Antatt framtidig omsetning / verdiskaping i næringsklyngen for sjømat. *Kilde: [12.1].*
Baseres bl.a. på følgende utvikling:
- *vekst i tradisjonell sjømatproduksjon, særlig på grunn av fangst av nye arter på lavere nivåer i næringskjeden, samt bedre forvaltning og bedre utnyttelse av hver fisk.*
- *økt behov for mat på grunn av økningen av jordens befolkning fra sju til ni mrd i 2050*
- *økt kjøpekraft i nye, sterke økonomier, særlig Kina, Russland og India*
- *generell økende interesse for sunn mat*

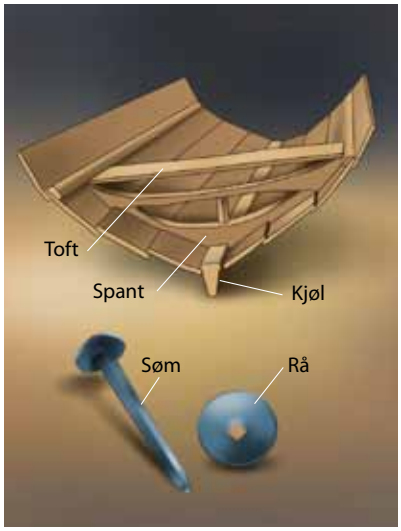
Følgende trusler kan påvirke den viste utviklingen:
- *kriger og konflikter*
- *mer dramatiske klimaendringer enn hittil antatt*
- *langvarig, global resesjon og økte handelsbarrierer*
- *reduksjon av kvaliteten på havmiljøet, f. eks ved forurensning*

MÅL

Etter å ha studert dette kapitlet skal du:
- Ha fått innblikk i de viktigste trekk fra utviklingen av fiskerier og havbruk gjennom tidene og næringens plass i det norske samfunnet
- Ha fått forståelse av hvordan høsting og dyrking av havet kan skje på en bærekraftig måte
- Ha fått innblikk i fiskeri- og fangstteknologi
- Ha fått innblikk i havbruksteknologi

Fiskeriene – en bærebjelke i det norske samfunnet gjennom århundrer

Tørrfisken betydde kolossalt mye for Norge fra de tidligste tider



Klinkbygging av båt
Klinkbygde båter bygges som en skallkonstruksjon: Først lages kjølen, og bordkledningen bygges opp fra denne. Hvert bord legges med overlapp på bordet rett under. Det bores hull gjennom begge bordene i overlappen. En søm slås gjennom fra undersiden, en "rå" plasseres, og naglen klippes og klinkes. Klinkingen presser bordene sammen så "huden" blir tett. Når skallet er ferdig, settes spantene inn. Disse blir ikke festet til kjølen. Båtene blir lette, sterke og elastiske. Også vikingskipene ble bygget på denne måten.

Tidlige tider: Fisk og båt betydde nesten alt

Havområdene utenfor våre kyster hører til de biologisk mest produktive i verden, og er svært rike på næringsstoffer. Da isen begynte å trekke seg tilbake for 12—15 000 år siden, var havet utenfor et overflødighetshorn med store mengder tang og tare, skalldyr, fisk, sel og hval. De første innvandrerne kom til våre kystområder for ca. 11 000 år siden. Dette var trolig jegerfolk som kom fra sør, på jakt etter mat. I nord kom det etter hvert også innvandring fra øst.

Arkeologene har funnet tallrike bosetninger fra denne tiden. Disse blir funnet 30-40 meter over dagens havnivå. Sanking av skjell, fiske og fangst av sjøpattedyr, samt reinjakt, ble senere kombinert med fe- og åkerbruk. Et variert næringsgrunnlag har vært ryggraden i kystens næringsliv helt fra de eldste tider.

Båten. Helleristninger fra forhistorisk tid viser at båten var en viktig del av kystfolkets tilværelse, og var også en del av den religiøse kulturen. Båtbyggingskunsten ble en viktig del av kystkulturen. De første båtene ser ut til å ha vært stokkbåter og båter av skinn, "sydd" sammen over en treramme (se side 9–4). I jernalderen ble klinkbygging etter hvert den viktigste byggemetoden (se figur). Vikingskipene var de største som ble bygget på denne måten. Se også sidene 3-36/37 og 9-5.

Tørrfisk viktigste eksportvare i århundrer. I over tusen år har kommersielt fiske og fangst samt handel med produkter fra havet vært en viktig drivkraft i endringene i kystens næringsliv og bosetning. Tørrfisk var en viktig del av provianten på lange vikingferder. Fisk og tømmer var de viktigste eksportvarene i eldre tid og grunnlaget for en omfattende handelsvirksomhet langs kysten. I løpet av 1000-tallet begynte fisk å bli omsatt som handelsvare innenlands fra Nord-Norge og sørover, og rundt 1100-tallet startet den første organiserte norske eksporten av tørket torsk og sild til England. På 1200-tallet etablerte hanseatene seg i Bergen, og fra siste halvdel av 1300-tallet overtok de kontrollen over tørrfiskhandelen med Nord-Norge. Tørrfisk var vår viktigste eksportvare gjennom mange århundrer, godt hjulpet av den katolske kirkes påbud om å spise fisk på fredager. Den omfattende eksporten knyttet Norge i sterkere grad til kontinentet.

Hensiktsmessig geografi. Farleiene langs kysten ble kalt Norvegr, "veien mot nord". Landet innenfor var gjennomskåret av fjordsystemer. Dette ga de fleste innbyggerne langs kysten direkte adgang til sjøen og havet; - den viktigste ferdselsåren både lokalt og globalt. Folket hadde muligheter til å utnytte ressursene både på land og sjø. Fjordene ga tilgang til skogene inne i landet. Langs hele kysten ble det bygget båter og skip inne i fjordene, både for fiskeri og sjøfart.

1800-tallet: Fiskeeksport av meget stor betydning

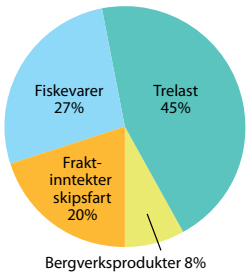
Båt og redskap. Teknologien som ble benyttet i fisket, var hovedsakelig garn, håndsnøre og line, (såkalte passive redskaper). Fisket ble drevet fra åpne, klinkbygde fartøyer, som var direkte etterkommere etter vikingskipene, Disse hadde opptil seks årepar, og og utstyr og rigg av ulike typer. De lette og sterke klinkbygde fartøyene egnet seg godt langs våre værharde kyster, hvor båtene ofte måtte dras på land i dårlig vær. Ulike typer av råseil ble først benyttet. Dette var et firkantet seil som var festet til en rå, det vil si en bom som satt på tvers av masta og som holdt seilet oppe. Etter hvert ble andre typer rigg tatt i bruk.

"Fiskeri-Norge" utvides. De største ressursene fantes nordpå, og rundt 1800-tallet begynte sesongfisket i Lofoten og Finnmark å få betydelig størrelse. Folk reiste i åpne båter helt fra Vestlandet for å delta på sesongfisket etter skrei i Lofoten og vårtorskefisket i Finnmark. Skreien er en gytende torsk fra Barentshavet som vandrer inn på fiskebankene sørover langs kysten om vinteren og våren. På Sørvestlandet hadde man et rikt vårsildefiske, og spesielt på begynnelsen av 1800-tallet ga dette fisket eventyrlige fangster.

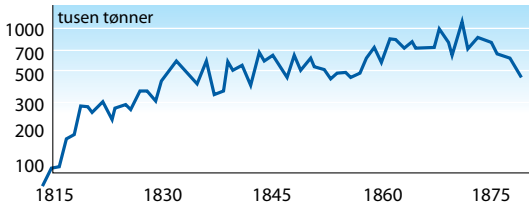
Eksport av fiskeprodukter fikk en utrolig vekst på 1800-tallet, og fiskenæringen ble landets nest største gjennom hele århundret.

Dette skyldtes både økte fiskeforekomster og økte behov i Europa. Eksportverdien utgjorde ca. 27 % av samlet eksportverdi i begynnelsen av århundret, og økte til ca. 40 % mot slutten. Det var bare trelasteksporten som var størrre. Antall fiskere som deltok i sesongfiskeriene var så mye som 90 000 i 1860. Dette er et formidabelt antall når vi ser det i forhold til landets befolkning. På denne tiden bodde det totalt ca. 500 000 mennesker langs kysten, og litt færre i innlandet. Mange bønder deltok og landet ble langt på vei tømt for voksne mannfolk i periodene med sesongfiskerier.

a



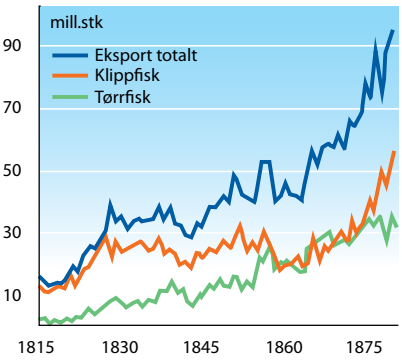
b



Fiskeri, et risikabelt yrke. Historien forteller om mange store ulykker på havet. I 1625 ble hele den mannlige befolkningen på øya Grip borte, og på "den galne mandagen" 11. mars 1821 omkom over 300 fiskere på Vestlandet i løpet av få timer. De mest kjente ulykker er kanskje Lofotstormen i 1849 med ca. 500 omkomne, og Titranulykken i 1899 med 140 omkomne. Dette var bakgrunnen for at "Redningsselskapet" ble stiftet i 1891 som et privat selskap. I dag får selskapet tilskudd fra staten. De første rednngsskøytene var seilskøyter med dekk, langt mer robuste enn de åpne fiskebåtene. Den berømte konstruktøren Colin Archer var opphavsmannen til disse fartøyene, som har vist seg å tåle det meste, jf. side 2-5.

Fiskebåt med råseil (Nordlandsbåt) var mye brukt. *Foto: Leif Wallann*

c



Eksporten av fisk var av enorm betydning for Norge på 1800-tallet. *Fra [12.3]*

a. Norges eksportinntekter i 1805. Fiskevareeksportens andel av totalen (som var på ca.10 mill. riksdaler) utgjorde hele 27 %.
b. Eksport av saltsild 1815—80
c. Eksport av tørr- og klippfisk

Eksporten av fiskeprodukter i årene 1866—75 lå på vel 40 % av vareutførselens samlede verdi i Norge. Gjennom mesteparten av 1800-årene lå altså eksportverdien av fisk på 30-40 % av totalen. I 1860-årene deltok anslagsvis 90 000 fiskere i de store sesongfiskeriene. Dette var både folk fra nær- og fjernområder. De fleste rodde i åpne båter til fiskefelt/fiskevær. Les mer i Johan Boyers udødelige roman "Den siste viking".

Litt om glødehodemotoren, som i sin tid fikk meget stor betydning for fiskeflåten, og var spiren til utviking av mekanisk industri langs kysten.

En glødehodemotor ligner på en dieselmotor, men har vesentlig mindre kompresjon. Kompresjonstemperaturen blir ikke høy nok til at brenslet selvtenner når det sprøytes inn. Det er derfor nødvendig med tenningshjelp, som oppnås ved hjelp av et ukjølt, glødende legeme i forbrenningsrommet. De lave trykkene i sylinderen ga en lett konstruksjon.

Motoren var også enklere å produsere fordi den arbeidet etter totaktsprinsippet og var veivkassespylt. Men brenselsforbruket ble høyere enn for en dieselmotor. Dette medførte store diskusjoner langs hele kysten. Hva skulle det legges størst vekt på? En lettbygd og lett produserbar motor, eller en motor som var billig i drift? I første omgang "vant" glødehodemotoren, men den ble etter hvert utkonkurrert av dieselmotorene. Titusener av glødehodemotorer hadde imidlertid allerede gjort en formidabel jobb på fiskefeltene.

De hadde dessuten bidratt til etablering av en rekke mekaniske verksteder, og på denne måten blitt en spire til alle de tre superviktige næringsklyngene som vi i dag har i Norge. I alle disse er utstyrsindustri og verft av sentral betydning (se figurer på sidene 9–21, 10–48 og 12–10).

Første halvdel av 1900-tallet: Motorisering, og nye fangstmetoder

Krise og modernisering. På slutten av 1800-tallet begynte fiskerinæringen å bli overbefolket, og prisene gikk ned, man kan snakke om en krise for fiskeriene. Krisen bidro imidlertid til å drive fram en teknologisk endring i fiskeflåten. Større, dekkede båter som lettere kunne følge innsigene til silda når den flyttet på seg, ble utviklet. Seilskøyter med dekk og med robåter om bord, gjorde det mulig å drive linefiske på kystbankene, som ble kartlagt på slutten av 1800-tallet. De første dampbåtene bidro sterkt til å finne nye fiskebanker og nye fiskeforekomster. Dette la grunnlaget for en kraftig vekst i klippfisknæringen som var blitt startet på Nordmøre. Kristiansund ble klippfiskby nr. én.

Motorisering. Motoriseringen av fiskeflåten begynte omkring år 1900. Den første, norske motorfabrikken ble igangsatt i 1901, og etter hvert ble langt over hundre motorfabrikker etablert - fra Fredrikstad til Tromsø. Disse etableringene fikk stor betydning for utviklingen av verkstedindustrien langs kysten. På slutten av 1930-tallet var 28 000 av disse motorene, som var såkalte glødehodemotorer, installert i fiskeflåten. Motorene var billige og kunne lages med relativ enkel produksjonsteknologi. De større fiskedampskipene krevde derimot betydelig kapital, og ble oftest anskaffet av velstående kjøpmenn. De rimelige motorene kunne installeres i tradisjonelle, åpne fartøyer, og ga fiskerne muligheter til å øke fangst og inntjening. Damprederiene forsvant, og motorene la grunnlaget for at de *aktive fiskerne* etter hvert overtok hegemoniet blant rederne. Senere kom det lover som fastslo at bare aktive fiskere hadde rett til å eie fiskefartøy.

Nye, effektive fangstmetoder. Garnlenker og snurpenot kom mer i i bruk. Det ble etter hvert utviklet garnspill og vinsjer med mekanisk drift fra de nye motorene. Dette reduserte blodslitet i fiskeriene i betydelig. Snurpenot er en stor not eller fiskenett som settes rundt en fiskestim og som snøres sammen til en pose under og rundt stimen. En snurper hadde to notbåter som hang i daviter akterut. En basbåt ble brukt til å lokalisere sildestimer. Når en stim var funnet, ble notbåtene satt på vannet, med halvparten av nota i hver båt. Nota ble deretter satt i to halvsirkler, og når båtene møttes, ble nota snurpet sammen i bunnen. Snurperen kunne så legge seg inntil nota, som ble trukket opp med håndmakt, og silda ble tatt om bord med håv.

Andre verdenskrig. Verdenskrigen førte til store problemer for fiskeriene. Det ble store begrensninger i fangstmulighetene. De vanlige markedene brøt sammen, og det manglet drivstoff og reservedeler. Minefare og strenge kvoter førte til reduksjon av fangstmulighetene.

Fiskerienes grunnlov. Et sentralt politisk spørsmål i 1930-årene var konflikten mellom den fiskereide kystflåten og den framvoksende damptrålerflåten, og da særlig spørsmålet om eiendomsrett til fiskefartøyer. I 1932 ble det fastsatt ved lov at fiske med trål kun var tillatt etter tildelt konsesjon, med hovedregel at bare *aktive fiskere* kunne få slik konsesjon. I 1947 ble det også lovfestet at kun aktive fiskere kunne ha eiendomsrett til fiskefartøy. Disse lovene har fiskerne siden betaktet som bærebjelker i fiskeripolitikken.

Annen halvdel av 1900-tallet: enorm effektivisering

Norsk fiskeriteknologi blir verdensledende. Den andre verdenskrigen hadde ført til en rask teknologiutvikling innen elektronikk, navigasjons- og sonarteknologi. I 1960-årene skjedde det en rekke viktige begivenheter i fiskeflåten. Den første hekktråleren og det første fabrikkskipet for filetproduksjon og frysing om bord ble konstruert og bygget i Norge, og de første ringnotbåtene med kraftblokk og tverrpropeller hadde suksess. Dette satte fart i profesjonaliseringen av fiskefartøykonstruksjon i Norge, og var starten på en eventyrlig effektivisering av de norske fiskeriene. Den første norskbygde hekktråleren "Hekktind" (1960) var den første fartøydesignen i Norge som ble optimalisert ved hjelp av datamaskin. Sammen med fabrikktråleren "Longva" (1963) ble det skapt et nytt teknologisk fundament for denne type fartøyer. Norsk fiskeriteknologi ble verdensledende og er det fortsatt. Se bildet side 12-16.

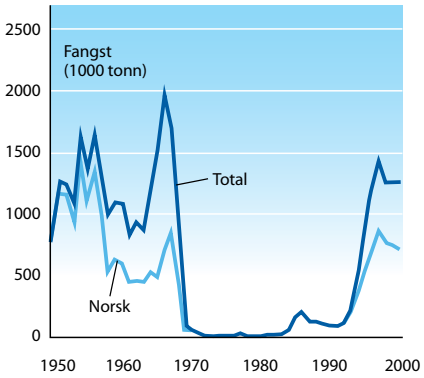
Fangstene økte dramatisk. Ekkolodd, kraftblokk og syntetiske materialer i not og trål muliggjorde bruk av kjempestore ringnøter og pelagiske tråler på åpent hav. Fabrikktrålerne kunne fiske på alle hav i måneder om gangen med filetproduksjon og frysing om bord.

Overfiske. Over hele verden førte dette til at man overskred grensene for hva fiskebestandene kunne tåle av beskatning. Overbeskatning førte til kriser for flere norske fiskebestander (se øverste figur). Innføring av fangstbegrensning og begrensning på adgangen til å drive fiske på 1970-tallet, var innledningen til en ny epoke i fiskeriene. Ressursforvaltning ble fra da av fundamentet for fiskerinæringen. Forskning på teknologi for beskyttelse av småfisk og overvåking av ressurser og fangster har gjort ressursforvaltningen effektiv og akseptert.

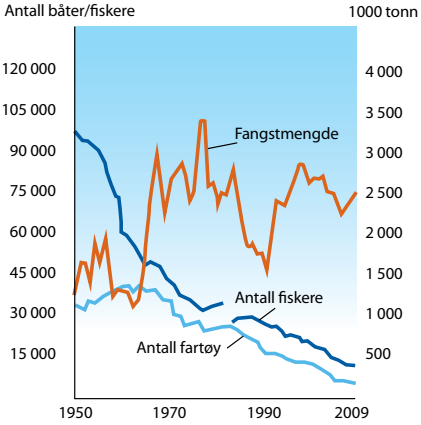
Kraftig økning i effektiviteten 1950-1965 (se midterste figur). I 1950 var antall fiskere ca.100 000 og fangstmengden ca. 1,3 mill. tonn. Flåten bestod av 120 dampskip, 12 600 dekkede motorfartøy og et stort antall åpne motorfartøy. I de neste femten årene ble antall fiskere halvert, mens antall fartøy økte fram til midten av 1960-tallet. Da var det ca. 39 000 registrerte fiskefartøy og ca. 50 000 fiskere. Fangstmengden var imidlertid økende og passerte 2 mill.tonn årlig.

Effektiviteten fortsetter å øke. Fisket i norske farvann har historisk sett variert kraftig. Overfiske og naturlig variasjon av bestander forklarer mye av dette. På slutten av 1980-tallet var bestandene av sild, lodde og torsk på det laveste nivå noen gang. Fangstkvotene ble kraftig redusert. Etter et lavmål i 1990 har den norske fangsten blitt nær doblet. I samme periode har både antall fiskere og fartøy blitt redusert med mer enn en tredel. I dag har 10 200 personer fiske som sitt hovedyrke, mens antallet i 1950 var over 68 000.

Utviklingen 2000-2010. Det vises til figur på neste side. Fangstmengden i fiskeriene i denne tiårsperioden varierte rundt 2,5 mill. tonn, som er en bærekraftig mengde. Førstehåndsverdien var i 2010 på ca.16 mrd. kr, med en verdiskaping på ca. 27 mrd. kr (se figur på side 12-3).



Fangstmengde sild 1950-2000
Kollaps av den atlantoskandiske sildestammen pga. overfiske i 1960-årene. Totalforbud mot sildefiske ble innført i 1972. Det tok 30 år å gjenoppbygge bestanden.



Utviklingen i antall fiskebåter,, antall fiskere og fangstmengde 1950-2009. *Fra [12.4]*
Kraftig økning i effektivitet (både i mengde per fisker og per båt):

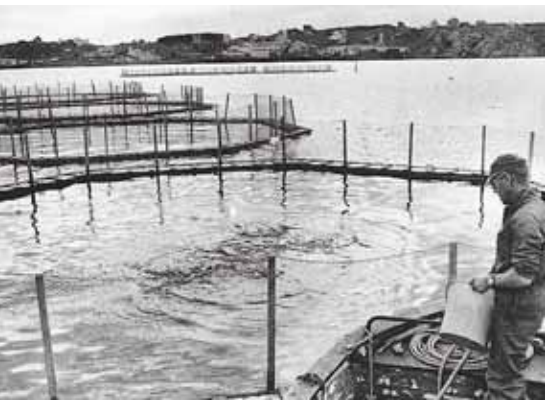
	Fangstmengde i tonn	
	per fisker	*per båt*
1950	*12*	*40*
1980	*60*	*90*
2000	*120*	*200*
2009	*200*	*360*

Havbruk – en ny bærebjelke i samfunnet. Allerede viktig nå superviktig i framtiden

Historisk bakgrunn

Fiskeoppdrett i ferskvann har lange tradisjoner, som i Østen går flere tusen år tilbake. Ved Nidarosdomen er det gjort arkeologiske funn som tyder på at det ble drevet kultivering av karpe der på 1500-tallet. Dette var ganske vanlig lenger sør i Europa på den tiden. Fiskeoppdrett i sjøvann har foregått i mindre enn 100 år og begynte i Japan.

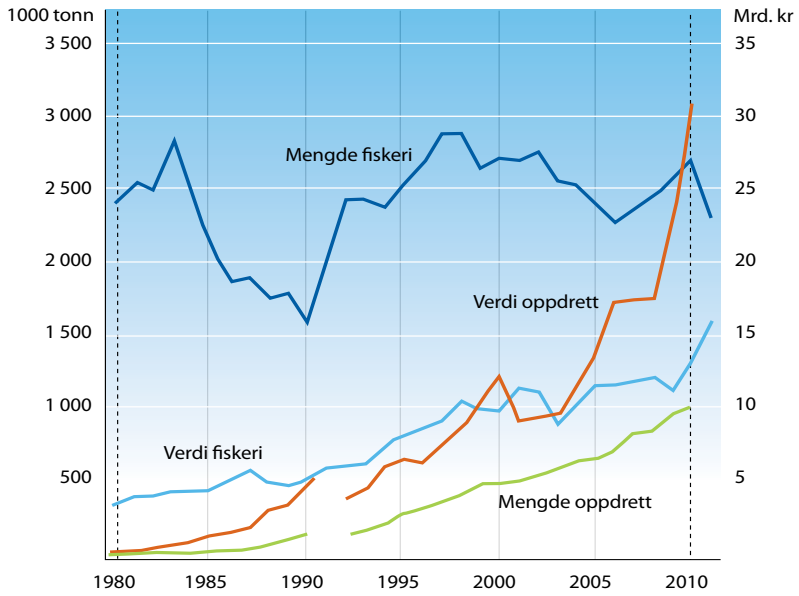
I Norge kom de første klekkeriene for laksefisk tidlig på 1800-tallet. Dette ble gjort for utsetting av yngel i vassdrag for å hjelpe til med bestanden for sportsfiske. Senere ble det innført regnbueørret fra Danmark for produksjon av fisk til konsum. De første forsøkene med oppdrett i sjøvann startet i 1950-årene, da det viste seg at regnbueørret etter en tilvenningsperiode kunne oppdrettes i sjøvann. Fordelen med sjøvann var at vintertemperaturen var høyere, og at drifts- og anleggskostnader var langt lavere enn for dammer på land. De første årene var oppdrett med laksefisk basert på regnbueørret.



Grøntvedt-merder 1973

Oppdrett av laks startet på Hitra. Gjennombruddet med laks i oppdrett kom med vellykkede forsøk på Hitra i 1971. Etter dette har utviklingen innenfor oppdrett av laksefisk gått med rekordfart, basert på forskning og praktisk erfaring, stadig bedre tekniske løsninger på produksjonsanlegg (både i sjøen og på land), bedre fôrutnyttelse, vekst og kvalitet på produktene og bedre markedsføring.

Enestående forhold langs norskekysten. Produksjonen av laksefisk i oppdrett er i dag basert på merder i sjøen. Norges lange kyst med strømrike fjorder, skjærgård og sund byr på ekstremt gode forhold for oppdrett av laks og regnbueørret. Fra 1960-årene til 2009, har produksjonen av laksefisk økt fra nærmest null til omtrent en mill. tonn. Dette tilsvarer fire ganger den gjennomsnittlige årsfangsten av torsk. Havbruksnæringen er blitt en betydelig næring langs kysten og er en faktor av vesentlig betydning for bosetningen i kystområdene.

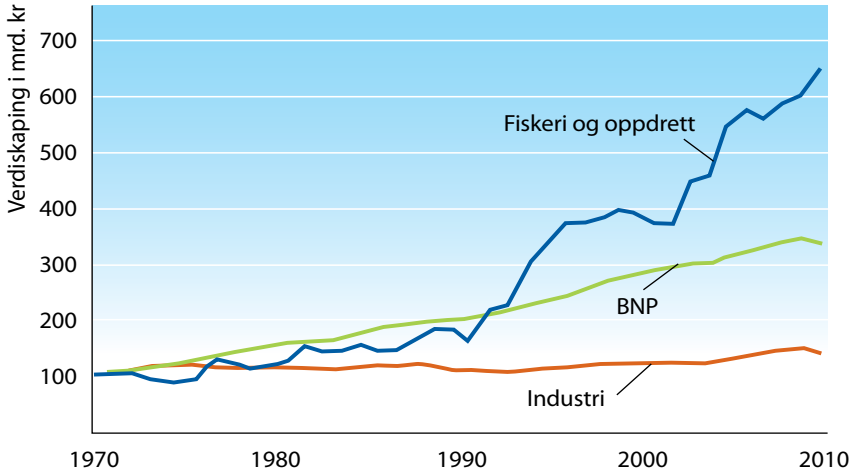


Mengde og verdi i fiskeri og oppdrett 1980-2010.

Prisene på laksefisk gjør at fisk fra oppdrett i 2010 har passert fisk fra fangst. Fra [12.4]

Fantastisk utvikling av havbruk i perioden 2000 - 2010

Norges raskest voksende næring. Grafene nederst på forrige side viser at mengden laks/laksefisk fra oppdrett i perioden 2000—2010 økte fra omtrent 0,5 til 1,0 mill. tonn. Oppdrettsmengden ble altså fordoblet på ti år, noe som svarer til en årlig vekst på gjennomsnittlig 8 %. Ser vi på hele næringen, og altså inkluderer fiskeriene og utstyrsindustri/ fôrproduksjon, økte også verdiskapingen til det dobbelte.



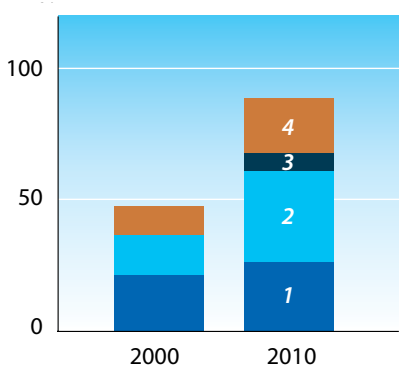
Vekst i verdiskaping i Norge, i industrien generelt og i fiskeri og fiskeoppdrett. *Fra [12.1] Siden 1990 har fiskeri / fiskeoppdrett hatt en suveren vekst sammenlignet med resten av landet.*

Vi har allerede på sidene 12-2/3 nevnt at denne næringen er Norges raskest voksende næring. Dette fremgår tydelig av figuren over, hvor fiskeri- og havbruksnæringen er sammenlignet med verdiskapningen i resten av industrien i Norge og med landets BNP. Som vi skjønner av det forangående, kommer det viktigste bidraget til denne fabelaktige utviklingen fra oppdrett av laks og laksefisk.

Oppdrett av andre arter er mye vanskeligere. Det er lagt ned betydelige ressurser i forsøk med oppdrett både av torsk, kveite og skjell, men dette har hittil ikke vært helt vellykket. Det vil føre for langt å komme inn på årsakene til dette. Oppdrett av nye arter vises knapt på søylediagrammene på side 12-3.

Leverandørindustrien, inklusiv fôrproduksjon er viktig. Under omtalen av skip og skipsbygging pekte vi på hvor viktig den industrien som produserer og monterer utstyr for nybygde skip, er. Du kan lese mer om dette i forbindelse med den såkalte maritime næringsklyngen på sidene 9-21, og i faktabokser på side 9-37. På tilsvarende måte er utstyrsindustrien av største viktighet også for fiskeri- og havbruksnæringen. Vi tenker da ikke bare på fiskebåtene og merdene selv, men også på alt annet utstyr som kreves både ute og på land. Dessuten inkluderer vi gjerne også fôrproduksjonen i dette leddet, og kaller gjerne utstyrsindustrien pluss fôrproduksjonen med et samlenavn for leverandørindustrien.

Næringsklyngen for sjømat snart den nest største i landet. Vi ser av figuren til høyre at omsetningen/verdiskapningen i denne klyngen totalt var på ca. 90 mrd. i 2010. Av figur øverst side 9-21 ser vi at den totale verdiskapingen i den maritime næringsklyngen (som altså vedrører skip og skipsrelatert virksomhet) i 2009 var 122 mrd. kr. Næringsklyngen for sjømat begynner altså å nærme seg den maritime næringsklyngen i størrelse. Med den utvikling som vil skje videre, særlig innen havbruk, er det derfor bare et tidsspørsmål før næringsklyngen for sjømat er landets nest største.



Utvikling av næringsklyngen for sjømat 2000-2010. *Fra [12.1] Total omsetning/verdiskaping var i 2010 nesten 90 mrd. kr, som fordelte seg omtrentlig slik:*

1. *tradisjonelle fiskerier: 30 %*
2. *oppdrett av laks/laksefisk: 40%*
3. *marine ingredienser (utnyttelse av restråstoffer fra fiskeri og havbruk): 5 %*
4. *leverandørindustri / fôrproduksjon: 25 %*

Næringene 3 og 4 blir nærmere omtalt på neste side. En komplett næringsklynge for sjømat vil i framtiden også omfatte andre næringer, men disse utgjorde i 2010 samlet mindre enn 1 %.

Den komplette, norske næringsklynge for sjømat. Framtidig utvikling

Globale og nasjonale utviklingstrekk som vil ha betydning for utviklingen av den norske sjømatklyngen. *Fra [12.1]*
Det forutsettes at vi unngår trusler av katastrofal karakter, som listet opp på side 12-3.

Oversikt over næringsklyngen

Som nevnt i figurteksten nederst på forrige side, omfatter en komplett næringsklynge for sjømat egentlig flere næringer enn de som ble nevnt der, men som i framtiden vil vokse betydelig. Tar vi med disse, fremkommer det vi kan kalle den komplette, norske næringsklynge for sjømat. Denne er illustrert nedenfor og beskrevet i oversikts form på neste side.

Globale og nasjonale utviklingstrekk av betydning for næringsklyngen

De viktigste utviklingstrekkene av global og nasjonal karakter er illustrert i figur til venstre. Det aller viktigste av de globale trekkene er det økte matbehovet. Et annet viktig utviklingstrekk er knyttet til helse. I begge tilfelle kan marine produkter utgjøre en stor forskjell.

Sjømatklyngens verdiskapingspotensial

Fantastisk konklusjon. Vi skal se nærmere på hvilken verdiskaping den komplette sjømatklyngen kan representere i dag (2010) og i framtiden (2050), og baserer oss da på en omfattende rapport fra en ekspertgruppe [12.1]. Et kortfattet utdrag av denne er beskrevet på neste side. Her er potensialet til verdiskapingen begrunnet nærmere, og oppgitt i milliarder kroner så langt fram som i år 2050. Denne utviklingen ble presentert i figur allerede i innledningen til dette kapitelet (se side 12-3). Analysen leder fram til en nesten utrolig konklusjon: I 2050 kan den norske sjømatklyngen komme til å gi en verdiskaping på over 500 milliarder kroner, et tall som er sammenlignbart med eksportverdien av dagens olje- og gassutvinning. Og vi skjønner alle den betydning det vil komme til å få.

Den norske næringsklynge for sjømat

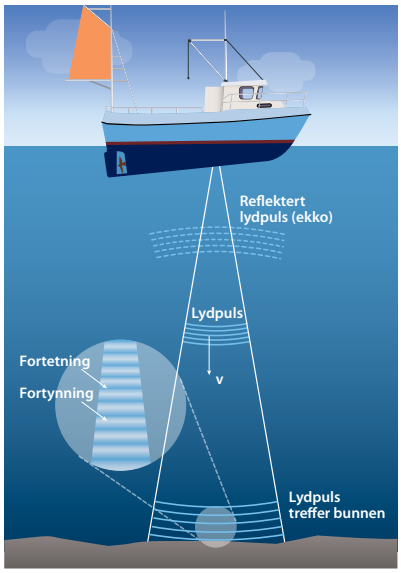
Den norske næringsklynge for sjømat. *Denne omfatter private næringsbedrifter som i vesentlig grad kan relateres til utnyttelse av produksjonsmateriale fra marine, levende ressurser på en bærekraftig måte. "Beslektede" bedrifter kan ordnes i grupper. Disse kan vi kalle næringer eller næringsgrupper. De er nærmere definert på neste side.*

Næringer/næringsgrupper	Framtidig utvikling av sjømatklyngen	2010	2050
Fiskerier. Høsting av torskefisk, pelagiske arter, bunnfisk, skalldyr og bløtdyr. Verdikjedene omfatter: leting, fangst, ilandføring, prosessering (alt som skjer med fisken i etterkant, om bord og/eller på land), og salg/eksport. (Verdiskaping ifm. produksjon av fiskebåter, redskap og utstyr er ikke tatt med her, men under utstyrsindustri, se nedenfor).	Økt **høstingsmengde** baseres på: • økt høsting på lavere trofisk nivå • flere arter og størrelser av fisk og skalldyr høstes og **alt** bringes på land • optimal forvaltning av bestandene. Videre baseres økt **verdiskaping** på: • økende knapphet på mat, økte krav om sunn mat • økt kjøpekraft i verden • økt kunnskap bakt inn i produktene • økt automasjon i bearbeiding av fisken • økt utnyttelse av restråstoff	Mengde [mill tonn]: **2,7** Verdiskaping [mrd kr]: **27**	**4,0** **40**
Havbruk, laks og laksefisk Oppdrett av laks dominerer. Verdikjeden omfatter: produksjon av stamfisk, settefisk og matfisk, slakting og foredling og eksport/salgsvirksomhet.	Laks vil stadig være den dominerende arten. • De viktigste premissene for økt **høstingsmengde** baseres på: løsning av relevante miljøproblemer, som omfatter genetisk påvirkning og rømning, sykdom, forurensning og utslipp, arealbruk og fôrressurser. • I tillegg kommer økt **verdiskaping** av de samme årsaker som spesifisert ovenfor i forbindelse med fiskeriene.	Mengde [mill. tonn]: **1,0** Verdiskaping [mrd. kr]: **34**	**5,0** **238**
Marine ingredienser. Her menes verdikjeder basert på restråstoffer fra fiskerier og havbruk. Mesteparten av disse utnyttes til produksjon av olje, proteiner og biokjemikalier til fôr og konsum, mens omtrent 20 % kastes.	Siden både fangstmengder i fiskeriene og oppdrettsmengder vil øke, vil også restråstoffmengdene øke kraftig. Økende fileteringsgrad virker i samme retning. Dessuten vil det komme nye råstoffkilder, både fra tarehøsting/tareproduksjon (se nedenfor), og fra såkalt marin bioprospektering (leting etter interessante biomolekyler i marine miljøer). Satsing på innovasjon og forskning er da viktige premisser.	Mengde [mill. tonn]: **0,9** Verdiskaping [mrd. kr]: **5,0**	**4,4** **70**
Leverandørinustri. **a) Fôrproduksjon** baseres på "industrifisk", avfall fra fiskerier og landbruk). **b) Utstyrsindustrien** leverer anlegg, utstyr, varer og tjenester som er nødvendig i fiskeriene og havbruket samt i prosesseringsindustrien.	Dette er en viktig del av næringsklyngen for sjømat: **a) Fôrproduksjonen** vil baseres på økende grad av egne fiskerier, utnyttelse av utkastene fra de vanlige fiskeriene, og landbruksprodukter. Må senere også baseres på: dyreplankton (krill, raudåte), tare og landbruksavfall. **b) Utstyrsindustrien** omfatter bl.a. for fiskeriene: fartøy/fiskeredskap og utstyr ombord og på land. For havbruk: merder, landanlegg og utstyr. Prosesseringsindustrien krever også utstyr. Eksport av kompetanse og utstyr er også tatt med.	Verdiskaping [mrd. kr]: **23**	**124**
Havbruk, nye arter. Det har lenge vært drevet oppdrett av torsk og kveite, men med skuffende resultater (bl.a. stort svinn, les mer i faktaboks side 12.xx). Heller ikke dyrking av blåskjell, kamskjell, østers og skalldyr har vært noen suksess.	Norge er verdensledende når det gjelder kunnskap om oppdrett av torsk og kveite. Oppdrettsmengden vil stadig øke, om enn mye langsommere enn for laks. En annen, framtidige metode for oppdrett, er såkalt IMTA (Integrert Multitrofisk Akvakultur). Her dyrkes tare, og blåskjell så nær laksen at utslipp av næringssalter og organisk materiale fra denne utnyttes direkte. Oppdrett av rensefisk (f.eks. bergnebb) er også interessant. Denne brukes til å redusere lusenivået i oppdrett av laks.	Verdiskaping [mrd. kr]: **0,5**	**2,5**
Marine alger. Marine alger er planter (fotosyntesen gjelder). **Mikroalger** er encellede organismer som finnes overalt hvor sollys slipper ned i havet. **Tang og tare** er flercellede organismer (makroalger).	**Mikroalgene** er de mest produktive på jorda, 35 000 forskjellige arter er beskrevet, men dette er kanskje bare 10 % av det totale antall arter. Pga. størrelsen er det vanskelig å høste dem. Omega-3 fettsyrene i fisk kommer fra mikroalger, som også gir en vrimmel av andre muligheter til utnyttelse (innen medisin/helse, mat og energi). For mat- og energiformål (f.eks. biodiesel) er det enklere å dyrke/høste **tare (altså makroalger)**.	Verdiskaping [mrd. kr]: **1,1**	**40**
Høyproduktive havområder. Med det menes havområder der produksjonen gjennom naturlige prosesser eller ulike inngrep kan styres mot høy, høstbar avkastning av attraktive arter av dyr og planter.	Tiltak som kan bidra til høstbar produksjon av ønskede arter: • kunstig skapt oppstrømning (oppvelling), eventuelt i kombinasjon med energiproduksjon. • kunstige rev som forbedring av enkelte arters biotop, øker også produksjon generelt. • yngelteknologi for aktuelle arter. • metoder for utsetting, forsterkning av ønskede arter. • ROV-teknologi for overvåking og høsting av dyrkede organismer	Verdiskaping [mrd. kr]: **0**	**25**

Fiskeriteknologi

Hvordan finne fisken?

Så lenge vi har drevet fiske, har hovedproblemet vært det samme: å finne fiskestimen! *Observasjon av fugler har alltid vært brukt. Bruk av loddstreng er en annen, gammel metode. Ved landnotfiske av sild og brisling, rodde notbasen rundt med en blyklump hengende i en messingtråd. Han kunne kjenne fisken støte mot tråden -antall støt fortalte hvor tett den sto, og styrken sa noe om hvor stor fisken var.*



Prinsipp for måling avavstand ved hjelp av ekkolodd
Avstand (A) til fiskestim eller bunn bestemmes av

$$A = 2 \cdot v \cdot T$$

Her er:
v = lydpulsens midlere forplantningshastighet, se side 11-11
T = tid mellom utsending av lydpuls og retur av ekkopuls

Litt mer fysikk om lydbølger under vann

Først bør du repetere det du har lest i fysikken generelt om bølger og lyd. Les også på nytt side 11-11 om lydforholdene i vann.

Prinsipp for ekkolodd. Lydbølger i vann sprer seg fra en lydkilde. Dette kan være en vibrerende plate i et skipsskrog som sprer støy i vannet, eller svingeren i et ekkolodd som sender signaler ut i vannet i korte pulser, og som så venter til den får ekko tilbake fra bunnen eller fra fisk. Ved å måle tiden fra pulsen sendes til ekkoet kommer tilbake, kan dybde eller avstand til fisk beregnes og vises på skjerm.

Lyd går lenger enn elektromagnetiske bølger under vann. Lydintensiteten på ekkoet reduseres i vannet på grunn av spredning og absorpsjon. Spredningen er proporsjonal med avstanden til lydkilden i andre potens. Absorpsjonen er proporsjonal med frekvensen i andre potens. Det innebærer at lavfrekvent, altså langbølget, lyd bærer lenger enn kortbølget lyd. Alle elektromagnetiske bølger, for eksempel lys og radiobølger, absorberes raskt i vann. Lyd er derfor viktigere enn lys for å kunne "se" og kommunisere under vann innen all marin aktivitet. Det er derfor viktig å kunne bygge støysvake skip som ikke forstyrrer lydforholdene i havet eller havets fauna.

Fortetninger og fortynninger av vannmolekylene. Lydpulsene består av et passende antall bølger, avhengig av formålet. Energien fra svingeren sprer seg kuleformet, som bølger bestående av høytrykk med kort avstand mellom molekylene, og lavtrykk med lengre avstand (fortetninger og fortynninger, se figur).

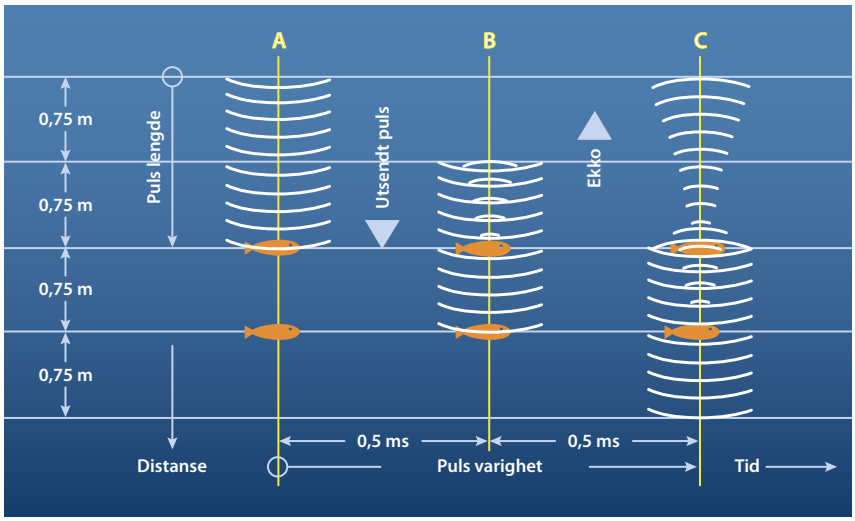
Lavfrekvent lyd har større bølgelengde og rekkevidde. Mennesket hører frekvenser fra 20 Hz til 12 kHz. Vanlige frekvenser for ekkolodd ligger over det hørbare området. Lavfrekvent lyd, basstoner, har lang bølgelengde og lang rekkevidde, mens høyfrekvent lyd har kort bølgelengde med høyere absorpsjon og kortere rekkeviddde. Absorpsjon er energitap som oppstår på grunn av vannets viskositet.

Lydstyrke. Når lydkilden har stor trykkamplitude, settes molekylene i kraftige bevegelser, og de pakkes ekstra tett sammen i høytrykkssonene. En sterk lyd skyldes altså at molekylene i lydbølgen stues tett sammen. Dersom lyden er svak, er avstanden mellom molekylene større. Vi har alle erfart at lydstyrken blir svakere jo lenger unna lydkilden er. Dette skyldes at avstanden mellom luftmolekylene blir større, og det vil si at trykkamplituden blir mindre.

Ekkolodd

System. Et komplett ekkoloddsystem består av en svinger (høyttaler/mikrofon) montert i bunnen av et fartøy, samt elektronisk utstyr som styrer pulslengde og pulsfrekvens, mottar ekko og tyder og viser resultater på skjerm. Svingeren, som er neddykket i vannet, sender trykkbølger av en gitt frekvens og styrke ut i vannet, og fanger også opp ekko.

Svingerens overflate blir satt i svingninger ved hjelp av elektriske signaler. En svinger både sender ut lydsignaler og mottar ekko fra bunn og fisk. En ny puls sendes ikke ut før ekkoet fra den forrige er kommet tilbake.



Oppløsningsevne. Den informasjon en kan forvente å få fra et ekkolodd avhenger av rekkevidden og oppløsningsevnen. Med det siste mener vi hvor godt det kan skille mellom enkeltfisk i vannet. Dette avhenger blant annet av senderens frekvens og pulslengde.

Tidsvariabel forsterkning. Figuren over viser en lydpuls fra svingeren under en fiskebåt ved tre forskjellige tidspunkter. Idet en lydpuls treffer den første fisken, sendes et ekko tilbake mot båten. Ekkoet fra fisk langt nede blir svakere enn ekkoene fra fisk lenger oppe i vannsøylen når de kommer tilbake til fartøyet. For å gi et mest mulig korrekt bilde av fiskemengden, blir ekkoene elektronisk forsterket i instrumentet, avhengig av hvor lang tid som er gått etter at pulsen ble sendt (tidsvariabel forsterkning). Dette er viktig hvis en skal bruke ekkolodd til å bestemme fiskemengden som er til stede.

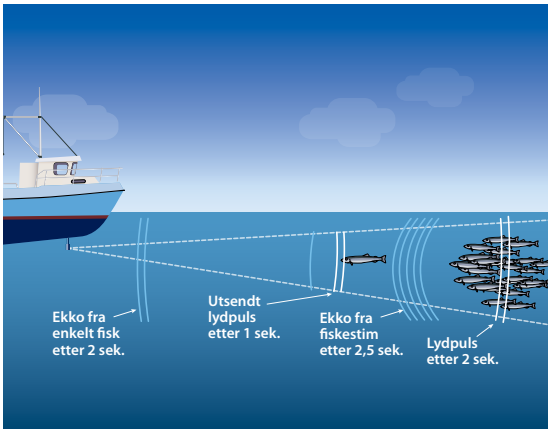
Figuren viser at en pulslengde på ett millisekund (pulslengde lik 1,5 meter) gjør det mulig å skille mellom to fisker med en vertikal avstand på 0,75 m eller mer. Ekkoet fra den nederste fisken må ikke nå igjen ekkoet fra den øverste. Dette kalles radiell oppløsningsevne.

Sonar

Ekkolodd som "ser" både forover og til siden. Rekkevidde avhenger som tidligere nevnt,- av bølgelengde og lydstyrke. For å oppdage fiskestimer på lang avstand med sonar, lar en ofte lydstrålen gå nærmest horisontalt og bruker lave frekvenser og lange pulser. Dermed får en sendt mer energi ut i vannet, samtidig som absorpsjonen blir forholdsvis lav. Fiskestimer kan slik oppdages på flere kilometers avstand.

Figuren viser lydstrålen fra en sonarsvinger omtrent to sekunder etter at en puls ble sendt. Etter litt over et sekund traff pulsen en enkelt fisk, som sendte et ekko tilbake mot fartøyet. Ekkoet har nå nådd nesten helt til svingeren. Etter to sekunder har pulsen begynt å trenge inn i en fiskestim, og ekkoet fra stimen har startet opp. I slutten av dette kapitlet er det gitt en beregningsoppgave med utgangspunkt i den viste figuren. Løs både denne og øvrige oppgaver. Der tas det opp litt mer stoff om disse uunnværlige målemetodene.

Oppløsningsevne for et ekkolodd med senderfrekvens 10 kHz og 10 svingninger pr. puls.
Pulslengden blir da:
$L = 10 \cdot v / f = 10 \cdot (1500\ m/s)/(10 \cdot 10^3 Hz) = 1{,}5\ m$
Varigheten av en lydpuls blir:
$t = L/v = 1{,}5\ m/(1500\ m/s) = 1 \cdot 10^{(-3)}\ s = 1\ ms$
Legg merke til at m brukes som symbol både for "meter" og "milli".
Figuren viser situasjonen ved tre ulike tidspunkter:
A. i det øyeblikk lydpulsen treffer fisk nr.1 og begynner å sende et ekko tilbake.
B. 0,5 ms senere, idet pulsen treffer fisk nr. 2 og begynner å sende ekko nr. 2 tilbake
C. etter ytterligere 0,5 ms. Vi ser at ekko nr. 2 ikke når igjen ekko nr.1. Dette betyr at oppløsningsevnen altså er 0,75 m



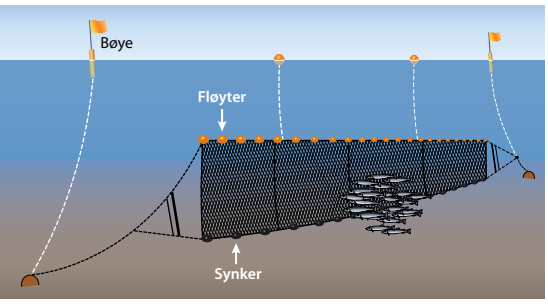
Måling av avstand ved hjelp av en sonar.
En sonarsvinger kan beveges både i horisontalplanet og vertikalplanet, avhengig av hvor man vil søke.

Fiskeriteknologi

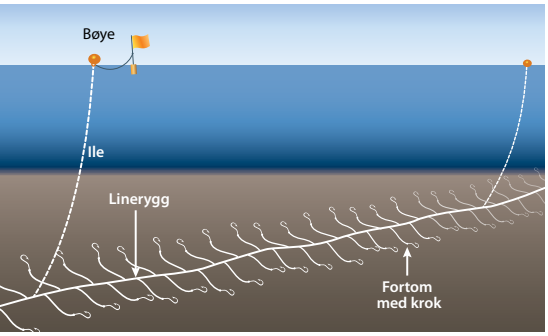
Hvordan fange fisken?

De viktigste fiskeriene. 2011-fangster i mengde og % av total førstehådsverdi

	Mengde, mill.tonn	Verdi, % av total
Torsk	0,34	24
Sild	0,63	21
Makrell	0,21	16
Sei	0,19	9
Hyse	0,16	8
Lodde	0,36	5
Andre	0,40	17
Sum	2,29	100



Garn – skjematisk vist
Garnet holdes oppe av fløyt eller flytetau, og nederst har garnet søkker eller blytau. Maskestørrelsen avgjør hvor mye småfisk som fanges.



Line – skjematisk vist
Figuren viser en bunnline. Det finnes også fløytliner, som holdes oppe fra bunnen av fløyt på lina.

De viktigste artene i de norske fiskeriene

I faktaboksen til venstre ser vi at torsk i 2011 var viktigst regnet i fangstverdi, mens fangstmengden var størst for silda.

Fiskeredskapene

Disse deler vi vanligvis inn i to hovedgrupper:

- passive redskaper som fisken må «oppsøke».
- aktive redskaper som «oppsøker» fisk og fiskestimer.

De viktigste redskapene for yrkesfiske i Norge er garn, line, trål, ringnot og snurrevad. Det er her bare plass til korte beskrivelser av disse.
Bærekraft/seleksjon: For å få bærekraftige fiskerier må vi unngå fangst av uønskede arter og småfisk, ha lavt utslipp av klimagasser, samt unngå ødeleggelse av havbunn og miljø. De ulike redskapene er svært forskjellige i så måte.

Fiske med passive redskaper

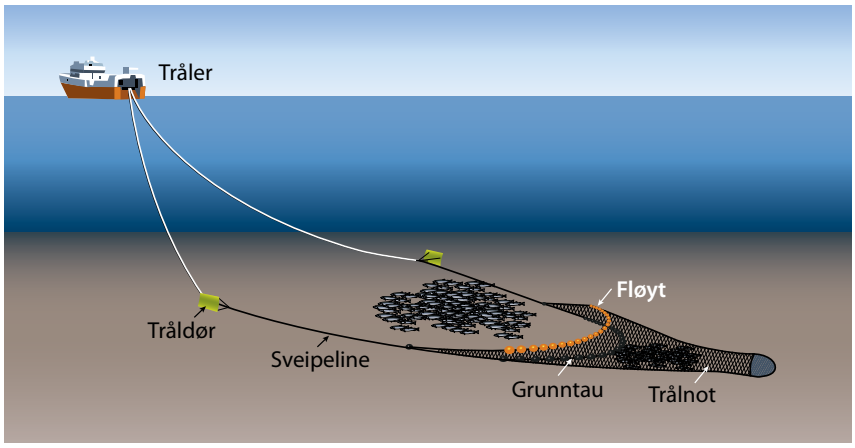
Garnfiske. Garnfiske har lange tradisjoner. I Norge brukes garn først og fremst for bunnfisk. Maskestørrelsen tilpasses størrelsen på fisken en skal fange - en prøver å unngå å fange småfisk. Fisk som vandrer eller leter etter mat, vikler seg inn i maskene. Yrkesfiskerne bruker garn med en lengde på ca. 28 m, som settes i lenker med 30—60 garn, avhengig av forholdene, med en ile i hver ende. En ile er en dregg med iletau og ilebøye, og en påsatt stang med lys/flagg/reflektor for gjenfinning. Døgndrift, (en tur pr. døgn) er vanlig i kystflåten.
Bærekraft/miljø: Denne passive redskapen sees på som selektiv, men kan ofte gi lav fangstkvalitet. Tapte garn av syntetiske materialer kan fortsette å fiske i lange tider og ta livet av store mengder fisk. Dette kalles "ghost fishing". Garnfiske har et forholdsvis moderat forbruk av fossilt brensel.

Linefiske. Line er et passivt redskap som består av et langt snøre eller tau, lineryggen, som ofte er av spunnet polyester (terylene). Taudiameteren kan være ca. 5 mm i kystfiske og 10 mm i havfiske. Linerygg av monofilamentnylon (sene) er også brukt i kystlinefisket, men sjelden i havfiske. Krokene er festet til lineryggen med tynne «forsyn» av monofilament eller terylene med diameter på et par mm og en lengde på 0.5—0.8 m. Avstand mellom krokene 1,2—1,8 m. Linene er utstyrt med iler på samme måte som i garnlenker. Linefiske drives på båter fra 7—8 meter til 50—60 meter.

Krokene egnes, med sild, makrell eller akkar. Utgiftene til agn er betydelige. I kystfiske egnes linene på land for hånd, og kveiles i stamper. Hver stamp tar ca. 500 m line, og denne har ca. 400 kroker. De havgående linefartøyene, med en lengde på 40—60 m, bruker egnemaskiner som kutter agn og egner under setting. Linene kan være opp til 50 km lange og ha 40 000 kroker. Da er det vanlig å bruke flere iler. Setting av line går ganske raskt, mens haling er tidkrevende på grunn av fare for å slite av lina eller miste fisk. Halehastigheten varierer fra 0,5 til 1,0 m/s. Linefiske gir god fangstkvalitet og gode priser på fisken. **Bærekraft/miljø:** Metoden har et moderat brenselforbruk, spesielt i kystfisket, og påvirker miljøet forøvrig lite.

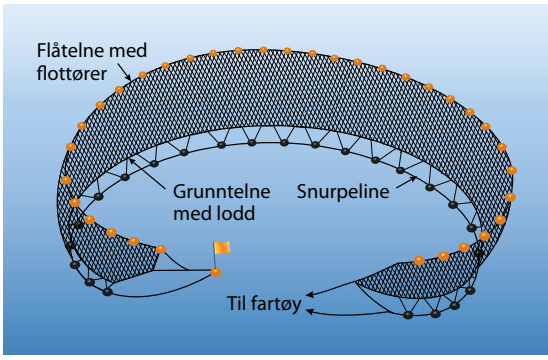
Fiske med aktive redskaper

Fiske med ringnot. Denne redskapen kalles også snurpenot, og er et aktivt redskap for stimfisk, som sild, lodde, makrell og sei. Maskestørrelsen må ikke være så stor at fisken setter seg fast, og tilpasses størrelsen på fisken som skal fanges. Fiskestimen finnes ved hjelp av sonar/ekkolodd, og deretter settes nota rundt stimen. En not kan være 800 m lang og 250 m dyp. Når bøye, drivanker og første enden av nota er om bord i fartøyet igjen, snurpes nota sammen i bunnen ved hjelp av en wire som går gjennom snurperinger festet til blytelna nederst på nota. Wiren trekkes inn av snurpevinsjer. Den andre enden av nota trekkes så inn ved hjelp av kraftblokk eller notvinsj, slik at fisken trenges sammen. Fisken håves, pumpes eller suges om bord, der den oftest oppbevares i kjølt sjøvann (RSW). **Bærekraft – miljø:** Riktig brukt, er snurpenot den mest energieffektive redskapen, i tillegg til å ha lav miljøpåvirkning for øvrig.



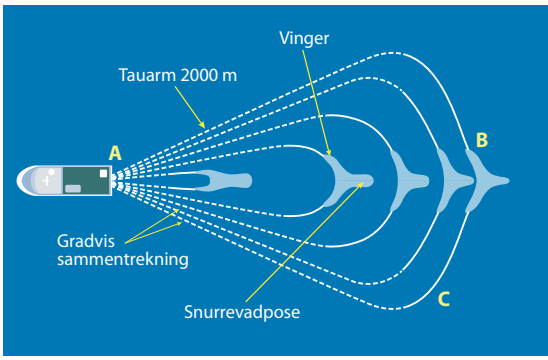
Trålfiske. Trålen er et aktivt fiskeredskap som består av en traktformet nettpose som slepes av en tråler. I prinsippet siler den havet. For bunnfisk og reker brukes naturlig nok bunntrål, mens stimfisk fanges med pelagisk trål. Vanligvis slepes en trål med to trålwirer. Disse er nederst festet til to tråldører (lemmer) som holder trålen åpen sideveis. Bakerst er det en fiskepose av tykk tråd med maskevidde etter regelverket. Den er festet til belgen/trålnoten med et traktformet mellomstykke. Derfra går det nettvinger på hver side forover. Disse festes til sveipeliner som overfører trekk- og spredekraft fra tråldørene til grunntauet og fløytlina på vingene. Grunntauet er en kraftig stålwire med kuler av stål eller gummi (bobbins). Disse forhindrer at trålen setter seg fast i bunnen. Fløytlina med flottører sørger for vertikal åpning på trålen. **Bærekraft – miljø:** Siling av havet krever naturlig nok mer energi enn passive redskaper. For å sørge for god seleksjon, finnes det regler for maskevidde. I tillegg kreves det bruk av rister av stål eller plast som bidrar til bedre seleksjon. For å beskytte havbunnen forsøker en å utvikle en pelagisk trål som kan fange fisk nær bunnen uten å påvirke denne.

Fiske med snurrevad. Snurrevad har likhetstrekk med både trål og snurpenot. Vingene er mye lengre enn på trål. I tillegg har nota to tauarmer med bly- eller wirekjerne, på over 2000 m. Først settes ei blåse ved A, deretter settes 2000 m tau, siste del som en kvart sirkel. Nota settes ved B, deretter siste tauarm, og ved C stettes kursen tilbake mot blåsa. Den tas om bord og vinsjene trekker så inn tauarmene. Det kan ta omtrent en time å ta fisken om bord. Fangsten har svært god kvalitet; store deler av fangsten kan ofte leveres levende. **Bærekraft – miljø:** Dette er et energieffektivt fiske, som påvirker naturen lite.



Ringnot, skjematisk vist
Til snurpeline benyttes en wire. For å holde nota oppe brukes flottører av plast. På grunntelna er det inntredd lodd slik at nota skal synke.

Utforming av moderne bunntrål
Til nettvingene er det festet store stålkuler, og fra disse går en wire, kalt sveipeline, fram til hver av tråldørene. Disse er forsynt med stålbøyler som trålwirene (som sleper trålen) er festet til. Det er viktig at tråldørene får riktig vinkel med fartsretningen, slik at de klarer å holde trålnota utspilt sideveis. Virkemåten av trålen er slik at når den slepes, så vil tråldører og sveipeliner skremme fisken inn mot åpningen av trålnota.



Prinsipp for snurrevad
Snurrevad "siler havet" på samme måte som en trål, særlig mot slutten av sammentrekkingen. Den ligner også på en trål ved at fisken skremmes inn i notåpningen. Utsettingen minner om ditto for en ringnot med store dimensjoner.

Fiskeriteknologi

Den norske fiskeflåten

Banklineskøyte ca. 1880.
Fisket med doryer på Storegga osv.

Notbåter for snurpenot ca. 1952.

Snurper ca. 1955.

Kraftblokksnurper ca. 1960.

Hekktind - første norskbygde hekktråler 1962.

Longva - første norskbygde fabrikktråler 1962.

Antall fiskefartøyer

Antallet har stadig gått nedover (se figur side 12–7). På det meste (i 1960) var det oppe i mer enn 41 000 fartøyer. I 2011 var dette tallet sunket til 6252. Det er antall småbåter (sjarker) som har blitt redusert, men flåten bestod i 2011 fortsatt av 5600 slike båter (se tabell på neste side). Flåten fornyes imidlertid kontinuerlig, og nye båter er både større og mer effektive, slik at fangstmengdene likevel kan holdes oppe på det nivået som til enhver tid er vurdert som bærekraftig. Samtidig tas det bedre vare på rester av fisken, slik at verdiskapingen stadig øker (se side 12–11).

Størrelser og typer.

Lengde. Vi bruker gjerne lengden når vi skal angi fiskefartøyers størrelse. Lengdebegrensning har vært brukt i forskjellige øyemed. Kravene til fartøyenes konstruksjon og skipperens kompetanse øker med økende lengde. Viktige grenser for mindre fartøyer er 35 fot (10.67 m), 15 m og 24 m. Lengdebegrensning har også vært et viktig tiltak for å begrense flåtens fangstkapasitet. Et kystfiskefartøy kunne ikke være lengre enn 90 fot (ca. 28 m). Dette førte til bygging av "paragraf" -båter med stor bredde, høyt Froudes-tall og stor motstand. Begrensninger av lignende art har vært i bruk i havfiskeflåten. Dette avløses nå av begrensninger på lasteromsvolum. Diagrammet på neste side viser hvordan antall fiskefartøyer varierer med størrelsen.

Typer fiskefartøyer. Det finnes en vrimmel av ulike typer. De får ofte betegnelser etter hvilke fiskeredskaper de anvender. På neste side er bare noen få eksempler vist.

Eksempler på fiskefartøyer i den norske fiskeflåten

A. **Sjark.** Et lite kombinasjonsfartøy under 35 fot som driver fjord- og kystfiske. Mannskap 1—3 mann. Kan fiske med flere forskjellige redskapstyper. Betegnelsen brukes nå for fartøy opp til 15 m. Fart ca. 7 knop.

B. **Lite kystfiskefartøy - stor sjark.** Lengde ca. 15 m. Redskaper: line, garn, snurpenot og snurrevad. Bemanning: 4-6 personer. Fart ca. 9 knop.

C. **Kystsnurper.** Lengde ca. 22 m. RSW- tanker 150 m^3. Fart ca. 10 knop. Bemanning 7—8 personer.

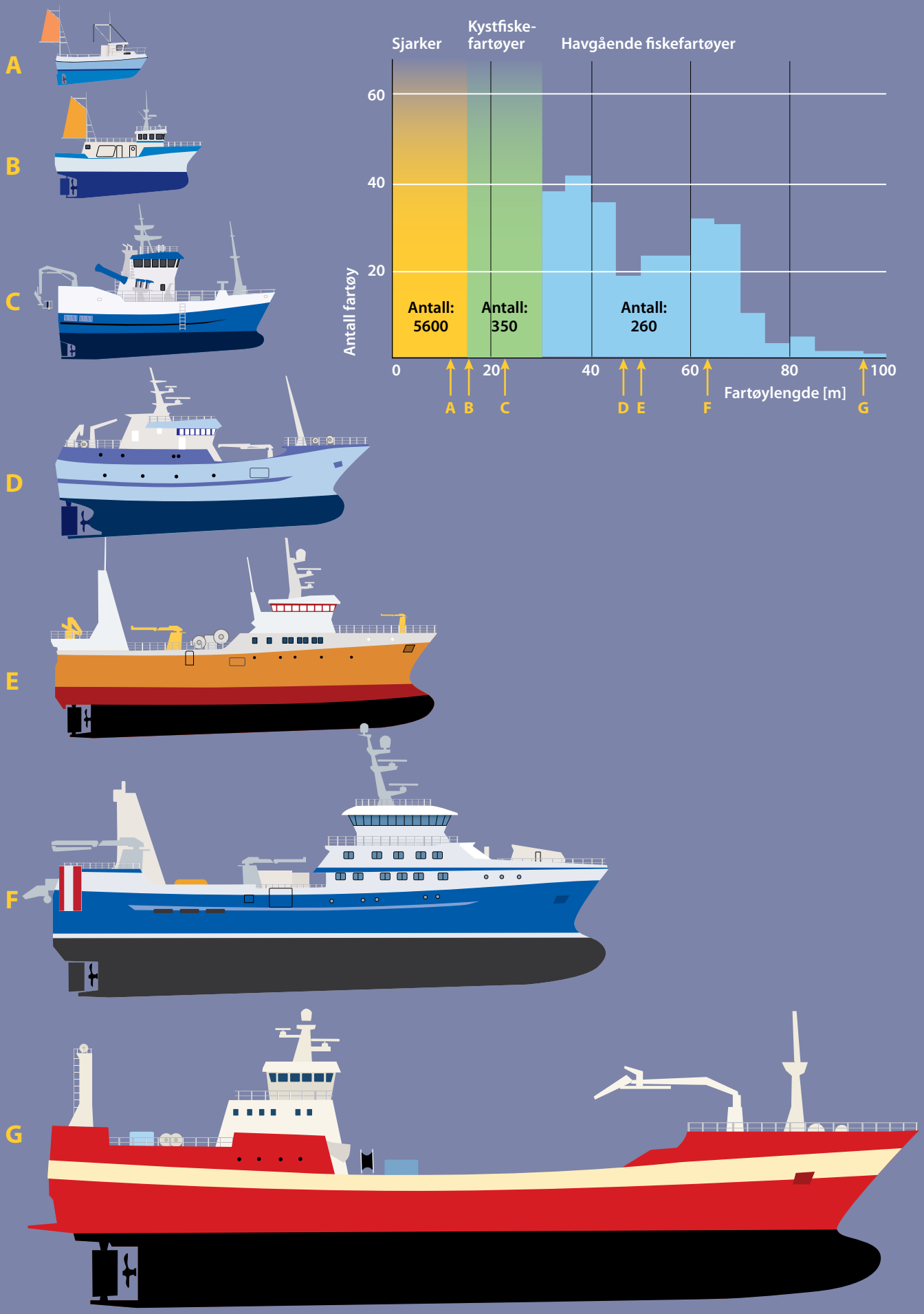
D. **Autolinefartøy.** Lengde opptil 60 m. Fangsten sløyes og fryses. Fryserom 700 m^3. Mannskap opp til 18 personer. Fart ca. 13 knop.

E. **Hekktråler.** Lengde ca. 46 m. Ferskfisk, (fisken sløyes og lagres i kasser med is). Lasterom 400 m^3. Bemanning 16 personer. Fart ca. 13 knop.

F. **Fabrikkskip.** Lengde ca. 70 m. Fartøyet kan fiske med trippeltrål. Anlegg for både plate- og tunnelfrysing. Lasterom over 1000 m^3. Bemanning : over 20 personer. Fart ca. 16 knop.

G. **Ringnotfartøy/pelagisk tråler.** Lengde 94 m. RSW-anlegg for kjøling av fangst. Lasttankkapasitet 2300 m^3. 19 lugarer. Fart ca. 20 knop.

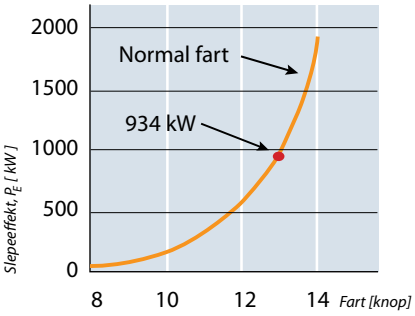
Den norske fiskeflåten anno 2011



Fiskeriteknologi

Energiforbruk ved tråling

Data for trålefartøy
Lengde, L_{pp} = 34 m
Bredde B = 10,3 m
Dypgang full last D = 4,70 m
Volumdeplasement V = 1048 m³
Dødvekt: 376 dwtonn
Rom for fryst/ kjølt last:: 343 m³
Effekt hovedmotor,
$P_{e,MCR}$ = 1900 kW
Normal fart: v = 13 knop
Hjemmehavn: Stamsund
Fisker torsk på Nordkappbanken, 330 nautiske mil borte



Motstandseffekt i kW for et skip med data som gitt ovenfor, fra dataprogrammer Freeship (se side 3–15).

Data for tråL:
Trålefart: 4 knop
Kraft for sleping av tråL: 110 kN
Gjennomsnittlige verdier for:
- *fangstrate henregnet til hele turen: 15 tonn/døgn*
- *fangstrate ved tråling: 2,2 tonn/t*
- *tid med tråL ute: 4 timer per hal*
- *tid til haling, tømming og skyting av tråL: 1 time per gang*
- *effektbehov ved haling: 200kW*

Data for behandling av fangst
Fangsten hodekappes og sløyes om bord. Alle rester fryses og tas med tilbake til Stamsund havn, hvor de bearbeides til fôr for oppdrettsnæringen. Her blir også den sløyde fisken bearbeidet til filet. Fileten utgjør 40 % av rundfisken. Den sendes med vogntog til Paris (3330 km).

De moderne trålfartøyene har utviklet seg til rene "fiskemaskiner". Ekkolodd og elektroniske instrumenter kartlegger fiskeforekomstene, og trålen har kapasitet til å hente opp store mengder fisk. Trålere som opererer langt fra sin base har gjerne stor frysekapasitet, slik at fangsten kan dypfryses om bord. Disse kalles gjerne for frysetrålere. På store frysetrålere, såkalte fabrikkskip, blir fisken også filetert før den fryses. For fiske langt ute på kystbankene benyttes ofte ferskfisktrålere, der fisken blir bløgget, sløyet og vasket, og deretter holdt avkjølt med is eller nedkjølt sjøvann til den leveres på et fiskemottak.

Eksempel: beregning av energiforbruk ved tråling

Overslagsberegning av energiforbruk pr. kg fangst for en hekktråler. Fangsten, som i stor grad er torsk, skal sløyes og fryses ombord og tas med hjem. Diverse data er gitt i margen.

a) Under trålhal nr. 26 får skipperen beskjed om at lasterommet er i ferd med å bli fullt. Han avbryter derfor fisket etter dette halet. Beregn det totale fangstresultatet.

b) Bruk "Freeship" til å bestemme motstandseffekt som svarer til fart og dypgang som oppgitt. For enkelhets skyld bruker vi samme verdier både under utreise og hjemreise. Bestem hovedmotorens akseleffekt som på side 7-19, men med propulsjonsvirkningsgrad 0,55. Regn med 100 kW i tillegg for elektrisk effektbehov under hele turen (ekskl. nødvendig behov til frysing). Beregn brenselsforbruket under utreise og hjemreise.

c) Bruk data for fangstrate pr. døgn i sjøen til å bestemme tiden som tråleren bruker på hele turen. Differansen mellom denne tiden og medgått tid til ut- og hjemreise (punkt b) og til tråling (punkt d) brukes til å lete etter fiskeforekomster. Letingen skjer med hastigheter som i gjennomsnitt medfører at hovedmotoren yter 30 % av maksimal akseleffekt. Bestem brenselsforbruket under leting etter fisk.

d) Beregn brenselsforbruket under tråling (inkl. innhaling av tråL). Propulsjonsvirkningsgraden settes til 0,50 og spes. brenselsforbruk 220 g/kWh. Skrogmotstanden neglisjeres på grunn av den lave farten.

e) Beregn brenselsforbruket under frysing av fangsten. Erfaringsmessig er energibehovet ved frysing 110 kWh per tonn frysevare. Energien til fryseanlegget leveres av en akselgenerator med virkningsgrad 0,95, tilkoblet hovedmotoren. I tillegg til frysingen av fangsten må lasterommet holdes nedkjølt, noe som krever 0,06 kW per m³ lasterom.

f) Gi en prosentvis oversikt over brenselsforbruket for de enkelte fasene og beregn bresenselforbruket i kg brensel per kg fangst, og i dm³ brensel per kg fangst. Vi forutsetter at motoren bruker en marine dieselolje med tetthet 0,85 kg/dm³.

a) Totalfangst:

M = 4 h / hal · 2,2 tonn / h · 26 hal = <u>229 tonn</u>

b) Ut- og hjemturer:

Medgått tid per tur: $t = \frac{s}{v} = \frac{330\ \text{n.mil}}{13\ \text{knop}} = 25{,}4\ \text{h}$

Akseleffekt hovedmotor (framgangsmåte som på side 7-19)

$$P_e = \frac{P_E}{\eta_{ko}\,\eta_D} + \Delta P = \frac{934\ \text{kW}}{0{,}98 \cdot 0{,}55} + 100\text{kW} = 1833\ \text{kW}$$

Spes. brenselsforbruk velges 0,200 g/kWh, fra side 7-20.
Totalt brenselsforbruk per tur:

$$B = b_e \cdot P_e \cdot t = 0{,}200\ \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \cdot 1833\ \text{kW} \cdot 25{,}4\ \text{h} = \underline{9{,}3\ \text{tonn}}$$

c) Leting etter fisk

Seilingstid for hele turen: $\frac{229\ \text{tonn}}{15\ \text{tonn/døgn}} = 15{,}3\ \text{døgn} = 366\ \text{h}$

Tid med trål ute + tid til haling, tømming og skyting:

$$t = (4 + 1)\ \frac{\text{h}}{\text{hal}} \cdot 26\ \text{hal} = 130\ \text{h}$$

Tid til leting: $t = 366\text{h} - (2 \cdot 25{,}4 + 130) = 185{,}2\ \text{h}$
Brenselsforbruk i periode med leting etter fisk:

$$B = b_e \cdot P_e \cdot t = 0{,}220\ \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \cdot 0{,}30 \cdot 1900\ \text{kW} \cdot 185{,}2\ \text{h} = \underline{23{,}2\ \text{tonn}}$$

d) Tråling

Slepeeffekt for trål: $P = F \cdot v = 110\ \text{kN} \cdot \frac{4 \cdot 1852\ \text{m}}{3600\ \text{s}} = 226\ \text{kW}$

I tillegg kommer det konstante elkraftbehovet på 100 kW.
Slepeeffekt for trål skaffes fra propell (som nå gis dårligere virkningsgrad pga. redusert stigning, vridbar propell).
Tilhørende akseleffekt på hovedmotor: under trålingen blir da;

$$P_e = 0{,}21\ \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \cdot \left[\ \frac{226\ \text{kW}}{0{,}96 \cdot 0{,}5} + 100\ \text{kW}\ \right] \cdot 104\ \text{h} = 12{,}5\ \text{tonn}$$

Brenselsforbruk ved haling av trål (200 kW, se side 12-23):

$$B = 0{,}21\ \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \cdot (200\ \text{kW} \cdot 13\ \text{h} + 100\ \text{kW} \cdot 26\ \text{h}) = \underline{1{,}1\ \text{tonn}}$$

e) Frysing av fisk og dekning av varmetap fra lasterom (se s. 12–25).
Brenselsforbruk:

$$B = \frac{0{,}220\ \text{kg/ kWh}}{0{,}95} \cdot \left[110\ \frac{\text{kWh}}{\text{tonn}} \cdot 229\ \text{tonn} + 0{,}06\ \frac{\text{kW}}{\text{m}^3} \cdot 343\ \text{m}^3 \cdot 366\ \text{h}\right] = \underline{7{,}6\ \text{tonn}}$$

f) Oversikt over brenselsforbruk på turen

Sum og fordeling på de enkelte operasjoner under tråleturen er vist i margen.

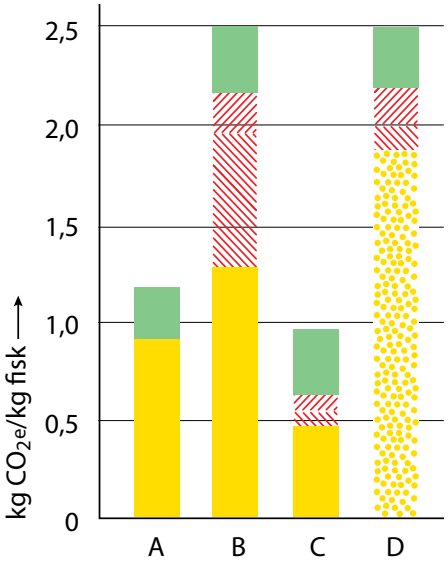
Brenselsforbruk

	tonn totalt	*%*
Utreise	*9,3*	*15*
Hjemreise	*9,3*	*15*
Leting	*23,2*	*37*
Tråling, haling	*13,6*	*21*
Frysing	*7,6*	*12*
Sum hele turen	*63*	*100*

***Brenselsforbruket** (marin dieselolje) er fordelt på de enkelte faser av tråleturen. Brenselsforbruket per kg fisk: 0.28 kg/kg = 0,32 dm³/kg*

Fiskeriteknologi

CO_2-utslipp fra fiskeriene



Utslipp av CO_2 fra trålerens hovedmotor under utreise, hjemreise, leting etter fisk, tråling og arbeid med trål

Utslipp av kuldemedier (omregnet til CO_2e) ombord

Utslipp av kuldemedier under prosessering (frysing på nytt etter filetering)

Utslipp av CO_2 under transport til Paris

Utslipp fra fangst av industrifisk til fôr for oppdrettslaks

CO_2-utslipp for noen fiskeprodukter, per kg frossen fisk.
A: Torskefilet levert Paris, fra beregningseksempelet side 12-18/19
B: Torskefilet levert Paris, gjennomsnitt for norsk fiskeflåte, da med tillegg for lekkasje av kuldemedier (KFK-gasser) overført til CO_2e-lekkasje.
C: Sildefilet levert Moskva, for øvrig som B
D: Oppdrettslaks levert Paris
B, C og D er hentet fra [12.7]

Energiforbruk og CO_2-utslipp per kg fangst

Eksempler på likeverdige energiforbruk. Som konklusjon på beregningseksempelet foran fant vi at tråleren brukte 0,28 kg brensel per kg fangst. For å vurdere dette tallet nærmere , kan vi med fordel uttrykke det på flere andre måter. Dette kan du selv forsøke å gjøre ved å løse oppgave 12.2, hvor det tas utgangspunkt i at brenselet har et spesifikt energiinnhold på 41,5 MJ/kg. Du vil da kunne finne at energiforbruket per kg fangst (rund fisk) også kan uttrykkes på disse måtene:

$$0{,}28\ \frac{\text{kg brensel}}{\text{kg fangst}} = 11{,}6\ \frac{\text{MJ energi}}{\text{kg fangst}} = 3{,}2\ \frac{\text{kWh energi}}{\text{kg fangst}}$$

Betyr disse tallene at energiforbruket for å fange 1 kg fisk er stort eller lite? Dette er belyst nærmere i oppgave 12.10, som viser noen eksempler på likeverdige energiforbruk. Vi skjønner at fisking må kunne sies å være energimessig krevende, i hvert fall når fisket skjer med trål.

Stort energiforbruk betyr stort CO_2-utslipp. Vi vet fra side 7-27 at forbrenning av fossile brensler gir ca.3,2 kg CO_2 per kg brensel. Dermed kan CO_2-utslippet fra selve tråleturen pr. kg fangst (rund fisk) beregnes som nedenfor og illustreres som vist i søyle a i figur til venstre.

$$0{,}28\ \frac{\text{kg brensel}}{\text{kg fangst}} \cdot 3{,}2\ \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg brensel}} = 0{,}90\ \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg fangst}}$$

Hvordan beregne CO_2-utslipp per kg spisbar fisk?

Biprodukter. For å kunne sammenligne miljøbelastningen fra ulike matvarer, må vi henregne CO_2-utslippet til det spisbare sluttproduktet (filet). I vårt regneeksempel blir slo og avskjær fra sløying av fangsten om bord tatt med hjem i fryst tilstand. Sammen med avskjær fra filetproduksjonen kan dette behandles til andre produkter, som for eksempel fôr til laks. Fôret må da ta sin del av CO_2-utslippet.

CO_2-utslipp som belastes fileten. Utslippene fordeles på massen av henholdsvis filet og avskjær (biprodukter). Denne beregningsmåten er i bruk. Den er omdiskutert og kan være for kompleks når det er mange biprodukter. Men i vårt tilfelle er den grei, siden alle restene benyttes. Dermed skal altså fileten belastes med **0,9 kg CO_2/kg filet**.

Andre CO_2-utslipp før fisken er spisbar

Når fangsten har blitt landet, må den videreforedles. Dette vil si at den må tines, fileteres og fryses på ny. Fryseprosessen er gjerne forbundet med utslipp av skadelige kuldemedier (KFK-gasser) og dermed CO_2e-utslipp (se nedenfor). Erfaringsmessig kan dette i så fall settes lik 0,2 kg CO_2e/kg filet.

Også frysing ombord kan gi utslipp av klimagasser. CO_2-utslippene fra tråleturen, som ble beregnet i eksempelet, skrev seg fra forbrenning av fossile brensler i hovedmotoren. Den eldre delen av fiskeflåten bruker imidlertid stadig kuldeanlegg med såkalte KFK-gasser (klor-fluor-karboner) som kuldemedier. Disse gassene er ca. 2000 ganger

mer skadelige enn CO_2 hvis de slippes ut i atmosfæren. For anlegg i god orden er ikke dette noe problem, men lekkasjer og reparasjoner fører ofte til utslipp av KFK-gassene.

Vi tok ikke hensyn til dette i beregningseksempelet fordi vi der tok utgangspunkt i en moderne tråler med kuldeanlegg basert på et ufarlig kuldemedium (CO_2). Ser vi på hele fiskeflåten, må imidlertid KFK-gassene tas med. Erfaringsmessig kan de bidra med 0,7 kg CO_2 e/kg torskefilet (e = ekvivalent).

Transport til markedet. Et av de viktigste markedene for torske- og laksefilet er Paris. Som oftest brukes da vogntog til transporten. Det vises til side 9-17, hvor vi direkte kan ta ut verdien 90 g CO_2 per (km · tonn last). Verdien er valgt lav for å ta hensyn til at store deler av transporten foregår på flate motorveier. Med en distanse til Paris på 3330 km, gir dette følgende utslipp:

$$90 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg } CO_2}{\text{km} \cdot \text{kg filet}} \cdot 3330 \text{ km} = 0{,}3 \frac{\text{kg } CO_2}{\text{kg filet}}$$

Oversikt over utslippene er illustret til venstre. Her er utslippene fra vårt beregningseksempel også sammenlignet med gjennomsnittlige utslipp fra den norske fiskeflåten og havbruket. Det er tre grunner til at "flåteverdiene" er vesentlig større enn de vi beregnet. "Flåteverdiene" tar nemlig med KFK-utslippene (omregnet til ekvivalente CO_2 e-utslipp). For det andre må vi anta at flåten omfatter mange turer med dårlige fangster. Særlig gjelder dette trålerflåten, som er pålagt å levere råstoffer til industrien ved å tråle også utenom de store sesongene. For det tredje kan noe av restene bli kastet, slik at fileten da må bære en større andel av CO_2 -utslippene.

Hvorfor fiskes det med ulike redskaper?

Vi har foran sett at det brukes en rekke redskaper i de norske fiskeriene. Energiforbruket og kvaliteten på fangsten varierer fra et redskap til et annet. Garnfiske og tråling gir dårligere kvalitet enn line, jukse og snurrevad. En stor del av fangsten fra krokredskaper og snurrevad kan føres levende i land, noe som gir svært god kvalitet og muligheter for lagring i merder. Dette kan være hensiktsmessig fordi fisken kan fôres, og en kan garantere markeder levering av høy kvalitet til enhver tid.

Bortsett fra tråling etter reker, benytter kystflåten passive redskaper, som garn, line og jukse. I enkelte distrikter fiskes det også med snurrevad. Disse metodene krever mindre motorkraft og investeringer enn tråling.

I havfiske brukes mest autoline og trål. De fleste trålerne har et ansvar for å levere fisk til filetindustrien utenom de store sesongfiskeriene. De må derfor tråle også i perioder med lite fisk, noe som kan bidra til ekstra høyt brenselsforbruk. Pelagisk fisk fanges med not både i kyst- og havfiske.

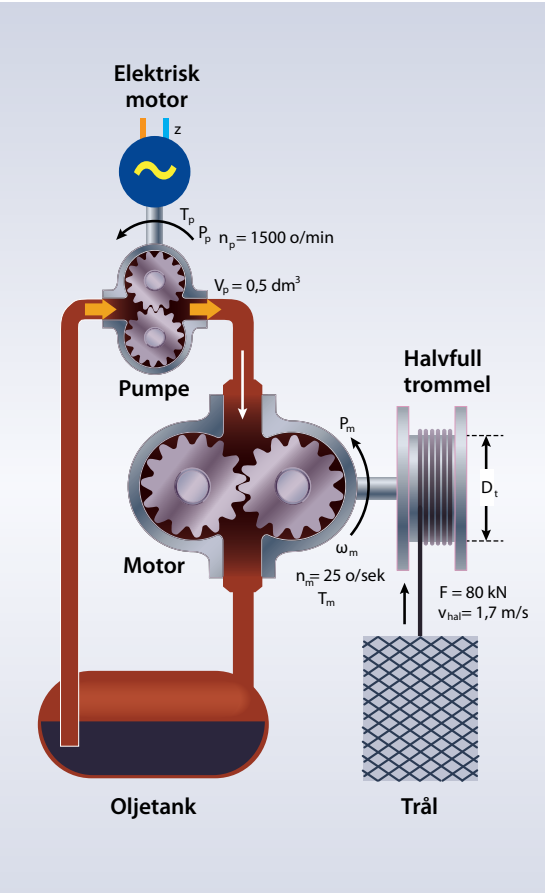
En overssikt over energiforbruket for forskjellige redskapstyper er vist til høyre.

Fiskeredskap	*Brenselsforbruk dm^3/kg fisk*	*Standardavvik*
Kystline	*0,15*	*0,07*
Autoline (havfiske)	*0,31*	*0,12*
Bunntrål	*0,43*	*0,24*
Pelagisk trål (flytetrål)	*0,10*	
Juksa	*0,15*	
Garnfiske	*0,15*	
Snurpenot/ringnot	*0,09*	*0,03*
Snurrevad	*0,12*	

Typiske energiforbruk for forskjellige redskapstyper (middelverdi og standardavvik). De fleste redskapstypene bruker mindre energi enn bunntrål. Trålerne er imidlertid viktige for å sikre kontinuerlig tilførsel av råstoff til industrien.

Fiskeriteknologi

Hydraulikksystemer for dekksmaskiner



Prinsipiell virkemåte for et hydraulikksystem med tannhjulspumpe med utvendig fortanning.
Oljen beveger seg i lukene langs periferiene. Trykket øker underveis. Den forhindres i å strømme tilbake av inngrepet mellom tennene. En tannhjulspumpe egner seg best for moderate trykk.

Overfører store krefter og tar lite plass. Vi har tidligere behandlet mekaniske, elektriske og hydrauliske energioverføringer om bord i skip på sidene fra 7-36 til 7-43, og du kan gjerne se på disse sidene på nytt. Fiskefartøy har mye utstyr og mange funksjoner knyttet til håndtering av redskap og fangst. Hydrauliske motorer blir svært kraftige i forhold til volum og plassbehov (se figur side 7–43). Fiskefartøy er små i forhold til oppgavene og krever kompakte løsninger på utstyret. Hydrauliske systemer er derfor svært utbredt i fiskeflåten.

Virkemåte for hydraulisk effektoverføring

Pumpe og motor er de viktigste enhetene i et hydraulikksystem (se figur). Pumpen fortrenger hydraulikkoljen, som får økt trykk i røret mellom pumpe og motor. Motoren har større volumdimensjoner og dermed oppstår lavere turtall og større dreiemoment på motorens utgående aksel.

Den vanligste form for fortrengerpumpe er tannhjulspumpe med utvendig fortanning (se figuren). Det brukes også en rekke andre typer pumper, for eksempel stempelpumper. Disse brukes gjerne når det er ønskelig med ekstra høye trykk på oljen.

Beregning av hydraulisk effektoverføring

Hydrauliske størrelser. I et hydraulisk system er det viktig å kunne beregne pumpas effektbehov og motorens utgående effekt ved hjelp av karakteristiske hydrauliske størrelser. Slike størrelser er først og fremst oljens volumstrøm ($\dot{v}$) og dens trykk (p).

Energier i et hydraulisk system. For å skaffe oss en ligning for beregning av systemets effektoverføring, kan vi starte med å se nærmere på de forskjellige energiformene som opptrer i systemet. Så lenge temperaturen er konstant, er det bare de forskjellige formene for mekanisk energi som spiller rolle (jf. for eksempel side 3-6). Disse er:

- potensiell energi i forhold til et valgt nullnivå ($E_p = \rho \cdot g \cdot z$),
- kinetisk energi ($E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$)
- trykkenergi ($p \cdot V$)

Trykkenergien dominerer. Hydrauliske systemer arbeider med meget høye trykk. Derfor er de to førstnevnte energiene så små i forhold til den sistnevnte at vi i praktiske beregninger kan se bort fra dem. Det er altså trykkenergien ($p \cdot V$) vi må holde rede på i beregninger av overført energi. Måleenhetene er henholdsvis Pa og m^3.
Siden effekt = energi / tid, er det hensiktsmessig å innføre begrepet volumstrøm $\dot{V} = V / t$ [m^3/s] i stedet for volum [m^3].

Nytteeffekten (utgående effekt fra motoren, P_m) i et hydraulisk system blir altså:

Nytteeffekt P_m = effektivt trykkfall i motor · effektiv volumstrøm.

Også hydrauliske systemer har sine virkningsgrader, η_{vol} og η_{mh} (se boks i margen). Tar vi hensyn til disse, kan ligningen foran skrives:

$$P_m = (\eta_{mh} \cdot \Delta p_{teo}) \cdot (\eta_{vol} \cdot \dot{V}_{teo}) = \eta_{tot} \Delta p_{teo} \cdot \dot{V}_{teo}$$

Her er:

Δp_{teo} = teoretisk trykkfall, (altså inklusiv trykktap)

$\dot{V}_{teo}$ = teoretisk volumstrøm fra pumpe [m^3/s], basert på geometriske dimensjoner.

η_{mh} og η_{vol} = virkningsgrader, se boks i marg

Eksempel. Beregning av hydraulikksystem for drift av vinsj for innhaling av tråd

Jevnfør beregningseksempel på sidene 12-18/19. Data for et hydraulikksystem med vinsj for innhaling av trålen er som gitt i figur til venstre.

Oppgave: For innhaling av tråd med halvfull trommel skal bestemmes:

a) teoretisk og effektiv (virkelig) volumstrøm fra pumpa ($\eta_{vol} = 0{,}80$)

b) motorens volum når den skal gi et turtall på 25 o/min (= 0,417 s^{-1})

c) trommeldiameter i halvfull tilstand (forutsetning for den gitte innhalingshastigheten)

d) effekt og dreiemoment tilført vinsjen ($\eta_{mek,v} = 0{,}97$). Kontroller dreiemomentet ved å bruke grunndefinisjonen på moment

e) effekt tilført pumpa i hydraulikksystemet ($\eta_{tot} = 0{,}70$)

f) teoretisk og effektivt disponibelt trykkfall i systemet ($\eta_{mh} = 0{,}88$)

Løsning:

a) Teoretisk volumstrøm:

$$\dot{V}_{teo} = V_p \cdot n_p = 0{,}5 \cdot 10^{-3}\ m^3 \cdot \frac{1500}{60}\ s^{-1} = \underline{0{,}0125}\ \frac{m^3}{s}$$

Effektiv volumstrøm:

$$\dot{V}_{eff} = \eta_{vol} \cdot \dot{V}_{teo} = 0{,}80 \cdot 0{,}0125\ \frac{m^3}{s} = \underline{0{,}010}\ \frac{m^3}{s}$$

b) Motorens volum: $V_m = \dfrac{\dot{V}_{eff}}{n_m} = \dfrac{0{,}010\ m^3/s}{0{,}417 s^{-1}} \cdot \underline{0{,}024\ m^3} = 24\ dm^3$

c) Trommeldiameter: $D_{tro} = \dfrac{v_{hal}}{\pi \cdot n_m} = \dfrac{1{,}7\ m/s}{\pi \cdot 0{,}417 s^{-1}} = \underline{1{,}3\ m}$

d) Effekt tilført vinsj: $P_m = \dfrac{F \cdot v}{\eta_{mek,v}} = \dfrac{80\ kN \cdot 1{,}7\ m/s}{0{,}97} = \underline{140\ kW}$

Dreiemoment tilført vinsj: $T_m = \dfrac{P_m}{\omega_m} = \dfrac{P_m}{2 \cdot \pi \cdot n_m} = \dfrac{140\ kW}{2 \cdot \pi \cdot 0{,}417 s^{-1}} = \underline{53{,}5\ kNm}$

Kontroll: $T_m = \dfrac{F \cdot D_{tro}/2}{\eta_{mek,v}} = \dfrac{80\ kN \cdot 1{,}3m/2}{0{,}97} = \underline{53{,}5\ kNm}$

e) Effekt tilført pumpe: $P_p = \dfrac{P_m}{\eta_{tot}} = \dfrac{140\ kW}{0{,}70} = \underline{200\ kW}$

f) Teo. disp. trykkfall: $\Delta p_{teo} = \dfrac{P_m}{\eta_{tot}\ \dot{V}_{teo}} = \dfrac{140\ kW}{0{,}70 \cdot 0{,}0125\ m^3/s} = 160\ bar$

Effekt. disp. trykkfall: $\Delta p_{eff} = \eta_{mh} \cdot \Delta p_{teo} = 0{,}88 \cdot 160\ bar = \underline{140\ bar}$

Kontroll: $P_m = \Delta p_{eff} \cdot \dot{V}_{eff} = 14 \cdot 10^6\ Pa \cdot 0{,}01\ m^3/s = \underline{140\ kW}$

Tap og virkningsgrader i et hydraulikksystem

Tapene kan deles inn i to grupper:

- *Volumetriske tap, som primært skyldes interne lekkasjer, for eksempel mellom tannhjul og sideveggene. Dette reduserer volumstrømmen fra pumpa og effektiv volumstrøm gjennom motoren, og dermed effektoverføringene fra pumpe til olje og videre til motoren. Virkningsgrader for hver av enhetene kan være 0,84-0,92. I eksempelet regner vi med 0,88 og 0,91 for hhv. pumpe og motor. For begge enhetene samlet blir da vol.-virkningsgrad 0,88 · 0,91= 0,80*
- *Mekaniske og hydrauliske tap pga. friksjoner (omformes til varme og krever ofte kjøling). Disse tapene reduserer trykkstigningen i pumpa og trykkfallet i motoren, og gir virkningsgrader lik hhv. 0,93 og 0,95. Samlet blir den mekanisk-hydrauliske virkningsgraden 0,93 · 0,95 = 0,88*

Den totale virkninggrad for hydraulikksystemet blir typisk:

$\eta_{tot} = 0{,}80 \cdot 0{,}88 = 0{,}70$

Med symbolbruk som på figur til venstre betyr dette at vi for et hydraulikksystem kan skrive:

$P_m = \eta_{tot} \cdot P_p$

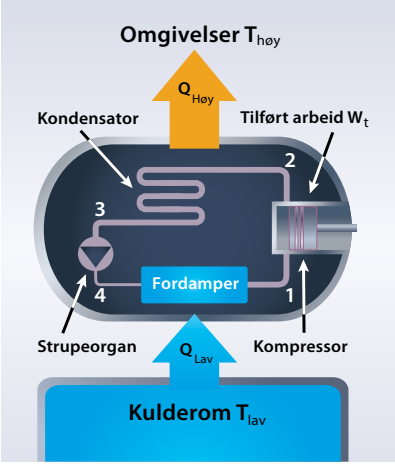
Vi har også

$P_m = \Delta p_{eff} \cdot \dot{V}_{eff}$

Trykkområder for hydrauliske systemer i fiskeflåten:
Lavtrykk: 25 – 70 bar
Middels trykk: 70- 210 bar
Høytrykk: 210 – 350 bar

Fiskeriteknologi

Kuldeprosesser. Hva er entalpi?



Prinsipiell oppbygging og virkemåte av en kuldemaskin
Maskinen har fire hoveddeler: kompressor, kondensator, strupeorgan og fordamper:

Energibalanse i kuldeprosess:
Tilført energi = bortført energi
$Q_{Lav} + W_t = Q_{Høy}$
W_t = kompresjonsarbeid ($\int p \cdot dV$)
+fortrenngningsarbeid ($p \cdot V$)
Q_{Lav} og $Q_{Høy}$ framgår av figur.

I stedet for virkningsgrad bruker vi i kuldeteknikken ofte begrepet kuldefaktor, som er forholdet mellom fjernet varme Q_{Lav} og brukt arbeid W_t : $\varepsilon = Q_{Lav} / W_t$
Det er godt mulig at $W_t < Q_{Lav}$ og dermed at kuldefaktoren $\varepsilon > 1$

Vi har foran sett på et hydraulikksystem, noe som er uunnværlig på dekket til enhver tråler. Et annet sentralt system om bord er kuldesystemet, enten dette omfatter bare nedkjøling og lagring av fisken i kjølt tilstand, eller nedkjøling av denne til fryst tilstand.

Virkemåten for et kuldesystem

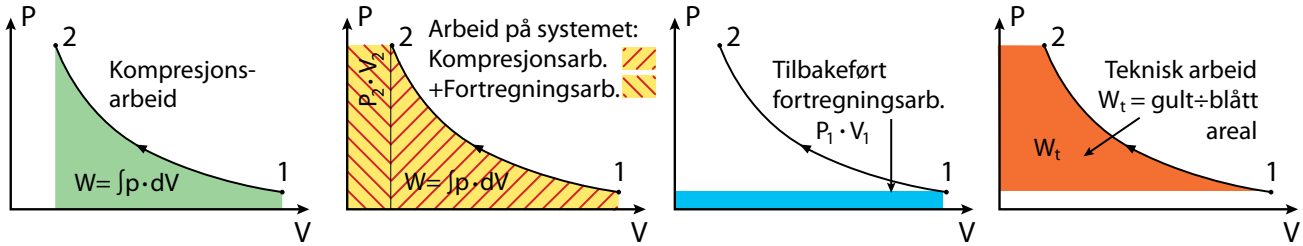
Kuldemedier. Et kuldesystem arbeider *syklisk* med for eksempel freoner, ammoniakk eller CO_2 som kuldemedium (se neste side). Dette er gasser som *veksler mellom damp- og væskefase, forutsatt at det arbeides med passende temperaturer og trykk.*

Fire hoveddeler i en kuldemaskin. Et kuldesystem virker på følgende måte (se figur i marg): Kuldemediet kommer inn i *kompressoren* som damp (punkt 1). Trykk og temperatur øker så under kompresjonen (1-2). I kondensatoren fjernes varme og dampen kondenserer til væske (2-3), og dette går videre til strupeorganet (forsnevring etterfulgt av tverrsnittsøking). Her synker trykket like mye som det steg i kompressoren (3-4). Temperaturen synker også (se figurtekst på neste side). Kuldemediet går videre til *fordamperen*, som er plassert inne i kulderommet. Fordi trykket nå er blitt lavt, fordamper væsken (4-1). Dette krever tilførsel av varme (fordampningsvarme, se eksempel side 1-10). **Fordampningsvarmen tas fra rommet hvor fordamperen er plassert. Her synker derfor temperaturen.**

Kompresjonsarbeid og entalpi

I en strømningsmaskin er fortrengningsarbeidet like viktig som kompresjonsarbeidet. Vi viser til det vi tidligere har sagt om kompresonsprosesser (se side 7–6/7). Du bør først "friske opp" denne delen av termofysikken. Det vi så på den gang, var en stempelforbrenningsmotor, hvor kompresjonen ble etterfulgt av andre prosesser i samme sylinder. I en kuldemaskin er derimot kompressoren en "selvstendig" enhet, hvor kuldemediet etter kompresjonen blir flyttet over til en prosess i en annen enhet.

Stempelforbrenningsmotorer ← → *Strømningsmaskiner (kompressorer og gassturbiner)*



Termofysikkens 1. lov
$Q = U_2 - U_1 + W$
Q=til-/bortført varme,
U_2-U_1=forandring indre energi

I stedet for indre energi U innføres en ny størrelse H for å ta hensyn til fortrengningsarbeidet p · V: **Entalpi H=U+pV.** Da lyder den samme loven som vist til høyre:

Termfysikken 1. lov
$Q = H_2 - H_1 + W_t$
W_t kalles nå teknisk arbeid
H_2 - H_1=forandring av entalpi

Bestemmelse av tilført mekanisk energi til kjølemediet i en kompressor.

Fortrengningsarbeid. Kuldemaskinen er derfor en "strømningsmaskin", og da må vi ta hensyn til hva det koster å flytte kuldemediet ut av kompressoren, og i første omgang videre til kondensatoren. Dette krever det vi kaller et *fortrengningsarbeid*. Noe av dette arbeidet får vi tilbake når kuldemediet kommer inn igjen på kompressoren mot slutten av syklusen. Alt dette tar vi enklest hensyn til ved å innføre en ny tilstandsstørrelse, som kalles entalpi. Termodynamikkens første hovedsetning får en ny form (se figur foran).

Kuldemedier

De fleste er aggresive klimagasser. Kuldemedier må ha passende fordampnings- og kondenseringstemperaturer ved de trykk som er aktuelle for kuldemaskiner. De vanligste kuldemedier har hittil vært ammoniakk (NH_3) og freoner (KFK-forbindelser, se side 12-20/21 om klimavirkninger). Nye kuldeanlegg i fiskebåter prosjekteres i dag (2013) med CO_2 som kuldemedier i stedet for de aggresive freonene.

Trykk-entalpi-diagrammer. Det finnes detaljerte diagrammer som gir oversikt over nødvendige data for alle de viktigste kuldemediene. Figurer til høyre viser to eksempeler. Vi ser at det framkommer tre avgrensede områder: et for damp, et for blandinger mellom væske og damp og et for ren væskeform. Diagrammene gir trykk (p) som funksjon av spesifikk entalpi (h, kJ/kg).

Kuldeprosesser i p-h-diagram og p-v-diagram

Syklisk prosess mot urviseren. En kuldeprosess som beskrevet på forrige side, er tegnet inn både i p-h–diagram og i et p-v-diagram i margen. Legg merke til at den sykliske prosessen går "mot" urviseren. Dette er karakteristisk for alle sykliske prosesser som krever *tilført energi*. I forbrenningsmotorer, som jo gir *utbytte* av mekanisk energi, går den sykliske prosessen "med" urviseren.

Eksempel. Dimensjonering av kuldeanlegg med CO_2 som kuldemedium i tråler

Vi har øverst på side 12-21 nevnt at tråleren i beregningseksempelet foran skulle være nybygd, og derfor utstyrt med et kuldeanlegg som brukte CO_2 som kuldemedium i stedet for de nå forbudte KFK-gassene (freonene). CO_2 som kuldemedium skiller seg fra freonene ved at den sykliske prosessen foregår både over og under det kritiske punktet CP, i stedet for å i sin helhet å ligge under dette punktet (se figur nederst i marg til høyre).

På side 12-21 framgår at nedfrysing av fangst og dekning av varmetap fra lagerrom om bord krever totalt 32 700 kWh tilført kompressoren på turen. For enkelhets skyld regner vi med en gjennomsnittsverdi for hele turen. Denne blir da på ca. 90 kW. **Oppgave:** Bestem i så fall nødvendig massestrøm på kuldemediet, bortført varmestrøm fra kulderommet og anleggets kuldefaktor.

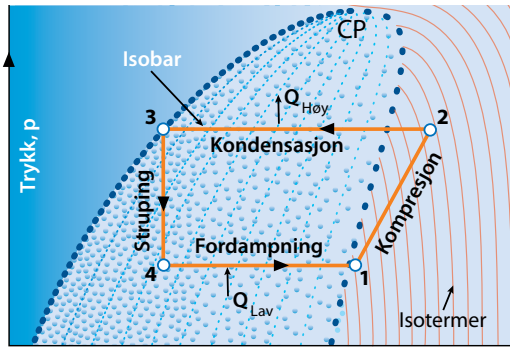
Kuldemediestrøm: $\dot{m} = \dfrac{W_t}{h_2 - h_2} = \dfrac{90\ \text{kJ/s}}{(524\ - 441)\ \text{kJ/kg}} = 1{,}08\ \dfrac{\text{kg}}{\text{s}}$

Bortført varmestrøm: $\dot{Q}_{Lav} = \dot{m}\,(h_1 - h_4) = 1{,}08\ \text{kg/s} \cdot 139{,}5\ \text{kJ/kg} = 150\ \text{kW}$

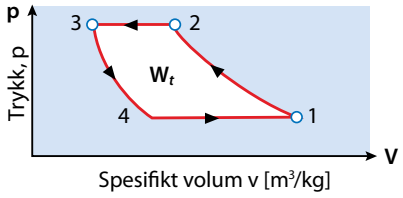
Kuldefaktor: $\varepsilon = \dfrac{\dot{Q}_{Lav}}{W_t} = \dfrac{150\ \text{kW}}{90\ \text{kW}} \sim \underline{1{,}7}$

I praksis blir fisken fryst ned så fort som mulig etter at den er tatt opp.

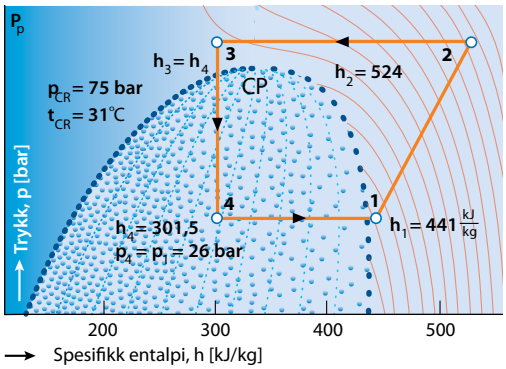
a.



b.



Skjematiske diagrammer for kuldeprosess basert på freon (KFK-forbindelse)
a. Trykk-entalpi (p-h)-diagram
b. Trykk-volum (p-v)-diagram
Struping (uten tap) er en prosess som foregår i rør med tversnittsøkning i strømretningen. Da synker trykk og temperatur, mens strømningshastighet og entalpi forblir konstant. Under fordampningen tilføres det varme til kuldemediet. Denne hentes fra kulderommmet.



p-h-diagram for kuldeprosess med CO_2 som kuldemedium.
Fordi alt mediet under prosessen er i gassform, må kuldemaskinen bygges opp med en gasskjøler i stedet for å bruke en kondensator til nedkjølingen. Ellers virker maskinen prinsipielt som forklart foran.

Fiskeriteknologi

Bærekraft og framtidens fiskefartøy, muligheter og utfordringer

Moderne tråler med to propeller

Reduksjon av trålmotstand.
Det er store muligheter for å redusere motstanden i trålnett, ved å ta i bruk ekstremt sterke og lette polyetylenfibre i nett og tauverk. Forsøk har vist at motstanden i en tråle er blitt redusert med opp til 20%. Foreløpig er materialet ekstremt dyrt, lite elastisk og relativt lite motstandsdyktig mot slitasje.

Utforming av skroget.
Skroget må gi minst mulig framdriftsmotstand og høyest mulig virkningsgrad under de svært varierende operative forhold et fiskefartøy møter når det gjelder hastighet, trim og dypgang. Myndighetene har i årtier lagt begrensninger på fartøylengden i mange flåtegrupper for å begrense fartøyenes fangstevne. Kystflåten består derfor av ekstremt brede «paragraf-båter» med høyt Froudes-tall (Fn) og stor motstand. Reglene er nå endret slik at det er lasteromsvolumet som begrenses. Dette gir mulighet for å bygge slankere skrog med lav Cp og lavt Fn, noe som gir lavere motstand og bedre propulsjonsforhold.

Bruk av to propeller.
Bruk av to propeller i stedet for én, kan gi en viss forbedring av propulsjonsvirkningsgraden under tråling. Ved tråling i sidevind må hekktrålere ofte bruke store rorvinkler, noe som gir økt motstand. Ved hjelp av to propeller kan fartøyet styres nesten uten bruk av roret.

Bruk av LNG i fiskeflåten.
Bruk av LNG kan bidra til en betydelig reduksjon av CO_2-utslippet, (15-20 %,) og en reduksjon av NO_x og SO_x fra 80 til 90 %. Den største utfordringen er at krav til sikkerhet og bruken av isolerte trykktanker fører til et mye større volumbehov enn MDO (Marine Diesel Oil), anslagsvis 3-4 ganger større. For mindre fiskefartøy vil dette føre til betydelige vansker.

Hybrid kystfiskefartøy, framdrift med batteri, LNG og vind.
For kystfiskefartøy som fisker med garn og line, kan en tenke seg et framdriftssystem basert på batteri som lades opp fra strømnettet, kombinert med strøm fra vindturbin om bord og LNG-drift av motor for ladning av batterier. RSW-systemet for lagring av fisk kan kjøles ved at det avgir varme til gassifiseringen av LNG til motorbrensel. Dermed unngås bruk av is eller kjølekompressorer om bord.

Bærekraft og framtidens fiskefartøy, muligheter og utfordringer

Fiskefartøy med redskap og utstyr blir nøkkelen til framtidens bærekraftige spiskammer i havet. Her ligger det -som vi ser -, mange spennende oppgaver og venter.

Karbonnøytral sjømatproduksjon.
Bruken av fossil energi er et betydelig problem for fiskeriene i bærekraftsammenheng, men muligheten for forbedringer er store og produksjon av drivstoff fra dyrking av makroalger (tare), vil på sikt kunne gjøre norsk sjømatproduksjon karbonnøytral.

Bærekraftige fiskerier.
Bærekraftige fiskerier avhenger av mange andre faktorer knyttet til økosystemorientert forvaltning av ressursene i havet. Dette innebærer omsorg for havmiljøet og hele det økologiske samspillet der.

Forvaltning.
Norge er et foregangsland når det gjelder metoder for overvåkning av fiskebestandene, mens mye gjenstår når det gjelder overvåkning av fangstaktiviteten av egne og utenlandske fartøyer. Det er sannsynlig at det fremdeles foregår et betydelige «tyvfiske» og dumping av biomasse fra både av egne og fremmede fartøyer. Gjennom internasjonalt samarbeid vil moderne teknologi (GPS etc.) gjøre det mulig å identifisere og registrere hvor enkeltfartøyer i norsk sone befinner seg, og etter hvert også å overvåke «i sann tid» fangstmengden som blir tatt om bord fra ulike fangstfelt. Eventuell dumping av fisk og avfall fra pro-duksjonen vil også kunne registreres, og det samme vil bruk av ulovlig redskap. Dokumenterbar registrering av størrelse og vekt på fisk og bifangst i det den kommer om bord, kan bli en realitet.

Lønnsomhet – sosial bærekraft.
Reduserte brenselsutgifter, effektiv og kvalitetsmessig trygg håndtering, samt bearbeiding og lagring av fangst og biprodukter vil bidra til økt lønnsomhet. Sosial bærekraft avhenger av lønnsomhet, og av evne til å tiltrekke seg kompetent arbeidskraft. Sikkerhet, arbeids- og bomiljø vil være viktige i denne sammenheng. Fiskeryrket har tradisjonelt vært et svært farlig yrke, og selv om risikoen er blitt sterkt redusert etter år 2000, er det behov for ytterligere innsats innen HMS. Utdanning, ergonomi og sikkerhetsstyring er viktige begreper her.

Framtidens fiskefartøy.
Fortidens fiskefartøy var alle flerbruksfartøyer, og ble brukt til å frakte både last, post og passasjerer. De fleste fiskefartøy midt på 1900-tallet var i stand til å delta i fiske etter både bunnfisk og pelagisk fisk, og kunne også fiske med flere redskapstyper. Havfiskeflåten er i dag relativt spesialisert, og kan sjelden fiske med mer enn to redskapstyper. I kystflåten krever bruk av flere redskapstyper et betydelig antall dekksmaskiner, noe som gjør arbeidsforholdene trange, uoversiktlige og farlige. Begrepet flerbruksfartøy har begynt å få en ny betydning. For å skaffe flere ben å stå på, utstyres fiskefartøy i økende grad for oljevern, for operasjon av ROV-er samt service i oljevirksomhet, havbruk og vindturbinparker. Dette kan bidra til en mer robust fiskeflåte.

Vindturbin med vertikal akse

Havbruksteknologi

Fôr, energi og CO_2-utslipp

Plommesekkyngel
Først blir befruktet rogn fra stamfisk klekket til øyerogn i løpet ca. 1,5 måned i egne avlsanlegg. Rogna sendes i iskjølte isoporkasser til oppdrettsanleggene langs kysten. Her holdes den i egne klekkerier (kar), hvor rogna etter ca. en måned klekker til plommesekkyngel. Først lever den av innholdet i plommesekken, og fôres siden med tørrfôr. Den kan nå ha fått en masse på ca.100 g. Etter ca.10 - 15 måneder kalles yngelen for henholdsvis "nullårssmolt" og "ettårssmolt". Vi skjønner at alle disse prosessene krever topp miljømessige forhold og omhyggelig arbeid fra røkterne.

Laksen starter livet i ferskvann i smoltanlegg på land.
Etter 9-16 måneder i slike ferskvannsanlegg er smoltene klare til å "utvandre" til sjøvann. Frakten skjer ved hjelp av spesielle brønnbåter (se figur side 12–34). Merdene er plassert på utvalgte lokaliteter, med god vanngjennomstrømning og gunstige miljøforhold. I merd-ene vokser så laksen fra 100 g til en slaktevekt på rundt 3-6 kg i løpet av 12-18 måneder, avhengig av blant annet vanntemperatur og fôring.

Generelt om oppdrett av fisk. Selv om oppdrett av laksefisk er helt dominerende i Norge, er det et stort potensial for oppdrett av andre arter. Viktige arter arter kan bli: torsk, kveite, blåskjell, kamskjell, østers, hummer, kråkeboller og berggylt. Det har vært en betydelig forskningsinnsats for å utvikle bærekraftig oppdrett av flere av disse artene. De tre som er kommet lengst er torsk, kveite og blåskjell. Potensialet antas å være stort, men den kommersielle produksjonen er svært liten. Ifølge side 12-11 var verdiskapingen i oppdrett av andre arter i 2010 bare 1,5 % av verdiskapingen for laksefisk. Derfor vil vi i det etterfølgende konsentrere oss om oppdrett av laks.

Generelt om livssyklusen. For første del av livssyklusen vises det til figurtekster i margen. For å opprettholde god vekst, helse og velferd er det viktig at miljøforholdene er optimale gjennom hele livssyklusen. Laksen trenger blant annet friskt og oksygenrikt vann, og de ulike livsstadiene har ulike krav til vanntemperatur, saltholdighet og lys. En ønsker også å få laksen opp i slakteklar størrelse før den blir kjønnsmoden, da modningen har en rekke negative konsekvenser for vekst, fôrutnyttelse, kvalitet, velferd og helse.

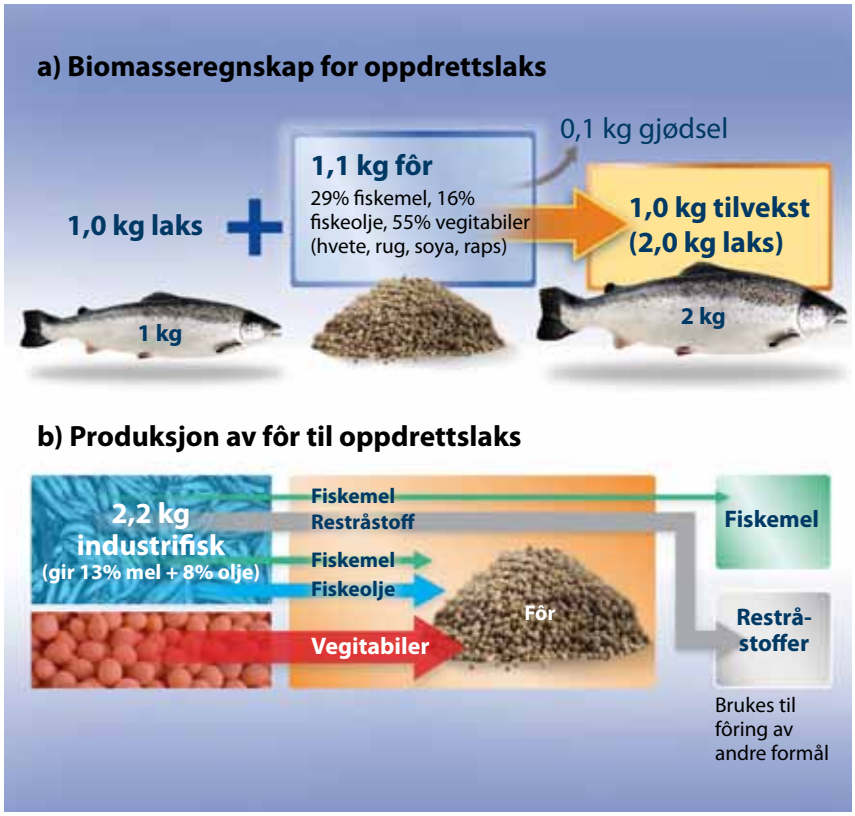
Fôrressurser

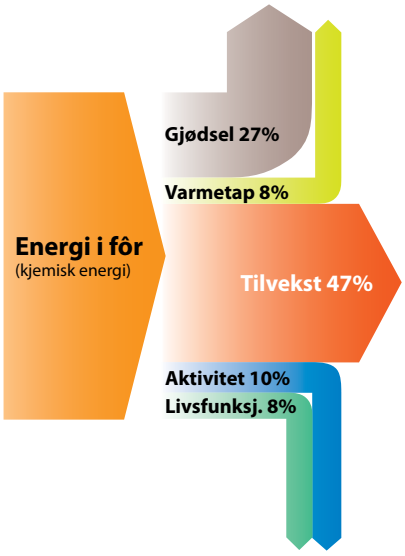
Laks er det mest ressurseffektive husdyret vi har. Laksen trenger høyt innhold av protein og fett i fôret. Tradisjonelt har det vært brukt fiskemel og fiskeolje som hovedingredienser i laksefôr, men grunnet knapphet på disse ressursene er det forsket mye i de siste årene på å erstatte dem med blant annet vegetabilske råvarer.

Oppdrettslaks utnytter fôret bedre enn andre dyr som blir brukt til kjøttproduksjon. 100 kg fôrblanding bestående av oljer, fiskemel, korn og soya gir henholdsvis 65 kg laksefilet, 20 kg kyllingfilet og 13 kg svinefilet.

Kanskje blir taredyrking den neste store vekstnæringen langs kysten. Vi har foran, på side 12-11, pekt på den enorme utvikling som forventes i oppdrettsnæringen i framtiden. Fôrproduksjonen vil selvsagt måtte få en tilsvarende utvikling, og altså bli av stadig økende betydning. Dette vil gjelde både etterspørsel av industrifisk (blant annet fra lavere trofisk nivå), planteråvarer fra landbruket og avfall fra fiskerier og landbruk. Ekstra interessant er imidlertid mulighetene til utnyttelse av tarevekster, ikke bare som råstoff for laksefôr og menneskemat, men også til produksjon av biobrensler.

Også fôrproduksjon gir CO_2-utslipp. Klimagassutslipp under produksjon av fôr må belastes det spisbare sluttproduktet, og er hovedgrunnen til at laksefileten i figuren på side 2-20 gir like store CO_2 - utslipp som torskefilet basert på fangst fra fiskeflåten. Dette kommer vi nærmere tilbake til på neste side.





Fôr for oppdrettslaks

a. Mengde og sammensetning av fôr, - tilvekst: *Laksen har en nesten utrolig effektivitet når det gjelder å utnytte fôret til å gi tilvekst. Med fôr av toppkvalitet trenger den ifølge [12.11] 1,1 kg fôr for å legge på seg 1,0 kg. Andre kilder [12.12] mener 1,2 kg gir et riktigere bilde.*

b. Produksjon av fôr. *En vesentlig del av fôret består av annen fisk (som vi for enkelhets skyld kaller industrifisk). Tar vi hensyn til at slik fisk gir en annen fordeling av mel og olje enn den som fôret skal ha, trenger vi 2,2 kg industrifisk til 1,1 kg fôr (se oppgave 12.9).*

c. Hvordan bruker laksen energien i fôret? *Legg merke til at laksen bruker mye mindre energi til aktivitet (10%) enn dyr på landjorda. Fra [12.11]*

CO_2-utslipp fra oppdrettsnæringen

Fangst av torsk og oppdrett av laks gir like store CO_2e-utslipp. Fiskeri og havbruk følger to helt forskjellige veier i produksjonen av fisk. Dette gir vidt forskjellige typer miljøbelastninger, men utslippet av CO_2e er forbausende nok det samme. Dette ser vi av søylene B og D i diagrammet på side 12-20. Søylene gjelder for fiske av torsk og oppdrett av laks. I begge tilfelle er utslippet ca. 2,0 kg CO_2e/kg fisk før filetering. Årsaken til den store likheten er først og fremst at oppdrettsfôret i betydelig grad er basert på marine råstoffer, fra industrifiskerier, som selvsagt må bære sin del av CO_2e-utslipp. Som vi har sett ovenfor, inneholder fôret også mer enn 50 % vegetabiler fra landbruk, men også disse er "beheftet" med CO_2e-utslipp gjennom gjødsling og innhøsting.

CO_2e-utslipp fra kjøttproduksjon i landbruket. Det vises til boks i margen. Her ser vi at kjøttproduksjon i landbruket per kg produkt belaster miljøet med vesentlig større CO_2e-utslipp enn fiskeriene. **Dette forholdet øker havets betydning i matproduksjonen.**

Klimagassutslipp fra produksjon av matvarer [kg CO_2e/kg kjøtt]

Kjøtt fra fisk. *Fra [12.7]*

Sild, rundfryst	*0,6*
Makrell, rundfryst	*0,65*
Torsk, fryst filet	*2,0*
Oppdrettslaks, fryst filet	*2,0*
Sei, fryst filet	*2,3*
Hyse, fryst sløyet	*3,3*

Kjøtt fra landbruk. *Fra [12.10]*

Kylling	*4,6*
Svinekjøtt	*6,4*
Rødt kjøtt, fra storfe	*15,8*
Rødt kjøtt, fra får	*17,8*

Utslippet fra fiskeproduktene omfatter CO_2, som kommer fra forbrenning av fossile brensler, samt kuldemedier fra kjøleanlegg omregnet til CO_2e-utslipp. Utslippet fra landbruksproduktene består av 10 % vanlig CO_2 og 90 % metan (CH4) og lystgass (N_2O). Metan dannes ved drøvtygging og i gjødsel. Lystgassen kommer fra kunstgjødsel brukt til dyrking av kraftfôr. Tallene bør betraktes som eksempler; det finnes flere kilder og metoder for beregning av utslippene, særlig for kjøtt fra landbruket.

Havbruksteknologi

Helse og velferd. Miljø og økologi

Vaksinasjon av laksesmolt

En glad laks?

Leppefisk spiser lakselus *(Foto: Marine Harvest)*

Helse og velferd

All laks vaksineres, men vi trenger mer kunnskap. I oppdrett samler en mange individer på et lite område, og fisken kan lett bli rammet av ulike bakterie- og virussykdommer eller av parasittinfeksjoner.
I dag blir derfor alle individene stikkvaksinert mot en rekke bakterie- og virussykdommer. En mangler imidlertid gode vaksiner mot alle virustypene som kan smitte laks. Andre smitteforebyggende tiltak er derfor også viktige for å forhindre eller begrense smittepress og spredning. Vaksinene kan også gi bivirkninger som er negative for fiskevelferden. En trenger derfor kunnskap om smittestoff, smitteveier og spredning, fiskens forsvarsmekanismer og hvordan en skal få vaksiner til å gi god beskyttelse uten negative bivirkninger.

Velferd. I oppdrett har vi ansvar for at fisken opprettholder god velferd, men det store antallet individer og vanskeligheter med både å måle miljøet samt overvåke individene i de store oppdrettsenhetene representerer en utfordring. I tillegg har vi fremdeles begrenset kunnskap om miljøkrav og tålegrenser for ulike miljøfaktorer, og oppdrettsprosedyrer i de ulike livsstadiene hos laks og hos annen oppdrettsfisk. Det er derfor viktig å frembringe slik kunnskap og å utvikle teknologi og metoder for å kunne overvåke velferd hos laks i oppdrett, samt å sikre oppdrettsmiljø som laksen kan mestre.

Lokalisering og miljøeffekter

Størrelse og plassering av merder. Mesteparten av lakseproduksjonen skjer i store merder i sjøen, og oppdrettsmiljøet blir da i stor grad bestemt av plassering og utforming av disse merdene. Oppdrettsmiljøet har stor betydning for fiskens trivsel og helse, samt for spredning av avfallsstoff fra laksen. Vannstrøm, oksygeninnhold, temperatur, bølger og saltholdighet er viktige miljøfaktorer i så måte. Dybden og størrelsen på merdene er viktig for laksens mulighet til selv å velge miljø, og fisketettheten har stor betydning for blant annet oksygeninnholdet i merdene.

Stor biomasse på et lite område kan overbelaste bæreevnen på en gitt lokalitet, og høy produksjon i et større område kan i sum gi uønskede regionale miljøeffekter: enten som overgjødsling, utslipp av smittestoff og lakselus, eller genetiske effekter av rømt fisk. Avstand mellom enkeltmerder og anlegg er viktig både med hensyn til punktbelastning av utslipp og smittespredning mellom anlegg.

Rømt fisk og økologiske effekter

Rømt laks kan gi genetisk endring. En god del laks og regnbueørret rømmer fra oppdrettsanleggene hvert år. Oppdrettslaksen er avlet fram fra en rekke norske villaksstammer fra tidlig på 1970-tallet. Regnbueørreten kommer fra vestkysten av Nord-Amerika. En del av den rømte laksen overlever, og vandrer tilbake til lakseelver der den kan krysse seg med villaks. Dette kan føre til genetisk endring av de ville bestandene. Rømt laks og regnbueørret kan også bringe med seg smitte ut i fjordsystemene og opp i elvene. Vi har fremdeles begrenset kunnskap om tålegrensen for slik genetisk påvirkning. Årsaker til rømning er illustrert i figur på neste side.

Er steril fisk en løsning? I tillegg til tiltak for å begrense og forhindre rømning, fins det også andre metoder for å unngå genetiske effekter på ville stammer. Det er nemlig relativt enkelt å produsere steril fisk ved å bruke trykksjokk på eggene like etter befruktning. Imidlertid har en ennå ikke nok kunnskap om alle de velferdsmessige og produksjonsmessige sidene ved en slik metode.

Fôrflåte og merd

En ny generasjon serviceskip

Åpne farveann er gunstig, men gir tøffe arbeidsforhold

Bærekraft og utfordringer

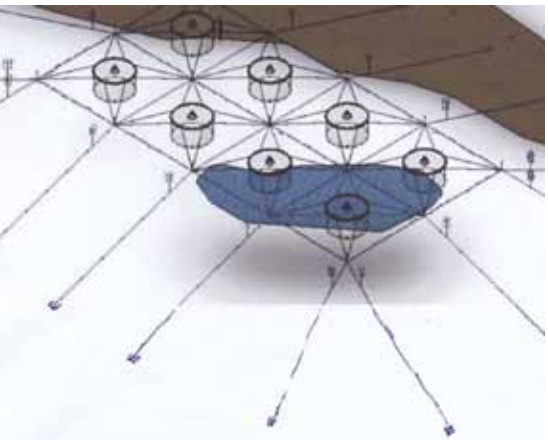
Hovedutfordringene for oppdrettsnæringen er å sikre framtidig bærekraft. Dette krever blant annet følgende tiltak:

- Vi må få mer kunnskap om fiskehelse, velferd og smittespredning.
- I tillegg til økonomisk og sosial bærekraft, må vi ta enda bedre vare på miljøet.
- De marine råvarene i fôrproduksjonen må produseres på bærekraftig vis. De viktigste fiskeartene som produseres i Norge, er rovfisk som i vill tilstand spiser omtrent 10 kg fisk for å legge på seg 1 kg.
- Spørsmål om arealbruk, konkurrerende bruk av havet, osv. blir viktige vurderinger i kommunenes kystsoneplaner.
- Biprodukter fra næringen må utnyttes i sin helhet.
- Rømning av oppdrettsfisk må stoppes.
- Parasitten lakselus på villaks har vært velkjent i generasjoner, og mengden av lus har variert sterkt fra år til år. Hensynet til villfisken og hensynet til helse og velferd i oppdrettsanleggene tilsier at lusenivået i merdene må holdes lavt. Dette er et betydelig problem.
- Klimapåvirkingen fra fiskeri og havbruk er i hovedsak knyttet til energibruk og CO_2-utslipp. Fiskeri og havbruk kommer godt ut sammenlignet med kjøttproduksjonen i landbruket.
- Utslipp av næringssalter (nitrater og fosfater) i havet utgjør et lite miljøproblem i Norge. En konsentrasjon av oppdrettsanlegg i områder med ugunstige strømforhold kan likevel føre til uheldige forhold lokalt. Anleggene må derfor plasseres i åpne farvann med gunstige strømforhold.

Havbruksteknologi

Merder og fôring

Detaljer fra en plastmerd
Utforming av bærende konstruksjon for merder bygget opp av plastrør, sveiset sammen til to konsentriske ringer. Rørene gir nødvendig oppdrift (se oppgave 12.5).



Fortøyning
Det er store krefter som kan virke på en merd, og kravene til fortøyning er strenge.

Årsaker til rømming av oppdrettslaks.

Målsettingen for boka tilsier at vi må begrense den plass vi kan bruke på beskrivelser av de teknologiske sidene ved havbruk. Vi vil derfor nøye oss med å se nærmere på hvordan fisken holdes i sjøen, fôres og transporteres til land for slakting.

Merdsystemer. I prinsippet finnes det fire typer merdsystemer:

- sirkulære, frittliggende merder, med trålposer hengt opp i ringformede konstruksjoner av plastrør, som gir nødvendig oppdrift i sjøen (se figur). Plastrørene har en viss elastisitet og deformeres på en passende måte i bølgegang
- firkantete, sammenbygde merder i stålkonstruksjoner, med sammenhengende gangveier rundt merdposene og med separate oppdriftselementer. Konstruksjonene blir stive og må utformes med ledd av hensyn til bølgepåvirkning. Brukes mindre og mindre.
- lukkede, flytende anlegg med tvungen vannsirkulasjon
- lukkede anlegg på land, med tvungen vannsirkulasjon

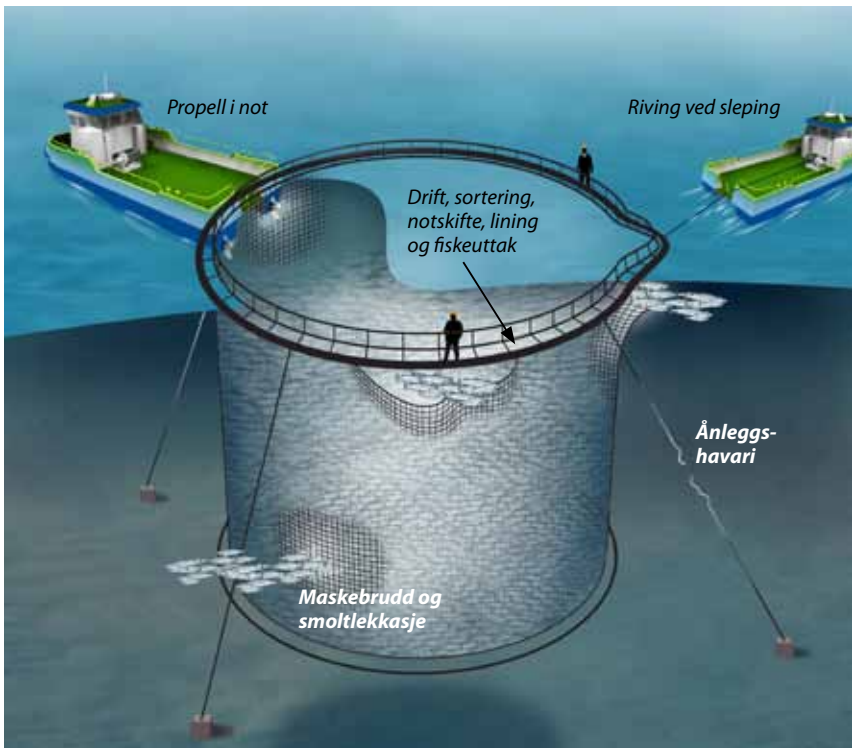
I dag er det nesten utelukkende den førstnevnte typen som er i bruk, men i framtiden kan kanskje lukkede anlegg bli mer interessante.

Oppbygging av runde plastmerder

160 m i omkrets. Hovedkonstruksjonen framgår av den øverste figuren. Merdene kan lages i forskjellige størrelser. De største kan ha en omkrets på 160 m. Det stilles meget strenge krav til utforming og styrke på alle deler av konstruksjonen.

Oppdrettsmengde. Mengden av laks som maksimalt kan gå i en merd er avhengig av merdens dimensjoner, fiskens størrelse og maksimal tetthet (antall fisk per m^3, se oppgave 12.10).

Rømning. Det er av største viktighet å hindre rømning av oppdrettsfisk. Nedenfor ser du mulige årsaker til at dette skjer.



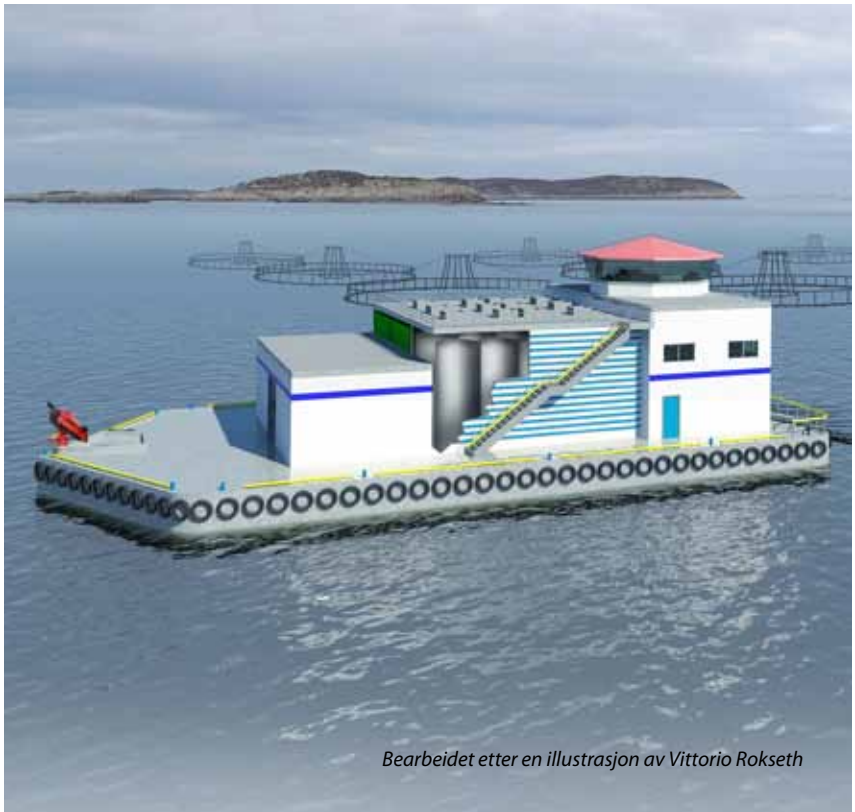
Fôring

Fôringen er det viktigste av alt i et havbruksanlegg. Den er av avgjørende betydning for fiskens helse, velferd og tilvekst, og dermed for anleggets sluttresultat. Fôrets sammensetning har vi omtalt foran. Det kommer fra egne fôrleverandører, som kontinuerlig driver utstrakt forskning for å finne fram til det beste produktet.

Automatisk fôring
Fôret leveres i form av pelleter, som ved hjelp av trykkluft fra fôrblåsere drives gjennom plastrør (fôrlinjer) ut til de enkelte merder. Pelleten lagres i siloer, enten på en landbase (som i denne figuren) eller på en fôringsflåte (som i figuren nedenfor). På vei ut fra siloen, passerer den fôrvelgere, som regulerer og registrerer type og mengde fôr, digitalt styrt av et program tilpasset fisken i hver merd. Både fôrtype, antall fôringer per dag og mengde per fôring bestemmes av fiskens alder. Årstid og vannets temperatur spiller også rolle. Alle nødvendige data er lagt inn i programmer som settes opp i samråd med fôrleverandøren.

Automatisk fôring. For å sikre en riktig fordeling til all fisken, skjer tilførsel til merdene og spredningen her automatisk (se figur med tekst nedenfor). Det brukes to forskjellige prinsipper for fôringen: måltidsfôring (appetittfôring) og døgnkontinuerlig fôring. Den førstnevnte metoden krever sensorer i merden (for eksempel TV-kameraer med overføring til kontrollrom). Her kan røkteren se når fisken er mett. En smolt kan ha en tilvekst på 2,5—3 % per dag hvis temperaturen er tilfredsstillende, mens en fisk på 4,5 kg under tilsvarende forhold kan legge på seg 0,5 %.

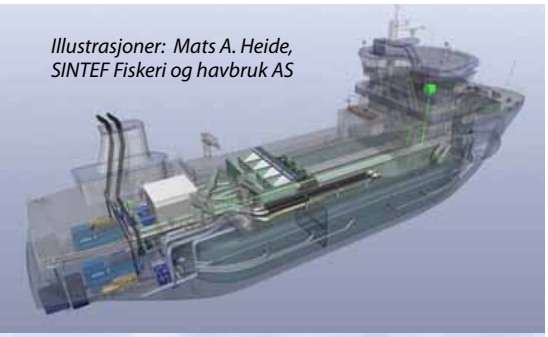
Fôringsflåter. Det blir mer og mer vanlig å styre fôringen fra egne fôrflåter i stedet for å gjøre det fra anlegg på land. Merdene flytter stadig lenger utover i fjordene, og adkomst over vei blir vanskeligere. I stedet må det benyttes sjøtransport, og nødvendige støttefunksjoner må bygges opp på flåter som stasjoneres på de nye oppdrettsstedene. Flåtene blir utstyrt med siloer for lagring av fôr, og med komplette fôringsanlegg inklusiv kontrollrom for alle de digitale systemene som etter hvert har blitt nødvendige i oppdrettsanlegg. En slik fôringsflåte er illustrert nedenfor.



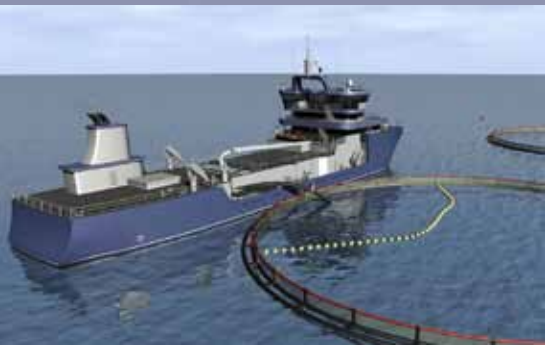
Fôringsflåte med siloer for lagring av fôr, fôringsanlegg for en rekke merder, kontrollrom for styring av fôringsanlegget og registrering av fôringsdata, fiskens tilstand, miljødata, osv. *Registrering av miljøet kan blant annet omfatte vannets temperaturer og oksygeninnhold, bølgehøyder og strømforhold. Flåten inneholder også oppholdsrom og lugarer for driftsteknikere, røktere og annet personale.*

Havbruksteknologi

Brønnbåter, lasting og lossing



Illustrasjoner: Mats A. Heide, SINTEF Fiskeri og havbruk AS



Smitte av sykdommer tas meget alvorlig i oppdrettsnæringen. Les nedenfor om hvordan dagens brønnbåter har omfattende og avansert utstyr for å hindre spredning av smittsomme sykdommer

Mange av fartøyene er arrangert for transport av levende fisk i både åpne og lukkede systemer. De er spesielt utstyrt for å ha full kontroll på alt sirkulert vann som strømmer gjennom lasterommet, og har avlusingssystemer. Både lossing og lasting kan foregå gjennom fisketellere og maskiner for størrelsessortering. Nyere fartøyer har ozon desinfeksjonsanlegg, system for overvåking og regulering av oksygen- og PH-nivå i vannet i lasterommet. De har også oksygerings- og resirkulasjonssystem for føring av fisken i lukket system, RSW-anlegg, automatisk vaskesystem for lasterom og rørsystem, samt UV-anlegg for desinfisering av sirkulert vann til og fra lasterommet m.m.

Virksomhet til sjøs medfører nesten alltid bruk av båter i en eller annen form. I havbruk er det blant annet behov for persontransport til og fra merdene, diverse "servicebåter" for arbeid med vedlikehold av nøter, merdkonstruksjoner og fortøyninger, samt spesialbåter for transport av levende fisk til og fra merdene. Slike båter kalles gjerne brønnbåter, og vi skal se litt nærmere på disse

Gammel metode for transport av fisk med skip. Brønnbåter har rom eller "brønner"- hvor friskt sjøvann sirkulerer, slik at fisken kan føres levende. Friskt vann kan strømme inn i brønnen gjennom inntak forut, drevet av båtens fart gjennom vannet, og forsvinne ut igjen gjennom ventiler akterut. Levende fisk er blitt transportert med skip på denne måten i lange tider. For eksempel sendte islendingene levende fisk til England med seilskip på slutten av 1800-tallet.

Når det gjelder stabilitet, må fartøyene konstrueres for å håndtere fri overflate-effekten (se side 2–19).

Flere behov for transport av levende fisk. I dag omfatter behovene først og fremst transport fra oppdrettsmerd til slakteri og foredlingsanlegg. Det er også behov i fiskeriene for fangst av fisk som skal settes i merd for oppfôring eller lagring. Dette blir gjort for å sikre pålitelig tilgang på fisk til ferskfiskmarkedene, som når fangstene er små på grunn av dårlig vær.

Fisk kan også bli sjøsyk. En del arter blir "sjøsyke" i dårlig vær. Kraftige akselerasjoner fører til at gassen kan presses ut av svømmeblæra, slik at fisken synker til bunns. Her blir den fort liggende i hauger, og vil så dø av mangel på oksygen. For å forhindre dette presses sirkulasjonsvannet opp gjennom en flat, perforert dobbeltbunn.

Lasting og lossing. For å unngå skader på fisken, tas vakuumpumper i bruk ved lasting og lossing av fisk. For å oppnå enda bedre kvalitet på fisken, kan en sette trykk på lasterommet slik at fisken kan "blåses" inn i slakteriet på en meget skånsom måte. Ved å avkjøle vannet i tanken under transporten (RSW), oppnår en å redusere stoffskiftet i fisken slik at den blir roligere. Dette gir bedre kvalitet på fiskekjøttet etter slakting, og dessuten blir bakterieveksten under og etter slaktingen redusert. Enkelte båter har muligheter for å la fisken svømme inn i båten uten bruk av pumping.

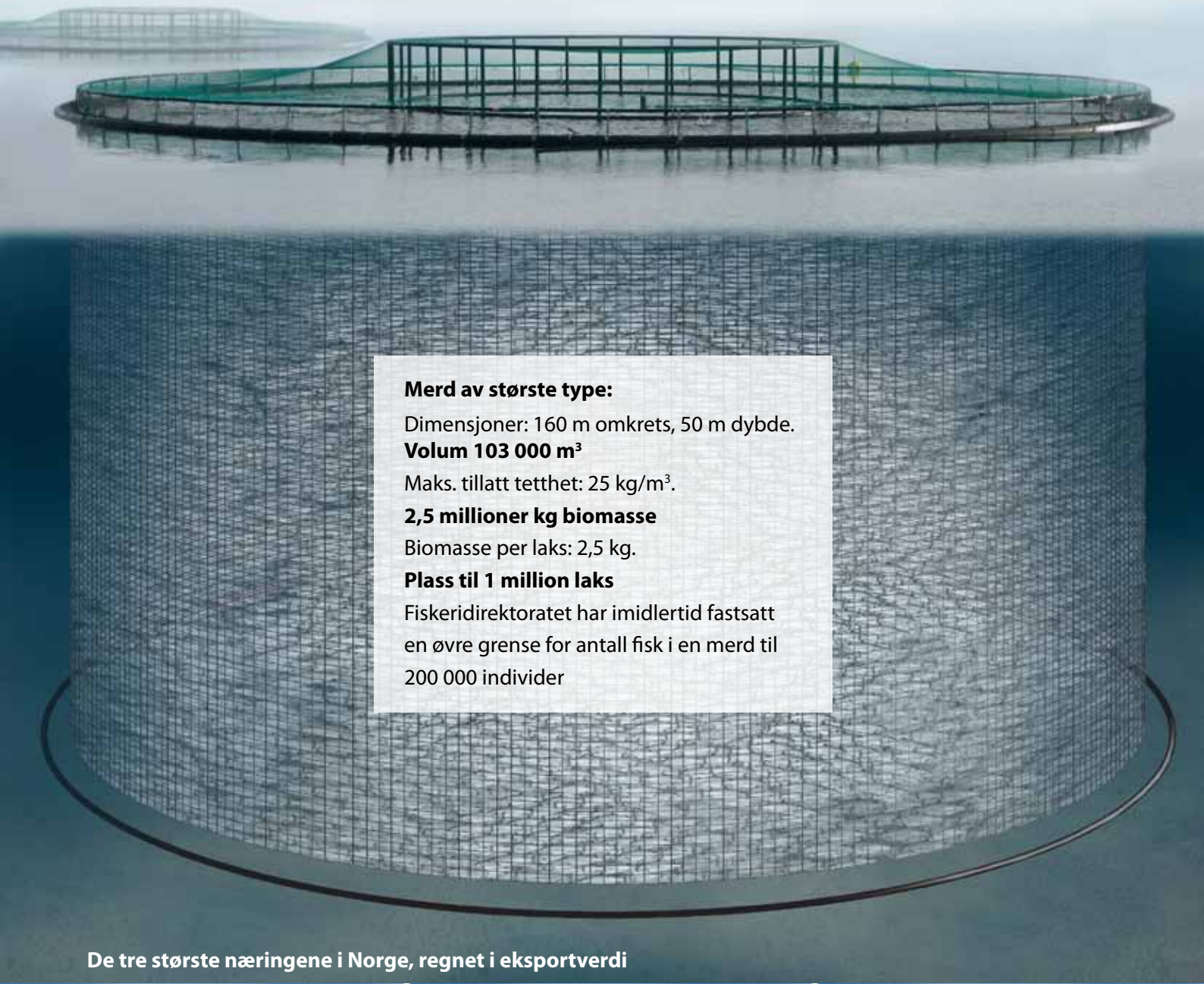
Store brønnskip. I oppdrettsnæringen har disse skipene økt i størrelse. I 2011 var typiske lengder omkring 70 m og tankkapasiteten ca. 2000 m^3. Med 200 kg fisk per m^3 gir dette en kapasitet på 400 tonn per tur.

Framtidig utvikling av norsk havbruk

Det vises til det vi tidligere har uttalt om framtidig utvikling av havbruk i Norge på side 12-11samt framtidige utfordringer for havbruk på side 12-29.

Havbruksteknologi

Enorme mengder laks og verdier i en merd



Merd av største type:

Dimensjoner: 160 m omkrets, 50 m dybde.
Volum 103 000 m³

Maks. tillatt tetthet: 25 kg/m³.
2,5 millioner kg biomasse

Biomasse per laks: 2,5 kg.
Plass til 1 million laks

Fiskeridirektoratet har imidlertid fastsatt en øvre grense for antall fisk i en merd til 200 000 individer

De tre største næringene i Norge, regnet i eksportverdi

Oppgaver

Hoveddata
Lengde i vannlinje 70,0 m
Bredde 15,0 m
Dypgang under utreise 5,65 m
Fart, ut- og hjemreise: 15 knop
Data for tråL og tråling:
To tråler brukes samtidig
Trålefart: 4,2 knop
Slepekraft per tråL: 120 kN
Fangstrate per tråL: 1,05 tonn/t
Tid med tråler ute før hal: 4,0 h
Data for vinsj, innhaling og hydraulikksystem:
Innhalingskraft per tråL: 105 kN
Innhalingsfart på tråL: 1,8 m/s
Trommeldiameter: 1,5 m
Mek.virkningsgrad for vinsj: 0,95
Tid på en innhaling: 0,5 h
Geometr. volum pumpe: 0,6 dm^3
Turtall på pumpe: 1500 o/min
Virkningsgrader for hydraulikk:
- Mekanisk-hydraulisk: 0,88
- Volumetrisk: 0,80
- Total: 0,70

Virkningsgrader og spesifikt brenselsforbruk for tråler

	Mekaniske energibehov som dekkes av hovedmotor	Mekansik virkningsgrad for kraftoverføring	Propulsjons virkningsgrad	Spesifikt brenselsforbruk for hovedmotor
Ut/hjem		0,98	0,55	0,20
Leting		0,94	0,52	0,30
Tråling		0,96	0,50	0,22
Frysing		–	–	0,25
Skyting,		–	–	–
haling,		–	–	0,30
tømming		–	–	–
Elektriske energibehov for drift av utstyr i fabrikk og generelt utstyr om bord, dekket av hjelpemotor				0,24

Størrelsene er avhengig av belastning og turtall (se for eksempel figur side 7–20).

Oppgave 12.1
Se side 12-11 med oversikt over verdiskapinger i næringene i den norske sjømatklyngen i 2010 og antatte verdiskapinger i 2050.
a) Beregn alle verdiskapingene i prosent av totalene.
b) Kommenter utviklingen innen de viktigste av disse næringene.
c) Hva menes med "marine ingredienser"?

Oppgave 12.2 (gruppearbeid for 2-3 elever)
Gruppen skal i denne og etterfølgende gruppeoppgaver gjøre diverse beregninger for en fabrikktråler som har hoveddata som vist i margen. Tråleren har hjemmehavn i Ålesund og skal fiske i Barentshavet, ca. 720 nautiske mil borte. Den gjør **11 turer à 4 uker** i løpet av et år. Oppgavene går først og fremst ut på å beregne brenselsforbruk under de ulike operasjoner som fabrikktråleren gjennomfører under en slik tur, samt beregne totalt CO_2-utslipp under turen og per kg fangst. Tråleren har en mellomhurtig hovedmotor på 4000 kW
a) Bruk dataprogrammet Freeship til å fastlegge fartøyets volumdeplasement og en graf for motstandseffekten som funksjon av fart under utreisen.
b) Skipet er utstyrt med maskineri som nevnt under hoveddata. Beregn brenselsforbruket til framdrift under utreisen. Gå fram som vist i beregningseksempel på side 12-19. Aktuelle virkningsgrader og spesifikt brenselsforbruk framgår av tabell i margen.
c) Under hjemreisen har skipets deplasement økt med ca. 500 tonn (forskjell mellom fangst og brenselsforbruk). Bruk Freeship til bestemmelse av ny dypgang og dermed ny graf for motstandseffekt. Beregn brenselsforbruket til framdrift under hjemreisen.

Oppgave 12.3 (gruppearbeid)
Tråleren må i løpet av en tur bruke 30 % av tiden den er ute, til å lete etter fisk. For enkelhets skyld kan gruppen regne med at letingen hele tiden foregår med en hastighet på 9 knop. Bruk en middelverdi av effektgrafene og bestem samlet brenselsforbruk under letingen.

Oppgave 12.4 (gruppearbeid)
Tråleren fisker med to tråler samtidig. 45 % av den tiden tråleren er ute per tur, brukes til tråling Diverse data er gitt i boks i margen. En fangstrate på 1,05 tonn/h kan synes lav, men er en gjennomsnittsverdi for et helt år Trålene er typisk ute 4,0 timer før de hales inn.
a) Hvor stor effekt må hovedmotoren yte under trålingen?
b) Beregn totalt brenselsforbruk og total fangst under trålingen.

Oppgave 12.5 (gruppearbeid)
For innhaling av de to trålene brukes to hydraulisk drevne vinsjer som vist på side 12-22. Data for innhaling av en tråL og tilhørende data for vinsj- og hydraulikksystem er gitt i margen på neste side. Hydraulikksystemets pumpe er koblet til kraftuttak på hovedmotoren. Beregn:
a) nødvendig turtall, dreiemoment og tilført effekt på vinsjen
b) effekt fra hydraulisk motor og tilført effekt til pumpe.
c) teoretisk og effektiv volumstrøm fra pumpe, og teoretisk og effektivt, disponibelt trykkfall i hydraulikksystemet
d) totalt brenselsforbruk i løpet av alle hal

Oppgave 12.6 (gruppearbeid)
Fryseanlegget om bord i tråleren bruker CO_2 som kuldemedium. Kuldeprosessen er som vist på side 12-25, med entalpidata som notert. Fryserommet om bord er på 1130 m^3. Kompressoren er koplet til kraftuttak på hovedmotoren. Fryseanlegget er dimensjonert slik at det kan fryse ned inntil 40 tonn fiskeprodukter per døgn.

a) Bruk erfaringsverdier for trålerens kuldebehov på side 12-18 til å regne ut den effekt som må tilføres kuldeanleggets kompressor i perioder med maksimalt kuldebehov. Beregn sirkulert strøm av kuldemedium per tidsenhet og kuldefaktorens størrelse.
b) Beregn totalt brenselsforbruk på hovedmotoren per tur. Regn med at fryserommet skal være operativt hele tiden, og at alle produktene fra fangsten skal ha blitt nedfryst i løpet av turen.

Oppgave 12.7 (gruppearbeid)
I oppgavene foran er det verken tatt hensyn til energibehov til drift av utstyr for bearbeiding av fangsten eller andre behov for elektrisk energi ombord under turen. Dette skal vi gjøre ved å anta at tråleren er utstyrt med en mellomhurtig hjelpemotor på 1500 kW. Vi antar videre at denne i gjennomsnitt yter 300 kW under hele turen. Inkluderes brenselsforbruket for hjelpemotoren kan det da til slutt settes opp en fullstendig oversikt over brenselsforbruket for fabrikktråleren under turen.

a) Beregn hjelpemotorens brenselsforbruk for hele turen .
b) Ved å fylle ut tabellen i margen skal det lages en sammenstilling av de totale brenselsforbruk for trålerens operasjoner under turen.
c) Beregn energiforbruket målt i kg brensel/kg fangst (rund fisk).

Oppgave 12.8
a) Bruk verdien fra punkt c) i oppgave 12.7 til å beregn fabrikktrålerens CO_2-utslipp per kg fangst (rund fisk). Se side 12.20. Hvor stor fangst gir et utslipp på 1,0 kg CO_2?
b) Hvor langt kan en middels stor personbil kjøre før den har sluppet ut 1,0 kg CO_2? Data framgår av figur i margen.
c) Hvor mye kyllingfilet kan produseres før dette har gitt et CO_2-utslipp lik 1,0 kg? Data i margen.

Oppgave 12.9
Det vises til figur side 12-29, hvor fôrfaktoren for oppdrettslaks er oppgitt til 1,1. Fôret består av 55 % vegetabiler, 29 % fiskemel og 16 % fiskeolje. De sistnevnte bestanddelene kommer fra industrifisk som gir 23 % mel og 8 % olje.

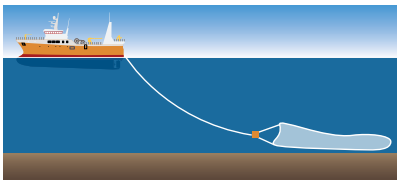
a) Beregn hvor mye industrifisk som må fanges for å lage 1,1 kg fôr.
b) Hvor mye fiskemel og andre rester fra industrifisken blir det til overs fra produksjonen av 1,1 kg fôr?

Oppgave 12.10
En rund laksemerd har en omkrets på 120 m og en dybde på 40 m. Laksene som går i merden har i gjennomsnitt en biomasse på 2,3 kg, og gir en tetthet på 24 kg biomasse per m^3 volum i merden.

a) Beregn merdens volum og antall laks den inneholder.
b) Beregn hvor mange kyr à 400 kg som tilsvarer samme biomasse som laksene i merden.

Operasjoner	Tid Timer (%)	Brenselsforbruk Tonn (%)
Ut /hjem		
Leting		
Tråling		
Haling 1)		
Tømming + skyting	34 (5)	~ 0101
Elkraftbehov til bearb, av fangst + generelt	2)	
Frysing	2)	
Totalt		

1) Begge tråler hales samtidig. varighet: 0,5 time
2) Skjer parallelt med annen aktivitet



$0{,}39\ \frac{kg\ diesel\ brensel}{kg\ fangst\ (rund\ fisk)}$

$0{,}52\ \frac{dm^3\ bensin}{mil\ blandet\ kjøring}$

Tetthet for bensin: $0{,}75\ \frac{kg}{dm^3}$

$2{,}5\ \frac{kg\ CO_2}{kg\ kyllingfilét}$

Figur til oppgave 12.8:
Tre prosesser som alle gir et utslipp på 1,0 kg CO_2:
- fiske med trål
- drift avmellomstor personbil
- produksjon av kyllingfilet

Referanser

12.1 Verdiskaping basert på produktive hav i 2050. Rapport fra en arbeidsgruppe oppnevnt av Det Kongelige Norske Videnskabers Selskab (DKNVS) og Norges Tekniske Vitenskapsakademi (NTVA). 2012.

12.2 Torger Reve og Amir Sasson: Et kunnskapsbasert Norge. Univerditetsforlaget. 2012.

12.3 Rolf Danielsen, Ståle Dyrvik, Tore Grønlie, Knut Helle, Edgar Hovland: Grunntrekk i norsk historie. Universitetsforlaget. 1991

12.4 Statistisk årbok 2010.Statistisk sentralbyrå. 2010

12.5 Fikeridirektoratet: Fiskefartøy og fiskarar, konsesjonar og årlege deltakaradgangar, år 2011. Bergen 2012

12.6 Erwin M. Schau, Harald Ellingsen, Anders Endal, Svein Aa. Aanondsen: Energy consumption in the Norwegian fisheries. Publikasjon i Journal of cleaner Production. Number 17. 2009. Elsevier Ltd.

12.7 Friederike Ziegler, Ulf Winther, Erik Skontorp Hognes, Andreas Emanuelsson, Veronica Sand, Harald Ellingsen: The Carbon Footprint of Norwegian Seafood Products on the Global Seafood Market. Publikasjon i Journal of Industrial Ecology. Yale University. 2012.

12.8 Tabeller og offisielle omregningsfaktorer. Fiskeridirektoratet, 200x

12.9 Det Norske Veritas: Fish 2012, DNV Innovation Project

12.10 Framtiden i våre hender: Mitt klima. Kilde Sosial- og helsedirektoratet: Utviklingen i norsk kosthold 2007

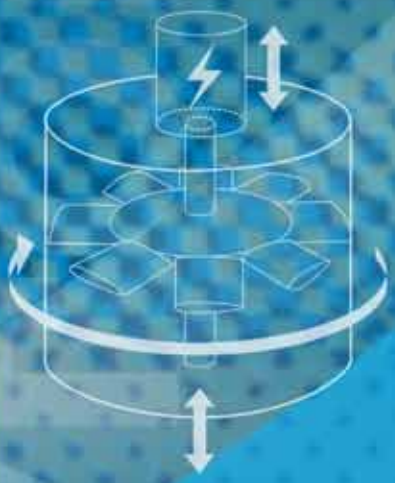
12.11 Bernt Bjerkestrand, Terje Bolstad, Svein-Johan Hansen: Akvakultur. VG2 Forlaget Vett & Viten. 2011

12.13 Bellona: Forregnskap for oppdrett av laksefisk. www.bellona.no/Havbruksweb

Forfattere: Jørgen Hals og Leif Lundby

Fornybar energi til havs

Havromsteknologi



Innhold

Innledning....2
Vindkraftverk....4
Bølgekraftverk....6
Vind- og bølgeressursen....8
Tidevannskraftverk....10
Referanser....12

NTNU
Institutt for marin teknikk

13

Vi har gjentatte ganger foran påpekt at utslipp av CO_2 fra forbrenning av fossile brensler må reduseres. Det er i prinsippet tre måter å gjøre dette på:

- modifisere teknologiske prosesser og løsninger slik at de blir mindre energikrevende
- fange inn CO_2 –gassen og deponere/eller lagre den på et trygt sted, slik at den ikke slippes ut til atmosfæren
- bruke fornybare energiformer i stedet for fossile brensler

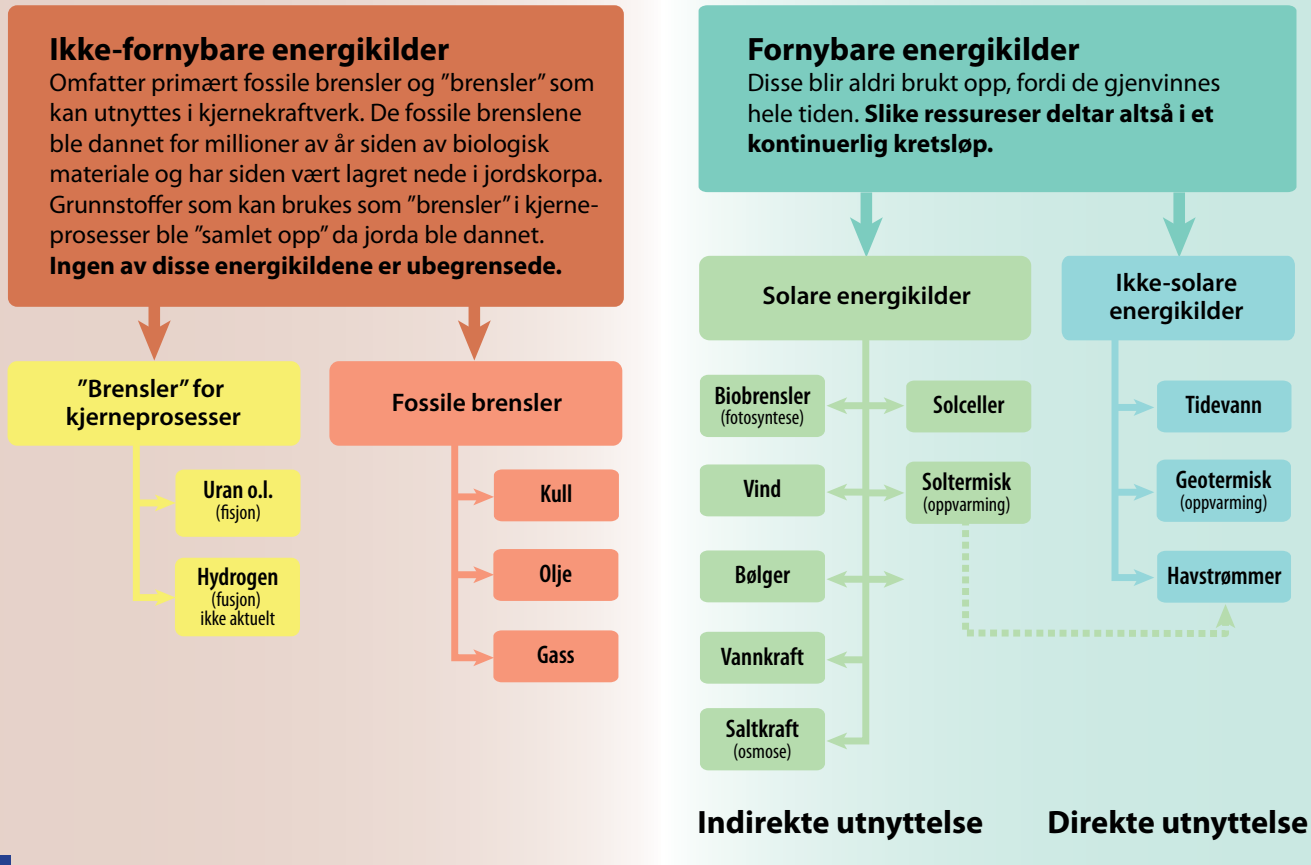
Vi skal i dette kapitlet se nærmere på hvilke muligheter som da eksisterer.

Oversikt over fornybare energikilder i verden

Disse er systematisert i figuren nedenfor. Det vises også til tabellen på side 7-8/9 om produksjon av mekanisk og elektrisk energi til havs. Av de fornybare energikildene som er mest aktuelle til havs, skal vi i dette kapitlet se nærmere på vindkraft, bølgekraft og tidevannskraft, som med en fellesbetegnelse ofte kalles havenergi. Av disse er det særlig vindkraften som foreløpig er mest lovende.

Energikilder som kan bli aktuelle på lengre sikt er biobrensler, solceller og utnyttelse av saltkraft. Disse skal vi omtale kort på neste side.

Energikilder i verden



Produksjon av fornybar energi til havs

Biobrensler for dieselmotorer i skip

Vi har flere ganger foran (se blant annet side 7-26) pekt på betydningen av biobrensler og det som karakteriserer disse: lite netto utslipp av CO_2, fordi de egentlig består av kortidslagret solenergi produsert av nylige fotosynteser. Vi har imidlertid også nevnt at produksjon av biobrensler kan komme til å måtte konkurrere med matproduksjonen i verden. Særlig når vi tenker på de enorme energibehovene som skipsfarten allerede i dag har, og at jordas befolkning kan komme til å vokse til nærmere 9 milliarder i løpet av noen få tiår, blir et slikt konkurranseforhold svært relevant.

Bruk av biobrensler kan imidlertid bli meget viktig hvis havet kan utnyttes til produksjon, for eksempel ved hjelp av alger.

Solceller til framdrift av skip

Det vises til fysikken (for eksempel *Ergo*, Fysikk 1) når det gjelder virkemåten til solceller. Fordi den elektriske effekten fra et solcelleanlegg er begrenset av solfangerarealet og virkningsgraden, vil tilgjengelig elektrisk effekt bli svært beskjeden i forhold til ytelsene i dagens konvensjonelle skipsmaskinerianlegg. Dermed blir det ekstra viktig å redusere alle tap forbundet med framdriften. Forslag til skip drevet av solcellepaneler har derfor oftest en oppfinnsom og alternativ utforming (se figur til høyre). Foreløpig er ikke dette aktuelt.

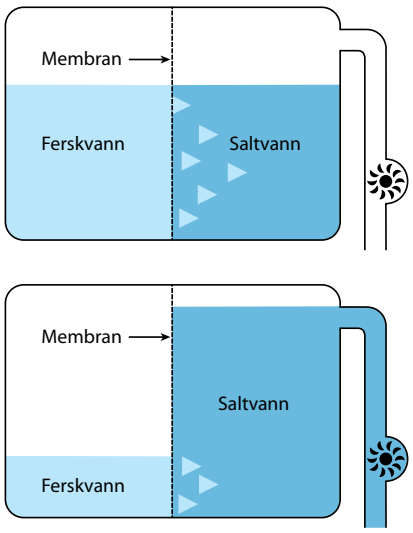
Wallenius Wilhelmsen E/T Orcelle
Framtidens skip? Skipet har både solcellepaneler og seil (dreibare) som leverer energi til framdrift. Samtidig har skroget svært liten motstand.
(www.wilhelmsen.com)

Andre fornybare energikilder

Ser vi på oversikten over fornybare energikilder på forrige side, ser vi at det er noen som fortsatt ikke er nevnt.

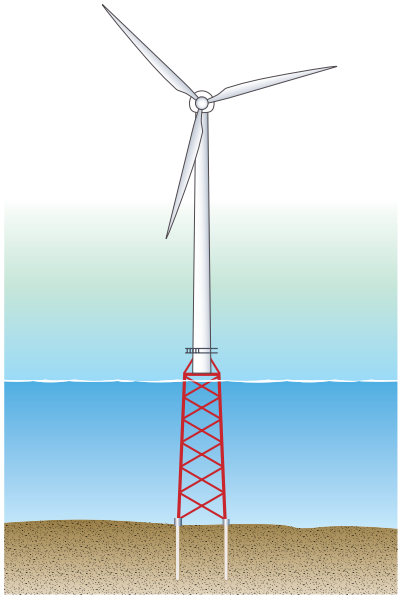
Saltkraft (osmose). I et saltkraftverk sørger man for at saltvann og ferskvann møtes, men atskilles av en tynn membran som slipper ferskvann gjennom, mens saltvannet stoppes. Dette fenomenet kalles osmose. Det kan utnyttes til å drive en vannturbin, som vist i figur til høyre. Det osmotiske trykket mellom ferskvann og sjøvann svarer til en vannsøyle på 240 m. I Norge eksperimenteres det med et pilotanlegg i Drammenselva. Slike anlegg kan bygges alle steder hvor saltvann møter ferskvann, altså ved utløpet av elver. Turbinen er av samme type som brukes i vanlige vannkraftanlegg på land.

Utnyttelsen av det osmotiske prinsippet er nevnt for å gjøre oversikten på forrige side komplett, men verken vanlig vannkraft- eller saltkraftanlegg "hører hjemme" i en bok med tittel *Havromsteknologi*. Det samme gjelder også geotermiske og stort sett de soltermisk energikildene. Disse utnytter termisk energi i jorda eller termisk energi overført fra solstrålingen, noe som kan bety mye der hvor forholdene ligger til rette for det (i tropene kan også oppvarmingen av havvann teoretisk utnyttes).



Prinsipp for saltkraftanlegg
Vannturbinen driver en generator for leveranse av elektrisk energi, som kan knyttes til et elektrisk nett for videreføring av energien.

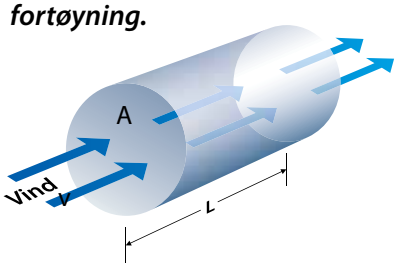
Vindkraftverk



Bunnfast vindturbin.

❶ *Gir med tre trinn (kan utføres med ett trinn hvis generatoren lages med mange nok polpar).*
❷ *Elektrisk generator.*

Flytende vindkraftverk med fortøyning.



Masse av luft: $m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot L$
Kinetisk energi i et luftvolum:
$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot L \cdot v^2$
Luftvolum med vind.

Oppbygging av faste og flytende vindkraftverk

Bunnfaste anlegg krever solid fundamentering. Å lage vindturbiner for plassering på havet er en utfordrende oppgave. De aller fleste forslagene til utforming vi har sett så langt, bygger direkte på det som har utviklet seg til å bli standardløsningen på land, nemlig trebladede turbinhjul montert på en horisontal akse. På land støper man gjerne et flere hundre tonn tungt betongfundament for å holde turbin og tårn på plass. Er vannet grunt nok, kan man feste vindturbintårnet i bunnen også på havet. Slike anlegg er allerede bygd i flere land, og EU har definert havvindkraftverk som en viktig brikke i overgangen til fornybaralderen.

Flytende anlegg må ha tilfredsstillende stabilitet. Er vannet dypt (typisk dypere enn ca. 50 meter), må vindkraftverket lages flytende. Den første utfordringen for slike vindturbiner er å sikre at den flytende konstruksjonen er stabil, det vil si at den ikke krenger for mye eller velter rundt når vinden står på. Denne utfordringen er akkurat som for skipsbygging, som diskutert i kapittel 2, men i og med at vinden virker på rotoren med en stor kraft høyt over vannflaten, må et flytende fundament for vindturbiner utformes ulikt fra skipsskrog. Vi lærte tidligere at stabilitet kan sikres på to måter: enten ved å sørge for å ha tyngepunktet langt nok nede, eller ved å ha et stort nok bærende areal ut fra senteraksen i vannoverflaten. Eksempler er vist til venstre, og på side 5-30.

Virkemåte

Løftekrefter på rotorbladene gir dreiemoment på rotoren. Vinden gir krefter på turbinbladene på samme måte som for en flyvinge. Denne virkemåten har vi beskrevet nærmere på sidene 3-22 og 3-25 for en hydrofoil og et propellblad. Som forklart skyldes disse løftekreftene at trykket minker når hastigheten øker, noe du lett kan se ved å blåse over et ark du holder framfor deg. Hvordan prinsippet virker for et turbinblad, er vist i figuren i høyre marg. Løftekreftene på rotorbladene resulterer i et dreiemoment som overføres gjennom akslingen til en elektrisk generator.

Energi og effekt i vind

Med vindenergi mener vi den kinetiske energien til luft i bevegelse, og størrelsen på denne kan vi derfor regne ut med $E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$.
La oss anta at et tenkt volum av luft med tverrsnittsareal A og lengde L som vist i figuren nederst i margen, passerer vindturbinen i løpet av tiden Δt. Den kinetiske energien til dette volumet av luft blir:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot L \cdot v^2 \text{ [J]}$$

Energistrøm per tverrsnittsareal i vindretningen. Energien som passerer gjennom hver m^2 av tverrsnittet A per tid Δt, altså vindens effektressurs pr. m^2, blir:

$$\frac{P_{vind}}{A} = \frac{E_k}{A\,\Delta t} = \frac{\rho \cdot A \cdot L \cdot v^2}{2 \cdot A \cdot \Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

Formelen forteller altså hvor stor strøm av kinetisk energi vind med en hastighet v har per m^2 areal normalt på vindretningen. F. eks. gir 10 m/s en effektressurs pr. m^2 lik 0,65 kW/m^2 (ved tetthet 1,29 kg/m^3). Dette er typisk for norskekysten.

Energiomforminger

Grense for effektandelen som kan utnyttes i en vindturbin. I 1920 klarte en tysk maringeniør ved navn Albert Betz å beregne en teoretisk øvre grense for den effekten som kan hentes ut av vinden med en vindturbin. Resultatet hans viste at maksimalt 16/27 kan omformes til mekanisk energi i vindturbinen, altså

$$P_{max} = \frac{16}{27} \cdot A_{rotor} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 = \frac{16}{54} \cdot \rho \cdot A_{rotor} \cdot v^3 \text{ [W]}$$

Virkningsgrader på veien til strøm. De beste turbinene i dag klarer å nå omlag 80 % av Betz' øvre grense, altså har de en rotorvirkningsgrad på $\eta_{rotor} = 0.8 \cdot \frac{16}{27} = 0{,}47$. Før energien kan leveres til strømnettet, er det ytterligere tap i omformingen fra mekanisk til elektrisk energi. I dagens turbiner benyttes vanligvis et mekanisk gir for å øke akselhastigheten fra mellom 10 og 20 omdreininger per minutt ved turbinen, til 1500 omdreininger per minutt ved generatoren. Høyere rotasjonshastighet gjør at generatoren kan lages mindre og med bedre virkningsgrad, typisk mellom 0,92-0,96. Mekaniske girbokser for vindturbiner inneholder gjerne tre girtrinn, og kan ha virkningsgrader på opptil ca. 0,97, avhengig av utvekslingsforholdet. Den totale virkningsgraden i forhold til den tilgjengelige energien i vinden kan nå beregnes som

$$\eta_{tot} = \eta_{rotor}\, \eta_{gir}\, \eta_{el} = 0{,}47 \cdot 0{,}97 \cdot 0{,}95 = 0{,}43$$

I dag (2009) har de største vindturbinene en installert effekt på 5MW. Det vil si at generatoren er laget for å yte opptil 5 MW i vedvarende produksjon. En trend i nye turbiner er nå å erstatte gir og konvensjonelle generatorer (se side 32 og 33) med alternative maskiner hvor magneter og induksjonsspoler er plasserte langs periferien av en roterende skive. Det gir mulighet for høyere totalvirkningsgrad, færre bevegelige deler og dermed reduserte vedlikeholdskostnader. Strømstyrken i elektriske generatorer av denne størrelsen er vanligvis i størrelsesorden 500 A med fasespenning opptil 10 kV.

Eksempel 10. Vi antar følgende data for et vindkraftverk: vindhastighet 10 m/s, lufttetthet 1,29 kg/m³ (ved 1 atm. og 273 K), turbindia-meter 72 m og virkningsgrader som gitt ovenfor. Beregn: vindens effektressurs perm² (P_{vind}/A), effektressurs for rotorarealet (P_{vind}), vindturbinens leverte effekt (P_{turbin}) og levert elektrisk effekt fra kraftverket (P_{el}),

Løsning:

$$P_{vind}/A = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 = \frac{1}{2} \cdot (1{,}29 \text{ kg/m}^3) \cdot (10 \text{ m/s})^3 = 0{,}645 \text{ kW/m}^2$$

$$P_{vind} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A_{rotor} = (0{,}645 \text{ kW/m}^2) \cdot \pi \cdot (36 \text{ m})^2 = 2{,}62 \text{ MW}$$

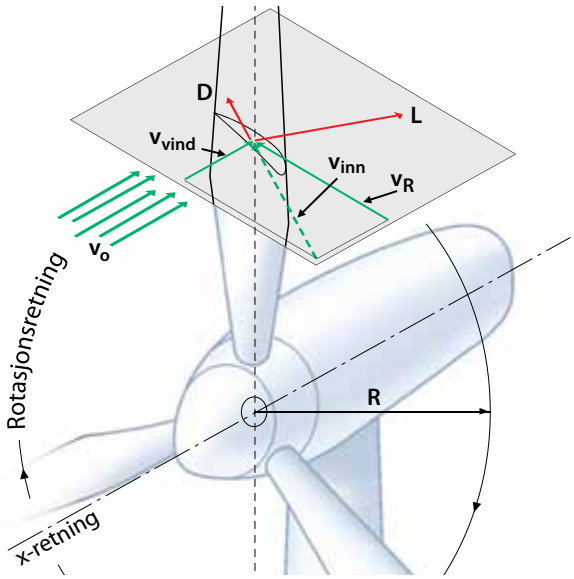
$$P_{turbin} = P_{vind} \cdot \eta_{rotor} = 2{,}62 \text{ MW} \cdot 0{,}47 = 1{,}23 \text{ MW}$$

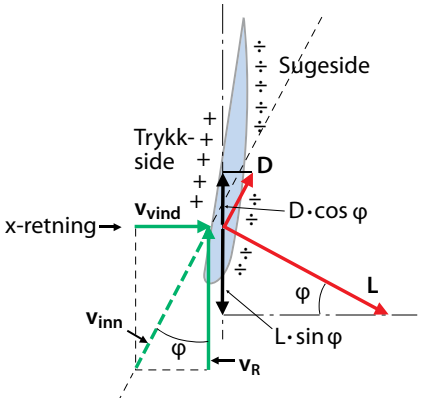
$$P_{el} = P_{turbin} \cdot \eta_{gir} \cdot \eta_{gen} = 1{,}23 \text{ MW} \cdot 0{,}97 \cdot 0{,}95 = 1{,}13 \text{ MW}$$

Vi undrer oss på:

Vil vinkelen φ i figuren ovenfor være større, like stor eller mindre hvis vi ser på et snitt lenger ut på rotorbladet, f.eks. nær bladets spiss? Hva tror du det har å si for utformingen av bladet?

Enkel demonstrasjon av hvordan løftekrefter oppstår. Papirarket bør ikke ha for stor bredde.





Snitt langs en sirkelbue med radius R, sett rett ovenfra.

***Hastigheter** (i punkt A)*

v_o = *hastighet på fri vind*

v_{vind} = *vindens hastighet inn (redusert pga. turbinens energiuttak)*

v_R = *relativ lufthastighet (som ved stille luft) på grunn av rotorbevegelsen*

v_{inn} = *resulterende innstrømningshastighet sett fra bladet, danner vinkelen φ med rotasjonsplanet*

Krefter (på en flate med lengdeelement ΔR i bladets lengderetning)

L = *løftekraft*

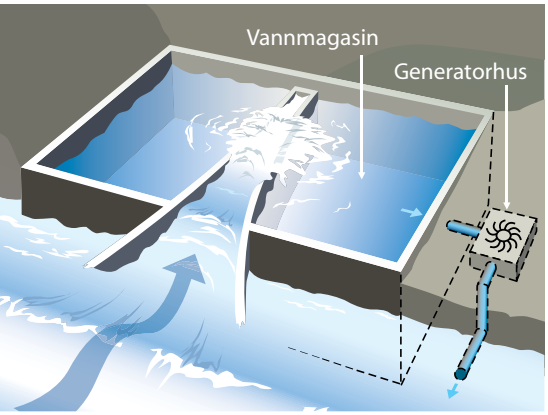
D = *friksjon*

Dreiemoment fra et turbinblad (sum over lengdeelementer):

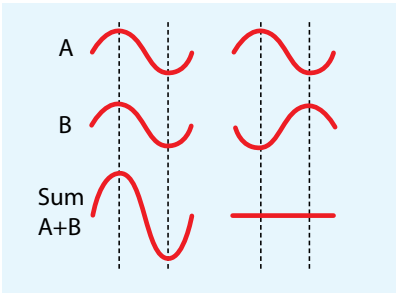
$M_d = \Sigma(L \cdot \sin\varphi - D \cdot \cos\varphi) \cdot R$

Virkemåte for en vindturbin.

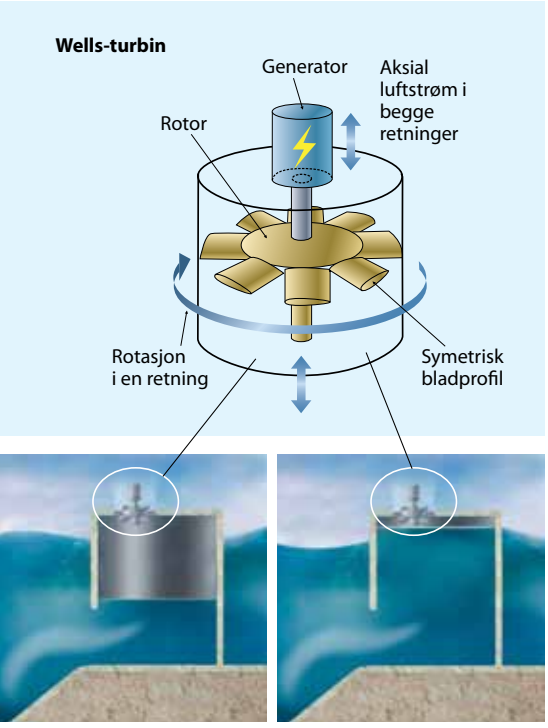
Bølgekraftverk



I en flatbunnet kilerenne vokser bølgene og slår over i et vannmagasin.



Konstruktiv (til venstre) og destruktiv (til høyre) interferens mellom bølgene A og B.



Svingende vannsøyle som vekselvis blåser og suger luft gjennom en turbin.

Virkemåte

Hvordan utnytte bølgeenergien? Et bølgekraftverk henter ut energi fra havbølgene, og grovt sett kan man gjøre dette på to måter: enten la bølgene slå over i et høyereliggende vannmagasin og ta ut energien i en vannturbin som i et vannkraftverk, eller ved å installere et svingesystem i vannet som lager destruktiv interferens med de innkommende bølgene. Vi vil her kun fokusere på det siste alternativet, som er det mest aktuelle for flytende systemer.

Interferens, en kort repetisjon fra fysikken. For å hente ut energien i en bølge, må man lage en motbølge. Anta at vi har en innkommende bølge A, og at vi lager en bølge B med samme form (det vil si samme bølgelengde og samme amplitude). Disse to bølgene blander seg, og det kaller vi interferens. Resultatet blir en bølge som er summen av bølgene A og B (se figur). Dersom de to bølgene A og B har en forskyvning i forhold til hverandre, sier vi at de har ulik fase. Vi kaller det konstruktiv interferens når de to bølgene har samme fase, slik at begge svinger likt, og destruktiv interferens når de har motsatt fase, slik at den ene går opp når den andre går ned.

Klarer vi med vår bølge B å oppnå destruktiv interferens med bølge A, vil den resulterende bølgen ha mindre amplitude enn bølge A, og det betyr det at vi har hentet energi ut av bølgen. Det er dette som skjer i alle signalmottakere (mobiltelefoner, radio og fjernsyn), i mikrobølgeovner (hvor vannmolekylene kommer i svingning) eller når trommehinna settes i svingning slik at vi hører lyd.

Destruktiv interferens ved hjelp av et bølgekraftverk. I et bølgekraftverk, på havet kan vi ved hjelp av maskineriet påvirke bevegelsen til kraftverket slik at det sendes ut bølger med riktig fase og amplitude og på den måten oppnå destruktiv interferens med de innkommende bølgene. *Et bølgekraftverk må altså være en god bølgegenerator!* Bølgene på havet varierer forholdsvis tilfeldig, så for å lykkes må maskineriet ha kjennskap til de dominerende bølgekarakteristika (høyde og lengde) til enhver tid. Skal man være helt nøyaktig må man prøve å forutse den innkommende bølgen ved hjelp av målinger og løpende numeriske beregninger.

Mulige utforminger av bølgekraftverk

Svingende vannsøyle

Et eksempel på svingesystem som kan virke som bølgeabsorbator på havet, er en svingende vannsøyle -et kammer med en indre fri overflate som pumper luft gjennom en luftturbin. Kammeret har en neddykket åpning mot sjøen, hvor trykket fra den innkommende bølgen kan virke på vannsøylen. En vanlig løsning har vært å utstyre enheten med en dobbeltvirkende luftturbin, det vil si at den drives i samme retning uavhengig av strømningsretningen (se figur til venstre). Den kan dermed ta ut energi både på innsug og utblåsning. Turbinakslingen kobles til en elektrisk generator, og energien sendes til land gjennom en strømførende kabel langs bunnen.

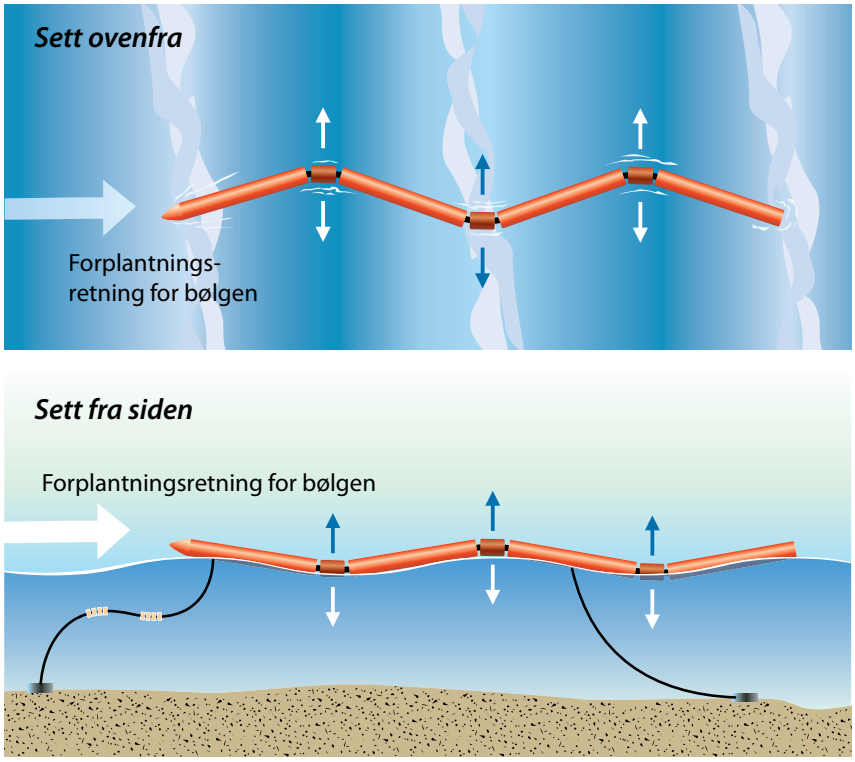
Eksempel 11. Allerede i 1985 prøvde man ut et bølgekraftverk av denne typen ved Toftestallen nordvest for Bergen. Det hadde en ti meter bred kammeråpning mellom dybde 3,5 m og 7,0 m. La oss anta at bølgekraftverket kan omforme 90 % av energien som kommer inn over en bredde lik kammeråpningen. Med en bølge som transporterer 30 kW/m og en turbinvirkningsgrad på 0,5, som er typisk for den typen luftturbin som ble benyttet på Toftestallen, kan vi dermed få ut

$$P = 0{,}9 \cdot 30\ \text{kW/m} \cdot 10\ \text{m} \cdot 0{,}5 = 135\ \text{kW}$$

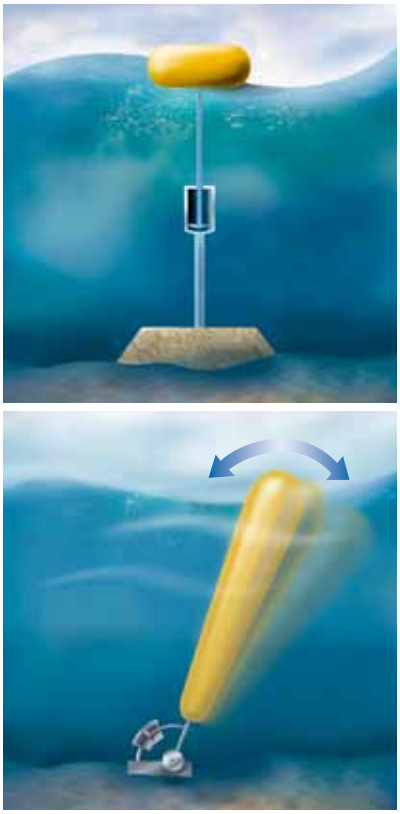
I dag blir prinsippet med svingende vannsøyle videreutviklet gjennom forsøksanlegg blant annet i Portugal (Pico plant), Irland (Ocean Energy) og Storbritannia (Limpet)-, samt integrert i moloanlegg som for eksempel i Spania (Mutriku) og Japan (Sakata).

Eksempler på andre løsninger. På samme måte som i den tidlige utviklingsfasen for moderne vindturbiner, hvor det var mange forslag til hvordan de skulle utformes (vertikal/horisontal akse, mange/få blader), er det i dag et oppkomme av ideer om hvordan bølgekraftverk kan bygges. Et annet forslag enn det vi har sett på, er sjøormen Pelamis (se illustrasjon nedenfor) som har installert effekt på 750 kW. Den virker ved at hydrauliske pumper er plassert mellom leddene i ormen, slik at hydraulisk væske (olje eller vann) driver en motor koblet til en elektrisk generator. I likhet med svingende vannsøyler og alle andre svingesystemer, absorberer denne konstruksjonen energi ved å lage bølger som interfererer destruktivt med de innkommende bølgene.

Andre alternativer inkluderer vertikalsvingende bøyer og brede lemmer som svinger om en aksling i nedre kant. Disse prinsippene er illustrert i figuren til høyre.



Bølgekraftverket Pelamis. Sylinderleddene har en diameter på 3.5 m og den totale lengden er på 150 m.



En vertikalsvingende bøye (øverst) blir satt i bevegelse av den passerende bølgen, og tar ut energi gjennom et maskineri koblet mellom bøya og havbunnen. For den horisontalsvingende lemmen (nederst) er det koplet et maskineri på den roterende akslingen ved bunnen.

I begge tilfeller avgjør kraften fra maskineriet hvor mye energi som blir overført fra bølgen til kraftverket. Kraften bør velges slik at bøyen beveger seg i tråd med prinsippet om destruktiv interferens som forklart på forrige side.

Vi undrer oss på:

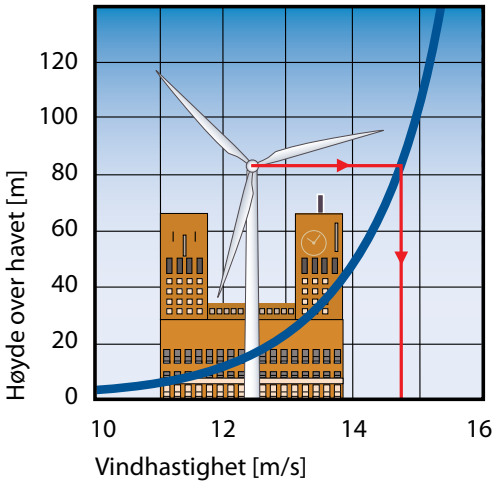
Kan du komme på din egen måte å absorbere bølgeenergi på? Husk at et bølgekraftverk må være velegnet til å lage bølger med.

Vind- og bølgeressursen

Temperaturforskjellene som oppstår i atmosfæren og på jordoverflaten som følge av solstrålingen, gir trykkforskjeller som skaper vind. Når denne blåser over havoverflaten dannes bølger -jo lengre tid og jo lengre strekning vinden blåser over, jo høyere blir bølgene og bølgelengden øker.

Dannelse av bølger.

Fornybar energistrøm. Både vind og havbølger er "fortettet" solenergi (se figur).



Vi skjønner hvor viktig det er å plassere vindturbiner høyt til værs. F.eks. gir en høyde på 80 m en typisk vindstyrke på nesten 15 m/s. Typisk hastighetsprofil for vind som blåser over havet. Omrisset av Oslo rådhus og en 5 MW vindturbin er også vist.

Sammenheng mellom vindhastighet og høyde over havet.

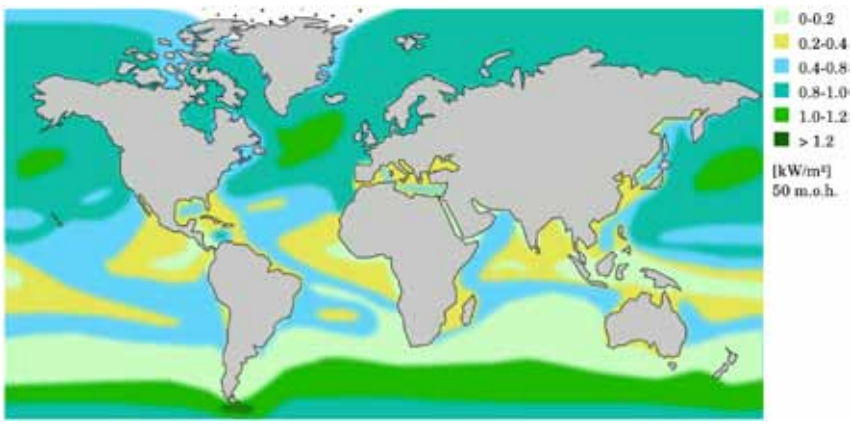
Variasjon. Vinden er en del av det globale værsystemet, og varierer derfor med både tid og sted. Hos oss i nord er vinden på havet i snitt mye sterkere vinterstid enn om sommeren, mens det ved ekvator generelt er mye mindre vind enn hos oss, og liten variasjon mellom årstidene. Dette gjenspeiler seg også i bølgeenergiressursen som grovt sett har de samme variasjonene. En interessant observasjon er forøvrig at sesongvariasjonen (både for vind og bølger) er mye mindre på den sørlige halvkule enn på den nordlige.

Vindressursen

Som vi har sett, er det vindhastigheten og tettheten til lufta som bestemmer hvor mye energi som er tilgjengelig i vinden. Grafen til venstre illustrerer hvordan vinden blir bremset opp langs bakken eller vannet. Man ønsker derfor å plassere selve turbinen i et vindkraftverk et stykke opp fra vannflaten, hvor hastigheten er jevnere og større.

Figuren nedenfor viser geografisk variasjon i årlig gjennomsnitt for vindressursen. Som vi ser har Europa en meget god vindressurs, og de norske havområdene utgjør en betydelig andel. Et godt bilde på potensialet er følgende tankeeksperiment: Anta at vi bygger ut et område på om lag 50 km x 50 km i norskehavet med flytende vindturbiner, hver med en installert effekt på 5 MW og en innbyrdes avstand på 1 km. Dersom disse turbinene i snitt produserer ca. 40 % av sin installerte effekt, vil dette anlegget i snitt gi en elkraftproduksjon lik 44 TWh/år, eller tilsvarende *40 % det totale norske elkraftforbruket.*

Utenfor norskekysten har vi typisk et årsgjennomsnitt på 0,5 til 1,0 kW/m^2 i høyde 50 meter over havet.



Fordeling av den globale vindeffektressursen pr. m^2 (årsgjennomsnitt, 50 moh.). Basert på tall fra US Department of Energy/NREL.

Bølgeressursen

Man sier gjerne at bølgene ruller over havet, og det kan være et godt bilde på hva som skjer. Under overflaten går nemlig vannpartiklene i sirkulære baner på dypt vann, og i ellipseformede baner på grunt vann (se kapittel 1). Amplituden til bevegelsen avtar jo dypere ned i vannet man går. Energien i bølgene kan forstås som en kombinasjon av potensiell energi på grunn av høydeforskjellen mellom bølgetopp og bølgedal, og kinetisk energi på grunn av vannets sirkelbevegelse.

Vi har i kapittel 1 fått forklart at energistrømmen i en sinusbølge på dypt vann, altså energien som per sekund passerer gjennom en tenkt vegg med bredde B=1 m fra bunnen til overflaten, kan uttrykkes slik:

$$\frac{P}{B} = \frac{1}{2}\,\rho g\left(\frac{H}{2}\right)^2 \frac{v_w}{2} = \frac{\rho g^2}{32\pi} TH^2 \;[\,W/m\,]$$

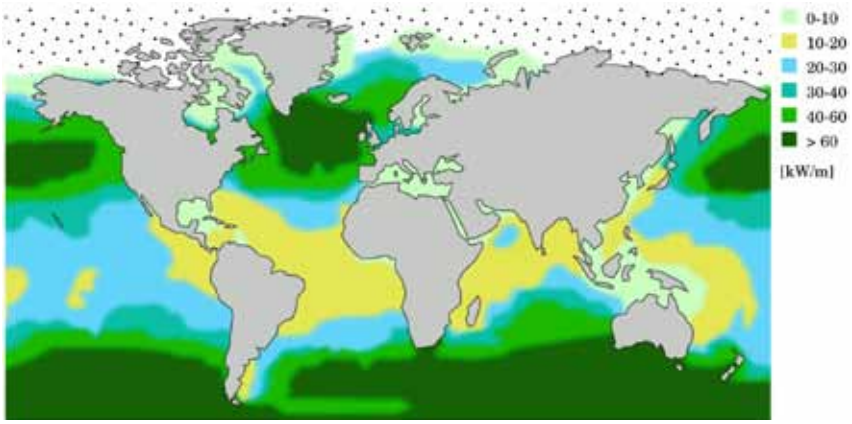
Her er
ρ = vannets tetthet, altså 1025 kg/m^3
g = tyngens akselerasjon, 9.81 m/s^2
H = bølgehøyde [m], som er lik det dobbelte av amplituden
$c_w = gT/(2\pi)$ bølgens hastighet [m/s]
T = periode for en hel svingning [s]

Ved innsamling av bølgedata fra alle verdens hav, kan bølgenergi-strømmen beregnes av uttrykket ovenfor og framstilles som vist i kartet under. Utenfor norskekysten har vi typisk et årsgjennomsnitt på 30-50 kW/m.

Eksempel 12
Typiske verdier for bølger i vintervær utenfor norskekysten kan være: bølgehøyde H=5 m og bølgeperiode T = 9 s. Beregn bølgenes effekt-ressurs pr. m bredde.

$$\frac{P}{B} = \frac{1025\ kg/m^3 \cdot (9{,}81\ m/s)^2}{32\pi}\ 9\ s \cdot (5m)^2 = 221\ kW/m$$

Som nevnt ovenfor er et typisk årsgjennomsnitt 30-50 kW/m. Den beregnede verdien for for vinterstid er altså ca. fem ganger så stor som gjennomsnittet.

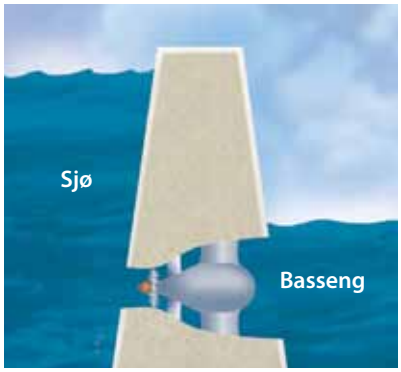


Global fordeling av bølgenes effektressurs pr. meter bredde (årsgjen-nomsnitt). *Basert på tall fra Cruz: Ocean Wave Energy (2008).*

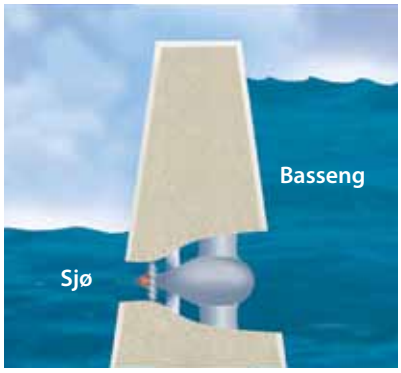
Vi undrer oss på:

Hvorfor er både vind- og bølgeressursen mindre nær land enn ute på havet?

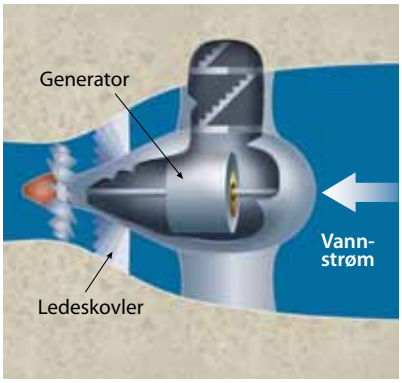
Tidevannskraftverk



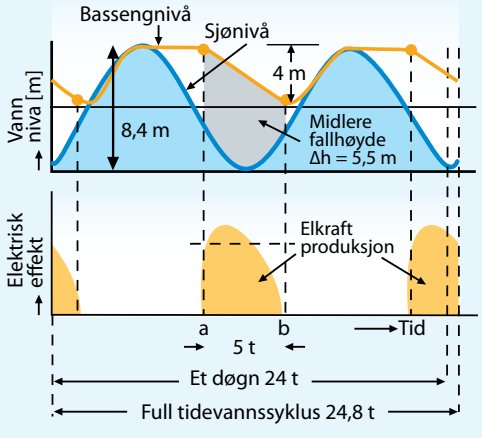
Tidevann på vei inn.



Tidevann på vei ut.



Generator.



To hovedtyper. I dag finnes to hovedtyper tidevannskraftverk: tidevannsdemninger og tidevannsturbiner. I den første utnyttes tidevannsforskjellen mellom flo og fjære ved at man demmer opp utløpet av en fjord eller bukt. På denne måten oppnår man ulik vannstand på de to sidene av demningen, og trykkforskjellen dette gir kan utnyttes i en vannturbin på lik måte som for et vannkraftverk (se figur). I det andre prinsippet plasseres en turbin direkte på et sted hvor tidevannsstrømmen er ekstra sterk.

Tidevannsdemninger

Tidevannsdemningen ved La Rance på nordkysten av Frankrike har vært i drift siden 1967. Dette kraftverket genererer omlag 600 GWh elektrisitet per år. Tidevannsforskjellen ved demningen i La Rance er i gjennomsnitt 8,4 m. La oss anta at man velger å la vannturbinene der produsere kun på fallende sjø. Forholdene blir da som vist på nederste figur til venstre. Elektrisitetsproduksjonen starter i tidspunkt a og slutter i tidspunkt b, hvor turbinens virkningsgrad blir for dårlig på grunn av for liten fallhøyde. I dette tidspunktet er demningen tappet ned med 4 m. I gjennomsnitt blir fallhøyden 5,5 m under hver av de to produksjonsperiodene som varer ca. fem timer hver.

Eksempel 13.
Beregn den samlede midlere effektproduksjon (P_{el} , se figur) i La Rance-anlegget når oppdemmet vannareal er 22 km^2 og forholdene ellers er som i nederste figur til venstre. Samlet virkningsgrad for turbin og generator settes lik 0,63. Beregn årsleveransen av elektrisk energi.
Løsning: total vannmasse som blir tappet ut, er

$$m_{tot} = \rho \cdot A \cdot \Delta h = 1025\ \text{kg/m}^3 \cdot 22\ \text{km}^2 \cdot 4\ \text{m} = 9{,}02 \cdot 10^{10}\ \text{kg}$$

Den potensielle energien som svarer til fallhøyden, blir:

$$E_p = m_{tot} \cdot g \cdot \Delta h = 9{,}02 \cdot 10^{10}\ \text{kg} \cdot 9{,}81\text{m/s}^2 \cdot 5{,}5\ \text{m} = 4{,}87 \cdot 10^{12}\ \text{J}$$

Siden produksjonen skjer over en periode på fem timer, får vi at turbin- og generatorsystemet totalt må levere en midlere effekt på

$$P_{el} = \eta_{tot} \cdot E_p/\Delta t = 0{,}63 \cdot 4{,}87 \cdot 10^{12}\ \text{J}/(5 \cdot 3600\text{s}) = 170\ \text{MW}$$

Dette gir en årsleveranse av elektrisk energi lik

$$E_{el} = 170\ \text{MW} \cdot 5\ \text{h} \cdot \frac{365 \cdot 24 \cdot 2}{24{,}8} = 600\ \text{GWh pr. år}$$

Brøken ovenfor er antall tidevannssykluser per år.

Tidevannsturbiner

Den andre typen tidevannskraftverk, tidevannsturbiner, plasseres i trange sund eller andre steder hvor tidevannsstrømmen er spesielt sterk. Det har ikke utviklet seg noen standardteknologi for slike kraftverk, men den vanligste løsningen i dag ligner en modifisert trebladet vindturbin plassert under vann. Virkemåten er derfor den samme. Forskjellen ligger i at tettheten til saltvann (1025 kg/m^3) er mye høyere enn for luft (1,29 kg/m^3), og at strømningshastighetene i tidevannsstrømmene vanligvis er lavere enn typiske vindhastigheter.

I Kvalsundet i Finnmark er maksimumshastigheten til tidevannsstrømmen ca. 2,5 m/s ved normal tidevannsvandring. Anta at vi i denne strømmen har plassert en tidevannsrotor med diameter 20 m, tilsvarende det som nylig er blitt utprøvd der av selskapet Hammerfest strøm AS. Ved å benytte ligningen for energistrøm på side 6-40 for sjøvann, finner vi at denne maksimalt blir

$$P_{max} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot (10\ \text{m})^2 \cdot (2{,}5\ \text{m/s})^3 = 2{,}5\ \text{MW}$$

Videre kan vi noe forenklet anta at strømningshastigheten varierer som en sinusfunksjon med periode lik 12,4 h og at turbinen i snitt over tidevannsyklusen vil kunne produsere halvparten av maksimaleffekten. Anta videre at midlere rotorvirkningsgrad (effekt i forhold til tilgjengelig effekt i vannstrømmen medregnet Benz´grense) er $\eta_{rotor} = 0{,}3$. Vi får da en snitteffekt på

$$P_{el} = 0{,}50 \cdot \eta_{rotor} \cdot P_{max} = 0{,}50 \cdot 0{,}3 \cdot 2{,}5\ \text{MW} = 375\ \text{kW}$$

Dette gir en årsproduksjon lik 375 kW · 24 · 365 h/år = 3,3 GWh/år, som dekker behovet for ca. 150 typiske husstander.

Tidevannsressursen

Flo og fjære oppstår hovedsakelig i en kombinasjon av månens tiltrekning på jorda, og månen og jordas rotasjon om deres felles akse (nær jordas akse). I tillegg kommer et bidrag fra sola, og mindre bidrag fra andre planeter (se figur til høyre). Tidevannsenergi skiller seg dermed fra andre fornybare energikilder ved at den ikke blir vedlikeholdt av solinnstrålingen.

Den stadige bremsingen av tidevannsstrømmer langs kyster og i trange sund representerer et energitap fra jordrotasjonen som gjør at døgnet på jorda sakte men sikkert blir lengre og lengre (ca. 10 µs per år). Det er denne vedvarende energistrømmen et tidevannskraftverk høster fra.

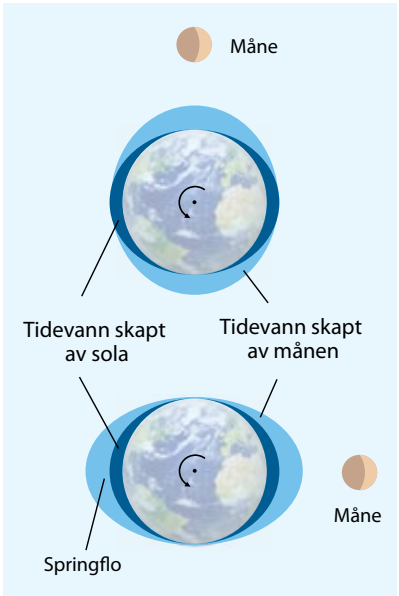
I realiteten vil strømmene i havet være en kombinasjon av tidevannsstrøm og andre havstrømmer som dannes på grunn av vind, bølger, salt- og temperaturforskjeller, og som derfor indirekte stammer fra solinnstrålingen. Slike strømmer er enkelte steder så kraftige at det blir vurdert om de alene kan utnyttes til elproduksjonsformål. I såfall vil man kunne ha en jevn produksjon uavhengig av tidevannssyklusen.

Vi undrer oss på:

Hva kan man gjøre for å få en jevn tilgang på elektrisk energi, i stedet for den variasjonen man ser i figuren nederst på venstre side?

Tidevannsturbiner utnytter tidevannets kinetiske energi. Selskapet Hammerfest strøm AS har testet denne turbinen i Kvalsundet i Finnmark. Når tidevannet snur, vris bladene 180 grader.

Steder med spesielt sterk tidevannsressurs *(Kilde: Statkraft).*



Tidevann skapes av månens og solas posisjoner. (Sola befinner seg til høyre utenfor illustrasjonen).

Referanser

13.1 Godfrey Boyle: Renewable Energy. Second Edition. Oxford University Press. Oxford 2004

Havromsteknologi

Fasit

Løsningsforslag til alle oppgaver kan tilsendes som e-post etter henvendelse til leif.lundby@ntnu.no

Kapittel 1

1.1 a) 11,1
b) 2,0
1.2 a) x = 475 m, t = 34 s gir A = -2,5 m
x = 467 m, t = 35 s gir A = -0,7 m
1.3 a) 0,0105 m/s^2
b) 30 km sydover
1.4 a) 8,83 m/s 5,66 s 0,177 Hz
b) 1,26 kJ/m^2
c) 5,54 kW/m
1.5 a) 2,4 m
1.6 a) 22,3 m/s 12 m
b) 181 kJ/m^2
1.7 a) 5,1 m b) Tsunamien vil begynne å bryte ved dybde 1,3 · H (6,6 m), og altså ha startet bryting
1.8 a) 12,5 m/s 63 kW/m
b) 6,3 m/s
1.9 a) 0,555 m/s
b) 6,3 %
1.10 a) 13 m/s = 25 knop
b) 10 knop NØ
c) mbar = hPa = 10^2 N/m^2
1.11 Figur kan tilsendes
1.12 a) I høyre fig. skal bølgehøyden øke gradvis innover fjorden og bølgelengden avta. Strømlinjene skal spres utover i fjorden og ligge tettest sammen i sentrale partier.
b) Bølgeprofilene i øverste, høyre figur skal gi økende H og minkende L
1.13 Utled: dEp = ρ · g · (A · dx) · A/2
Innfør: A = A0 · cos (k · x-w · t)
Integrer deretter mellom 0 og L

Kapittel 2

2.1 10,2 m 9,95m
2.2 p = kraft F/areal A [Pa = N/m^2]
2.3 Nei (pga. Arkimedes`lov)
2,4 Volumdepl. = massedepl. / tetthet
Økt tetthet i Atlanterhavet gir mindre volumdeplasement.
2.5 11,8 kN
2.6 Is i Arktis flyter på havet, smelting vil da ikke bety noe for havnivå. (jf. oppg. 2.3). Is i Antarktis ligger stort sett på landområder. Smelting gir da stigning av nivå (og landet kan heve seg litt).
2.7 49,5 kN (lufttrykk over vannflaten motvirkes av trykk inne i ubåten)
2.8 1,70 kPa overtrykk
2.9 19,6 kN
2.10 3,33 dm
2,11 Vo/Vu = 0,10 (ferskvann)
2.12 Volumdeplasement: V [m^3]
Vektdepl. (massedepl,): A [tonn]
A = V · ρ [m^3 · tonn/m^3]
2.13 101500 m^3
2.14 Det vises til oppg. 2.16 med beregninger
2.15 Flasker har labil likevekt. Oppdriften vil virke i retning av tyngdepunktet. "Krenges" flaska, vil det ikke oppstå noen momentarm og altså ikke noe opprettende moment. Metasenteret og tyngdepunktet faller sammen.
2.16 a) 0,832 dm^3 0,337 dm
b) KB`=1,7 cm
c) KG1`= 5,8 cm
d) B`M = 4,4 cm
e) G1`M = 0,3 cm (dårlig stabilitet)
f) G2`M = 4,1 cm (bedre stabilitet)
2.17 a) G`M = 0,8 dm (altså positiv, men liten, dvs. dårlig stabilitet)
b) G``M< 0, altså ustabilt system
2.18 a) B`G`= 5,2 dm, B`M = 4,61 dm
G`M<0, dvs. ustabilt system
b) Metasenter senkes betydelig, samtidig heves tyngdepunktet
2.19 Løsningsforslag kan tilsendes
2.20 Løsningsforslag kan tilsendes
2.21 Løsningsforslag kan tilsendes
2.22 a) Ytre krefter er: Oppdrift, tyngde av last og tyngde av lekter
b) Massedeplasement: 778 tonn. Finn skala og mål ut lengder av mom.armene, G`F = 1,46 m, G`L = 13,4 m, gir m = 85 tonn
2.23 a) 21,25 m
b) 458 m^3
2.24 a) e = 8,05 m
b) z = 0,0172 m
c) G`M = 0,72 m

Kapittel 3

3.1 a) b) c) Se figur side 5-3
3.2 a) 8,8 · $10^{(-5)}$
b) 51 N
3.3 a) V / A = D /4
b) S = A = 4 · V/D = 844 m^2
c) Rn = 5,86 · 10^8, Fn = 0,49
d) ~120 kN (tilnærmet verdi på S)
e) ~ 2000 kW
3.4 a) 6,68 m, 5,3 · $10^{(-3)}$
b) 12,1 · 10^6, 2,9 · $10^{(-3)}$
2,4 · $10^{(-3)}$
c) 1,46 · 10^9
1,46 · $10^{(-3)}$, 3,86 · $10^{(-3)}$
d) 1245 kN, 12800 kW
3,5 a) 6,29 · 10^8, 0,94
b) 1,62 · $10^{(-3)}$
c) 0,003
d) 450 m^2
e) 365 kN
f) 10200 kW
3.6 a) Se figur side 3-21
b) 0,18 m^2 (en vannski)
c) Friksjon = 16 N
Skyvekraft i "binding"~16 N
Tyngde = 0,31 kn
Resultant fra trykkrefter:
~ 0,31 kN
Midlere trykk = 1,7 kPa =
= 6,5 % av stagnasjonstrykk
3.7 a) 5,46 kNm
b) 1: 6
3.8 a) 1 (ubenevnt)
b) 1 c) 1
3.9 a) 10 m/s
b) 300 N
c) 300 N
d) 0,2 s
e) 0,1 kW

Kapittel 4

4.1 a) Har funksjonelle egenskapene
b) Eksempler: Vindusglass – slipper gjennom lys, Goretex – vanntett, men "pustende", silisium – halvledere,
4.2 a) Stål (jernlegering) og aluminium. Hhv. stor styrke og liten tetthet
b) Keramer, polymerer og kompositter. Se sidene 4-7, 4-8 og 4-9
4.3 a) Jevn blanding av metaller
b) Legering av jern og karbon
4.4 Aluminium gir redusert masse og dermed mindre dypgang, våt overflate og friksjonsmotstand. Bølgemotstanden reduseres også.
4.5 a) Se figur side 4-10
b) Se figur side 4-12
c) Varig deformasjon
4.6 Se side 4-16
4.7 Ta utgangspunkt i figur side 4-21
4.8 Tøyning = 0,00016,
Forlengelse = 3,2 mm
4.9 a) 800 MPa
b) 0,8 mm
c) 1400 MPa
d) 5.6 mm
e) 11.6 mm, etter brudd trekker staven seg sammen, vertikal linje gir forlengelsen før bruddet
f) 200 · 10^9 N/mm^2 = 200 GPa
4.10 E = 200 GPa, flytegr. = 400 MPa, strekkfasthet = 630 MPa, bruddtøyning = 0,25 (ved belast.)
4.11 a) 371 kN
b) 47,3 kN
c) 344 kN totalt, 159 kN midlere
d) Spenning øverst: 180 N/mm^2 =
=180 MPa. Sikkerh.faktor= 4,4
e) Midlere tøyning: 0.4 · $10^{(-3)}$, forlengelse. 1,0 m
4.12 a) Se side 4-14
b) Utmattings prøve foretas, se side 4-15, levetid kan beregnes når belastningens virkelige periode er kjent

4.13 a) Velger to punkter (for 100000, 1000000 sykluser) og leser av spenningsvidder). To ligninger gir m = 2,5 og C = $3{,}2 \cdot 10^{12}$
b) Ligning på s. 4-15 på log.form, blir: log N+ m · log S = log C. Innsettes log N = x, S = y og verdier fra a), fås: y = (-1/m)+logC/-0,4 m = 0,4 · x+5 Dette er en rett linje.
c) $95 \cdot 10^6$
4.14 13,1 kN
4.15 0,32 år
4.16 a) 120 MPa
b) Tøyning=1,7 promille, 0,85 mm
c) 1,7

Kapittel 5

5.1 a) 2,76 m
b) 3,3 s
5.2 a) 17,2 s
5.3 a) Bruk ligning for "fjærstivhet" for flytende legemer på side 5-7
b) 3,7 s
5.4 a) 240 MPa, 0,116 %, 23,2 mm
b) $5{,}07 \cdot 10^6$ N/m, 3,27 Hz
5.5 a) 101 kN , 88 kN
b) 15,8 tonn, 1,56 s, 0,64 Hz
5.6 a) 52 s
5.7 Løsningsforslag kan tilsendes
5.8 a) 0,363 rad/s
b) $s(t) = s_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) =$
$= 1 \cdot \cos(0{,}363 \cdot t$ [m]
c) $v(t) = -\omega \cdot s_0 \cdot (\omega t) =$
$= 0{,}363 \cdot 1 \cdot \sin(0{,}363 \cdot t)$ [m/s]
d) $a(t) = -\omega^2 s_0 \cdot \cos(\omega t) =$
$-0{,}132 \cdot 1 \cdot \cos(0{,}363 \cdot t)$ [m/s^2]
Eks.: Ved tid $t = T_E/8 = 2{,}16$ s:
s = 0,707 s, v = -0,26 m/s og
a = -0,09 m/s^2
Opptegnede grafer kan tilsendes

Kapittel 6

6.1 a) Lasttyngde, skrogtyngde (lettskip) og oppdrift
b) $5 \cdot 10^3$ kN
c) Mom. oppdrift:$+12{,}3 \cdot 10^6$ kNm
Mom. fra last: $-12{,}0 \cdot 10^6$ kNm
Mom. lettskip: $-0{,}5 \cdot 10^6$ kNm
Sum ytre krefter = 0, sum mom. = 0
d) Fordelt oppdr.: $2.45 \cdot 10^3$ kN/m
Fordelt lasttyngde: $4{,}80 \cdot 10^3$ kN/m
Fordelt lettskipstyngde:
$0{,}05 \cdot 10^3$ kN/m
e) Eks.vis er bøyemom. for snitt C:
Mom. oppdr.: $+3{,}06 \cdot 10^6$ kNm
Mom. fra last: $-1{,}50 \cdot 10^6$ kNm
Mom. fra l.skip: $-0{,}06 \cdot 10^6$ kNm
Tot. ytre mom.: $+1{,}50 \cdot 10^6$ kNm
Indre bøyemoment: $-1{,}50 \cdot 10^6$ kNm
Kurve samme form som på s. 6-19
f) Som eksempel beregnes sum av krefter til venstre for snitt D:
Sum kref. oppdr.:$+184 \cdot 10^3$ kN
Sum krefter last: $-240 \cdot 10^3$ kN
Sum krefter l.skip: $-4 \cdot 10^3$ kN
Sum ytre krefter: $-60 \cdot 10^3$ kN
Skjærkref. snitt D: $+60 \cdot 10^3$ kN
Kurveform som nederst s. 6-19
g) Sagging
6.2 a) Som i oppgave 6.1 a)
b) Som i oppgave 6.1.b)
c) Som i oppgave 6.1 c)
d) Som i oppgave 6.1 (last fordeles på de samme totale lengder
e) Ser eks.vis på snitt C: Mom. i rekkefølge som i oppg. 6.1.e):
$+3{,}06, -4{,}50, -0{,}06, -1{,}50 \cdot 10^6$ kNm
Indre bøyemom.: $+1{,}50 \cdot 10^6$ kNm.
Form på bøyemomentkurve:
Se s. 6-18
f) Hogging
6.3 a) Velges positiv dreiretning med urviseren, blir:
Sum av mom.=$2{,}75 \cdot 10^6$ kNm
Dette mom. gjør at skipet ikke flyter horisontalt (trim). Mom.-armene forandres inntil det oppnås stilling med mom.sum=0.
b) 35,4 m
c) $2{,}4 \cdot 10^3$ kN/m
d) Kurvens form har "topp":
$+375 \cdot 10^3$ kNm ved 25 m fra A,
"dal": $-666 \cdot 10^3$ kNm 66 m fra A
e) Skjærkr.=$+30 \cdot 10^3$ kN 25 m fra A
Skjærkr.= $-50 \cdot 10^3$ kN 46 m fra A
Skjærkr.=$+40 \cdot 10^3$ kN 83 m fra A
f) Se punktene a) og b)
Komplett løsning kan sendes
6.4 a) x = 63,3 m
6.5 a) 100,8 m^4
b) $111 \cdot 10^6$ N/m^2=111 MPa
c) 1,8
6.6 a) K_A = 400 N (se eks. 4). Da må b.mom.i snitt 2 m fra A bli 800 Nm. Siden K_A er eneste kraft til venstre for snittet, må bøyemom. vokse lineært fra 0 til 800 Nm i området 0–2 m. I snitt til høyre for 2 m må bøyemom. fra last medføre at kurven synker lineært tilbake til 0
b) I alle snitt til venstre for 2 m, må det opptre en kraft - 400 N for at det skal bli balanse. I alle snitt til høyre for 2 m, er netto ytre belastn. 400N-600N=-200 N og skjærkraften blir + 200 N
c) Maks. trykksp.=35,5 MPa, som <40 MPa. OK!
6.7 a) Bruker snitt D og E som eks.
Avstand fra A til snitt: 0,6 og 0,8 m
Mom. fra oppdr.: 78 og 139 Nm
Moment fra last: 0 og 104 Nm
Tot. ytre mom.:+78 og +35 Nm
Indre bøyemom.: -78 og -35 Nm
6.8 a) Snitt D: M_b = -78 Nm.
$I = 5{,}33 \cdot 10^{(-4)}$ m^4, spenning15 kPa
b) Skjærkr. 260 N, skjærspenning 1,6 kPa
c) Lasten er basert på punktbelastn., men er egentlig fordelt på et lite areal, noe som reduserer bøyemomentet.
d) Min. tykkelse = 5,4 cm, men oppdriften krever større tykkelse
6.9 Løsningsforslag kan tilsendes
6.10 Løsningsforslag kan tilsendes
6.11 Løsningsforslag kan tilsendes
6.12 Løsningsforslag kan tilsendes
6.13 a) 9,72 og 9,57 m^3
b) 309 og 313 N/mm^2
c) 67 og120 N/mm^2
d) 2057 og1272 tonn
e) Høyt og smalt tverrsnitt: gir lavt materialforbruk hvis bøyespenning skal legges til grunn, men maks. skjærspenning vil øke noe og stabiliteten blir dårligere.
6.14 a) Stavkreftene i C adderes som vektorer. Summen blir en vertikal kraft like stor som den ytre kraften, og sum krefter i C blir null. De viste stavkreftene må da være riktige.
b) En rute svarer til 200 kN i både x- og y-retn. En diagonal svarer til $200 \cdot 2^{0,5}$ kN.
Dermed kan kraft i hver stav avleses direkte. F.eks: FDC = 600 N og FDG=280 N (strekk)
6.15 a) 10,5 MJ
b) 1,46 s
c) - 1,4 m/s^2
6.16 a) 0,88 knop
b) 0.98 =98 %
c) Deformasjonsarbeid på skip og plattform
6.17 a) 3,7 knop før støtet
b) 3,3 knop
6.18 Løsningsforslag kan tilsendes
6.19 Løsningsforslag kan tilsendes

Kapittel 7

7.1 a) 0,75 kg/kg = 75 masse-%
b) 0,85 kg/kg = 85 masse-%
7.2 a) 3,67 kg CO_2/kg C
b) 2,75 kg CO_2/kg metan
3,11 kg $C0_2$/kg MDO
c) 57,3 g CO_2/MJ
74,1 g CO_2/MJ
d) 12 % reduksjon pr. kg brensel
23 % reduksjon pr MJ energi
7.3 a) $O_2 + C = CO_2$, $4H + O_2 = 2\ H_2O$

b)1kmol O_2+1kmolC=1kmolCO_2
1kmolO_2+ 4kmolH = 2kmolCO_2
c) Nødvendige data: Molvolum for gasser=22,7 m^3 og tetthet for luft 1,276 kg/m^3 ved 1bar og 0 celsiusgrader.
Andel av O_2 i luft = 21 vol-%

7.4 a) 14,9 kg luft/kg MDO
b) 42,9 · 10^3 kg/h
c) 4,5 · 10^3 kg CO2 / h
d) 10 masse-%

7.5 a) V.grad = utnyttet / tilført energi
b_e = kg brensel/utnyttet energi
h_n = tilført energi/kg brensel
b) h_n [MJ/kg] = (h_n /3,6) kWh/MJ
c) 0,156 kg/kWh

7.6 Løsningsforslag kan tilsendes

7.7 Bruk: J/m^3 = N · m/m^3 = N/m^2
og 1 bar=10^5 Pa=10^5 N/m^2

7.8 a) 1875 kW
b) 11,7 MW
c) 30 kNm og 560 kNm

7.9 Løsningsforslag kan tilsendes

7.10 Løsningsforslag kan tilsendes

7.11 Løsningsforslag kan tilsendes

Kapittel 8

8.1 a) Styring: lede noe som er i bevegelse (legeme/ prosess) i ønsket retning.Regulering: Holde orden i noe som kan forstyrres, f.eks holde et målbart resultat mest mulig konstant
b) Selvstyrt skip
c) DP = dynamisk posisjonering. Et skip eller en plattform holdes i ro vhja. propeller/thrustere

8.2 a) Styring: Bruk av ror eller svingbar propell til å lede et skip i ønsket retning. Manøvrering: Hyppige eller store retnings- eller fartsforandringer
b) Skip B har best retningsstab.
c) A: Containerskip, B: Tankskip

8.3 a) H/T = 1,2
b) 0,83 m
c) H/T = 1,9

8.4 a) Dyn. trykk (1/2 · ρ · v^2) gir økt undertrykk når farten øker, se figur a) på side 8-5.
b) Relativ.hastighet vann/skip er mindre ved baug og hekk enn under skipet. Denne "oppbremsingen" gir større trykk (stagnasjonstrykk) og dermed høyere vannstand både foran og bak (Bernoullis ligning). Propellens innvirkning forstyrrer dette strømningsbildet noe, slik at trykkøkingen blir mindre ved hekken enn ved baugen.
c) Strømningshastighet øker pga. sideveis strømning, jf. a)
d) Dyn. trykk øker fra 20 til 45Pa når steinen passeres, noe som svarer til en høydediff. lik 2,5 mm. I virkeligheten skjer det også tilstrømning til "dumpa"

8.5 a) Thruster er også en propell, men denne plasseres da i en tunnel eller svingbar dyse.
b) Plassering bak propell gir økt strømningshastighet forbi ror

8.6 a) v_a = 8,23 m/s , T = 1640 kW
b) Hastighetsøking fra prop = 4,05 m/s
Hastighet forbi ror: v_{ror} = 12,3 m/s
c) Løfttall = 0,13, Løftkraft = 182 kN
d) 9 % i forhold til stille vann

8.7 a) 28 kN
b) 91,6 o/min
c) 6 %

8.8 a) Se avsnitt midt på side 8-9
b) Løsningsforslag kan tilsendes

8.9 a) Hurtige bevegelser, dvs. bølgeinduserte bevegelser ville gitt altfor store krefter og slitasje
b) Rull, stamp og hiv av en plattform gir bevegelser i vertikal retning og kompensasjon av disse krever derfor meget store krefter

8.10 a) Propulsjon/manøvrering- og boresystem
b) D.motorer = grønne, generatorer = blåe

8-11 a) Når P-reg. kan "hjelpe til", kompenserer den fort for feilen som har oppstått
b) I-reg. sikrer et godt sluttres.

Kapittel 9

9.1 a) 70000 m^3, 71750 tonn
b) Blokkoeff. = 0,7
c) 50200 tonn dødvekt
d) Lettskipsvekt = 21550 tonn

9.2 Løsningsforslag kan tilsendes

9.3 Løsningsforslag kan tilsendes

9.4 Løsningsforslag kan tilsendes

9.5 a) Tonnasjer: 33500 bt, 19700 nt
b) Deplasementer:
Massedepl. (vekt) = 71750 tonn
Volumdepl. = 70000 m^3
Dødvekt = 50200 tonn
Tyngdedepl. = 703 MN

Kapittel 10

10.1 Løsningsforslag kan tilsendes

Kapittel 11

11.1-11.4 Løsn.forslag kan tilsendes

Kapittel 12

12.1-12.6 Løsn.forslag kan tilsendes

12.7 a) 48,4 tonn, c) 0,4 kg diesel/kg
b)

Operasjoner	Tid Timer (%)	Brensels-forbruk Tonn (%)
Ut /hjem	96 (14)	67 (27)
Leting	202 (30)	26 (10)
Tråling	302 (45)	72 (29)
Haling [1]	38 (6)	6 (2)
Tømming + skyting	34 (5)	~ 0 (0)
Elkraft-behov til bearb, av fangst + generelt	[2]	48 (20)
Frysing	[2]	29 (12)
Totalt	**672 (100)**	**248 (100)**

1) Begge tråler hales samtidig
2) Skjer parallelt med annen aktivitet

12.8 Løsningsforslag kan tilsendes

12.9 a) 2,2 kg
b) Rester: 0,2 kg

12.10 a) 4820 m^3,. 478000 lakser
b) Samme biomasse: 2750 kyr

Medlemsbedrifter i Samarbeidsforum Marin

Forumet ble etablert i 2005 som:

Samarbeidsforum for Studieprogram Marin teknikk, NTNU og Maritimt næringsliv i Norge

AkerSolutions™ www.akersolutions.com

Idag er Buereu Veritas det største klassifiseringsselskapet i verden, med over 48.000 medarbeidere og 370.000 kunder. Selskapet har hovedkontor i Paris og egen avdeling i Norge. Forretningsområdene - marine, industri, inspeksjon og revisjon, helse, miljø og sikkerhet, bygg og anlegg, sertifisering, forbruksvarer, samt offentlig sektor - er tilknyttet spesifikke bransjer.

www.bureauveritas.no

efront TECHNOLOGY

Utvikling av teknologi innenfor petroleum og maritim industri samt det som naturlig står i forbindelse med dette. Selskapet kan også delta i andre selskaper.

DETNORSKE

Leting, utvikling og produksjon av petroleumsressurser på norsk sokkel. Selskapet har lisenser i Nordsjøen, Norskehavet og Barentshavet og er det nest største på norsk sokkel målt i antall lisenser og letevirksomhet.
Det norske er nå i ferd med å bli et fullverdig oljeselskap med egenoperert utvikling og drift av felt.

www.detnor.no

DNV

Skipsklassifikasjon og risikostyring innen olje og gassindu-strien, den maritime indu-strien og en rekke andre industri-segmenter. Selskapet har også en stor posisjon innen sertifisering. I tillegg er selskapet aktivt innen segmenter som matsikkerhet, risiko-styring i helsesektoren og ulike aspekter rundt tjenester som bygger opp om bærekraft.

www.dnv.no

FRONTLINE

Frontline er det største tankerselskapet i verden. Selskapets visjon er å sørge for en pålitelig og fleksibel transporttjeneste for sine kunder og et unikt kundeforhold som skal sørge for best avkastning for begge parter.

www.frontline.bm

GE Oil & Gas

We fuel the future.
We push the boundaries of technology to bring energy to the world.

Grieg Shipping Group er et fullintegrert rederi som er spesialisert innen global maritim transport og logistikk. Grieg Shipping Group inkluderer:

- Grieg Star Shipping som har kommersiell operasjon av skipene
- Grieg Shipping som er ansvarlig for teknisk drift og prosjektutvikling.

Rederiet har 26 eide skip og opererer totalt ca 55 skip innen konvensjonell bulkskip og spesialisert tørrlast. Rederiet har for tiden et nybyggingsprogram på 12 skip. Vi har kontor i store deler av verder med hovedkontor i Bergen. Totalt har vi 849 ansatte fordelt på 593 sjøfolk og 206 på land. www.grieg.no

---

HAVYARD
Improving life at sea

Havyard Group ASA er et fullintegrert skipsteknologiselskap som leverer produkt og tjenester inne hele verdikjeden fra skipsdesign til skip i operasjon. Visjonen vår er «improving life at sea» og vi skal være med å forbedre situasjonen til de som bruker våre produkt.
Vi leverer skipsdesign, skipsutstyr, komplette nybygg og støtte til skip i operasjon.

www.havyard.com

KONGSBERG

Kongsberg Maritime er endel av Kongsberg Gruppen (KONGSBERG) som er et internasjonalt, kunnskapsbasert konsern som leverer høyteknologiske systemer og løsninger til kunder innen olje- og gassindustrien, handelsflåten, forsvar og romfart.

Kongsberg Maritime leverer produkter og systemer for posisjonering, navigasjon og automasjon til handelsskip og offshoreinstallasjoner, samt produkter og systemer for sjøbunnskartlegging og overvåkning, og til fiskefartøyer og fiskeriforskning. Kongsberg Maritime er blant markedslederne innenfor disse områdene.

www.km.kongsberg.com

KRISTIAN GERHARD JEBSEN
SKIPSREDERI A/S

KGJS har en integrert rederidrift der kommersielle, tekniske og støtte avdelinger jobber tett sammen for å sikre en løpende utvikling av selskapets aktiviteter. Rederiet har sine hovedvirksomhetsområder innen:

- SKS har en betydelig og fleksibel flåte av Oil Bulk Ore (OBO), Suezmax (for oljeprodukter og råolje) og avanserte produkttankskip (transporterer oljeprodukter som bensin og diesel og råolje).
- KGJ Cement har verdens største flåte av pneumatiske sementsskip. www.kgjs.no

---

Lloyds Register sørger for en uavhengig forsikring for selskaper som opererer med høy-risiko og kapitalintensive bransjer innen energi og transport i forhold til liv, utstyr og miljø. Lloyds er en støttebrikke for klienter i å sørge for sikre, ansvarlige og bærekraftige forsyningskjeder.

www.lr.org

MARINTEK

Forskning og utvikling innen havromsteknologi for krevende kunder i et globalt marked. De tre markeds-områdene er maritim sektor, olje/gass og havenergi.

www.marintek.no

Norges Rederiforbund
Norwegian Shipowners' Association

Norges Rederiforbund har om lag 160 medlemmer – rederier innen utenriks- og nærskipsfart og offshorerelaterte virksomheter. Forbundet har som formål å ivareta medlemmenes interesser i nærings- og arbeidsgiverspørsmål, og spiller en aktiv rolle på vegne av fellesskapet innenfor våre strategiske satsningsområder. NR er verdens ledende nasjonale rederiorganisasjon.

www.rederi.no

---

nfa
norsk forening for automatisering

NFA er en ideell forening med fokus på automatisering.
Medlemene i NFA bruker eller leverer avanserte automatiserings-løsninger innen områder som medisinsk teknologi, robotteknologi, prosesskontroll, olje og gass, avanserte fartøyer og industriell IT.
NFA jobber med nettverksbygging, kompetanseutvikling og økt konkurranseevne for norsk industri.
NFA er opptatt av å sikre rekruttering til høyere utdannelse innen teknologi og realfag gjennom å øke bevisstheten, forståelsen og interessen rundt faget blant politikere, studenter og folk flest.

www.nfaplassen.no

Norsk Industri

Norsk Industri er en norsk arbeidsgiverorganisasjon for industrien i Norge og største landsforening i Nærings-livets Hovedorganisasjon (NHO).
Norsk Industri organiserer all fastlandsindustri i Norge, utenom næringsmiddelindustrien. Oljeselskapene er organisert i Oljeindustriens Landsforening (OLF), uten-om deres fastlandsanlegg som Snøhvit, Mongstad osv.

www.norskindustri.no

NATIONAL OILWELL VARCO

APL™ Technology

www.nov.com

Rolls-Royce er verdensledende på design, utvikling og vedlikehold av produkter i den maritime næringen. Hoved-fokus er utsyr for kraft, propulsjon og vibrasjons-kontroll. Rolls-Royce har over 2500 kunder og har installert utstyr på over 30000 fartøyer i drift verden over.

www.rolls-royce.com/marine

Designet på Sevan Marine's offshore installasjoner møter alle kravene til allsidighet, fleksibilitet og fast utplassering. Designet har vist seg å være svært effektivt for FPSO-fartøyer, samt deep-water Mobile Drilling Units (MODU).

www.sevanmarine.com

SINTEF Fiskeri og havbruk har bred kompetanse og kunnskap i å utnytte fornybare marine ressurser. Instituttet skal bidra til å finne løsninger på utfordringer langs hele den marine verdikjeden – fra biologisk grunnlag for marin produksjon, via oppdrett og fangst til foredling og distribusjon.

www.sintef.no

Sjøfartsdirektoratet
Norwegian Maritime Authority

Sjøfartsdirektoratet har myndighetsansvar for norsk-registrerte skip og utenlandske skip som anløper norske havner. Direktoratet ivaretar også funksjonen som realregister (NIS og NOR) og sikrer rettsvernet for eier og panthaver.

Sjøfartsdirektoratets overordnede mål er å være en attraktiv flaggstat med høy sikkerhet for liv, helse, miljø, og materielle verdier. I saker som dreier seg om miljøforhold knyttet til det enkelte skip og vern av det marine miljø, er direktoratet underlagt Miljøverndepartementet. Sjøfartsdirektoratet bistår Petroleumstilsynet i håndhevelsen av petroleumsloven på norsk sokkel og er tilsynsmyndighet for fritidsfartøy som kommer under reglene om CE-merking.

www.sjofartsdir.no

Statoil

www.statoil.com

subsea 7

Subsea 7 er en av verdens største undervannsentreprenører. Subsea 7 jobber innen følgende områder:

- SURF (havbunnsstrukturer, kontrollkabler, stigerør, rørledninger)
- Life of Field (inspeksjon, vedlikehold, reperasjon)
- Konvensjonelle konstruksjonstjenester (hovedsaklig i Vest-Afrika)
- Fornybar energi

I tillegg tilbyr Subsea 7 utleie av fjernstyrte fartøyer (ROV) og diverse undervannsverktøy. www.subsea7.com

TEEKAY

Teekay har en essentiell rolle som et maritimt ledd i den globale forsyningskjeden for energi. Bedriften knytter olje og gass-produksjon opp mot raffenering og distribusjon, og blir dermed mellomleddet for produksjon og salg.

www.teekay.com

ULSTEIN®

ULSTEIN leverer produkt og tjenester innen skipsdesign og utstyrspakker til det internasjonale markedet innen offshore supply, heavy offshore og nærskipsfart.

ULSTEIN har aktivitet innen fire områder; Design & Solutions, Shipbuilding, Power & Control og Shipping.

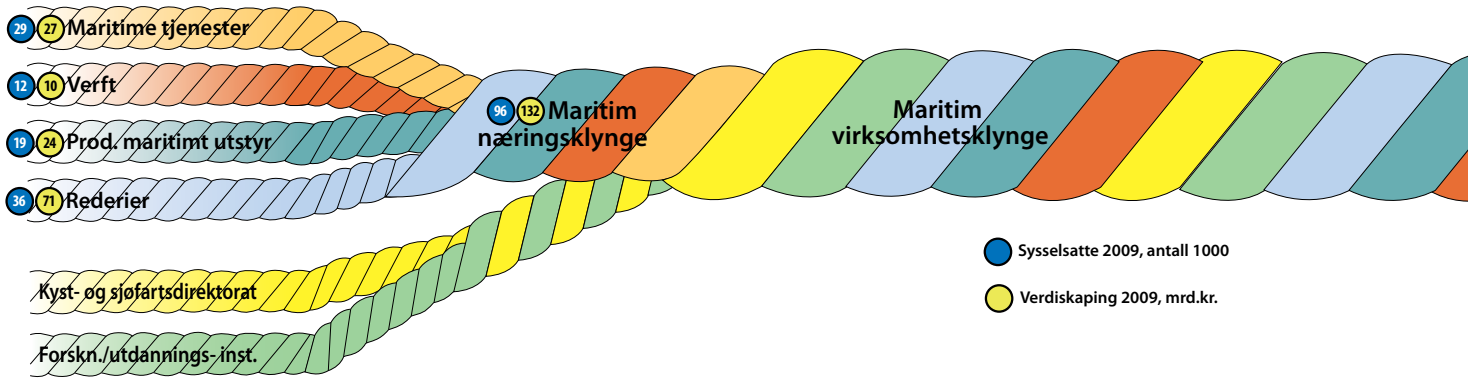
www.ulsteingroup.com

VARD™

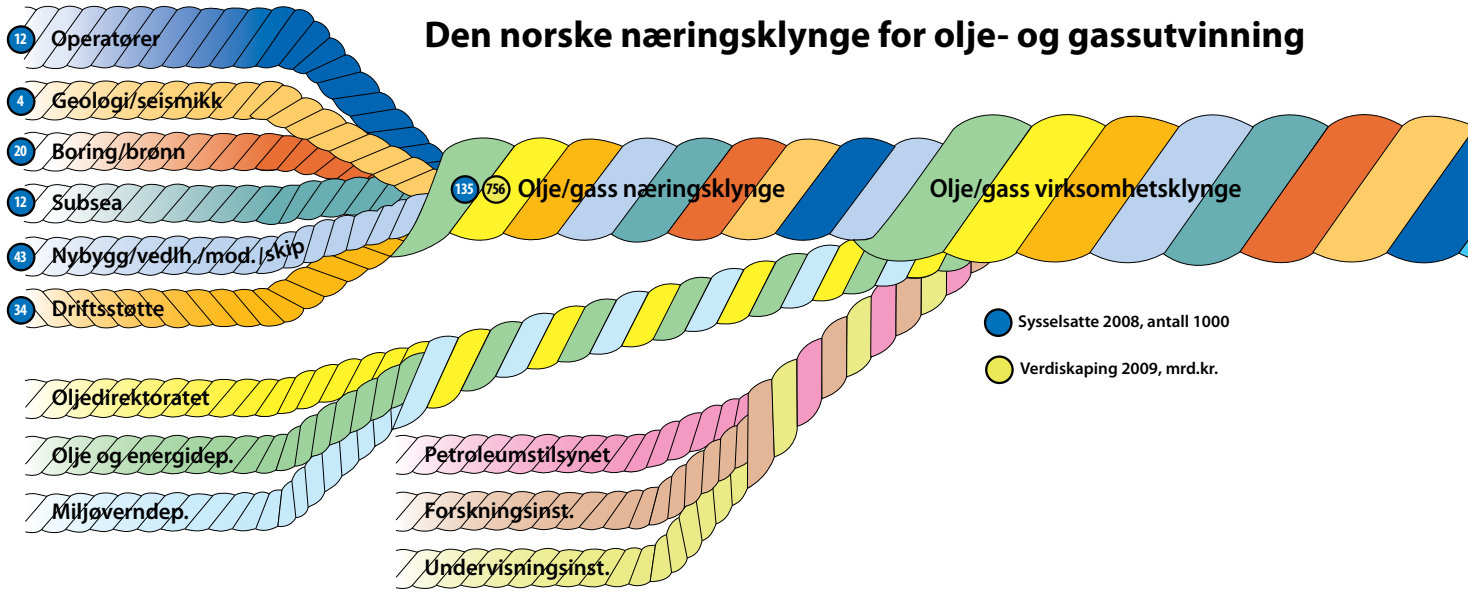
a **Fincantieri** company

www.vard.com

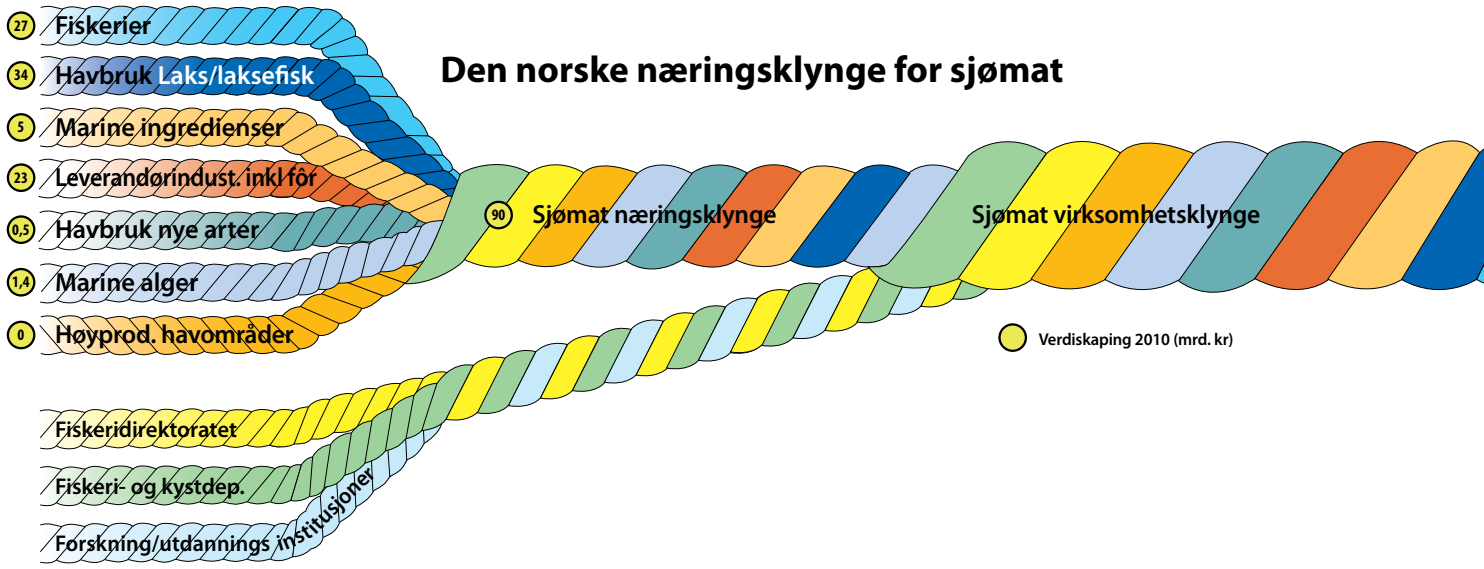
Den norske, maritime næringsklynge



Den norske næringsklynge for olje- og gassutvinning



Den norske næringsklynge for sjømat



Norge lever av havet

I Norge er det tre næringsklynger knyttet til virksomheter i havet. Disse er av veldig stor betydning for landet. Samlet gjør de allerede i dag Norge til en stormakt på havet. I løpet av neste tiår vil landet komme til å bli verdensledende i havrommet. Da må det bli interessant å være med på denne utviklingen, som også teknologisk sett blir svært utfordrende.

De tre næringsklyngene sysselsetter tilsammen mer enn 300 tusen mennesker fordelt på flere tusen næringsbedrifter og offentlig sektor. Samlet verdiskaping er per i dag på 1000 milliarder kroner i året.