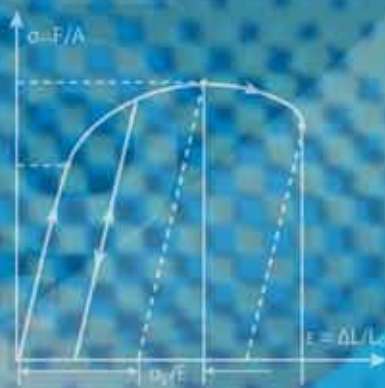


Forfatter: Stig Berge

# 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

## 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 sammenføres 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 spekefjøl 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<sup>1)</sup>: steinalderen (til 1800), kobberalderen<sup>2)</sup> (3500–1700), bronsealderen (1800–700) og jernalderen (800–1050 e.Kr.). Som vi skal se senere, betegner dette en utvikling mot stadig sterkere materialer, med flere bruksområder. *Material-teknologi*<sup>3)</sup> 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?

<sup>1)</sup>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.

<sup>2)</sup>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.

<sup>3)</sup>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 produktene nedenfor? Nevn to eksempler på funksjonelle materialer.



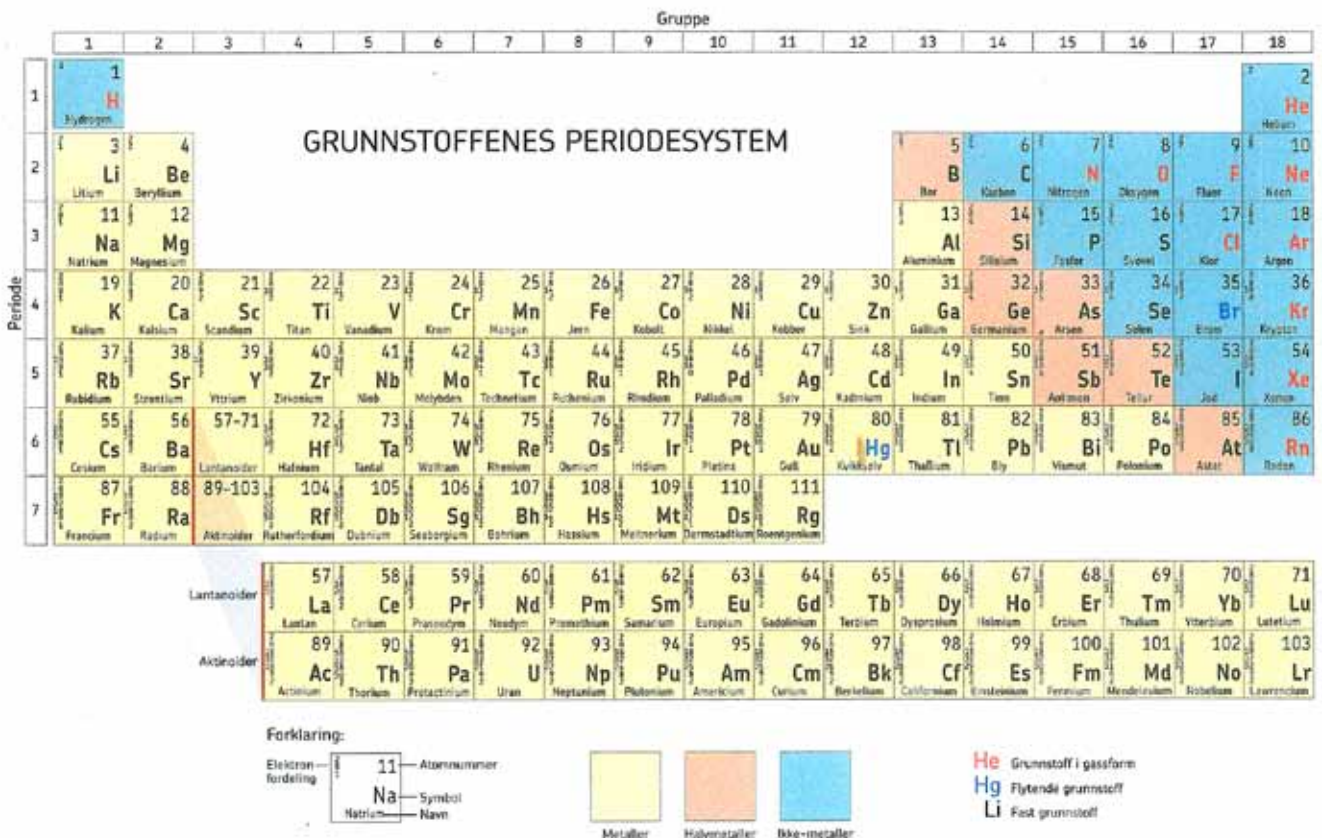
# Typer av konstruksjonsmaterialer

Vi skiller mellom fire typer konstruksjonsmaterialer: *metaller, keramer, polymerer og kompositter.*

## Metaller

De aller fleste grunnstoffene er metaller. <sup>1)</sup> 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*

<sup>1)</sup> Det fullstendige periodiske systemet har 118 grunnstoffer (det inkluderer de kunstige grunnstoffene som lages ved kjerne-reaksjoner 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, stiftmaskin 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<sup>1)</sup> 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 tilsetning 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.

<sup>1)</sup> 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,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Men i motsetning til rust, som er porøs 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 ( $\text{CaCO}_3$ ), sandstein ( $\text{SiO}_2$ ) og is ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

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. Kvarssand 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.



Foto: Harald Pettersen / Statoil

**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:

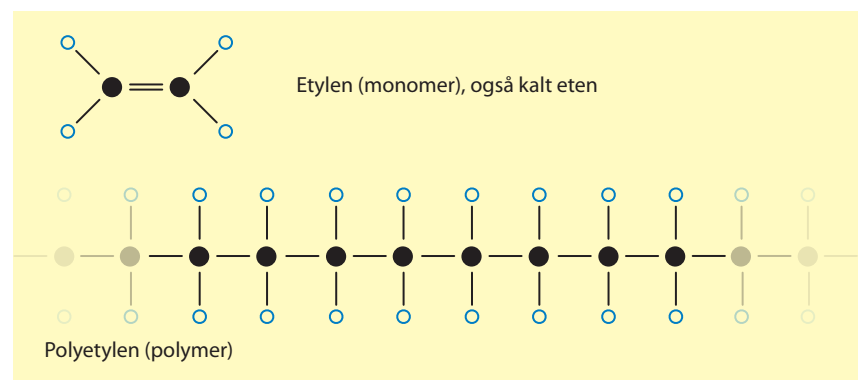
Hva er et keram?  
Hva består betong av?

## 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 produksammenheng 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, aralditt 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-racketter, 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 fibre 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.

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.



**Glassfiberarmert plast lages ved at vevde matter av glass-fiber (et stivt og sterkt materiale som tåler stor strekkbelastning) støpes inn i plast.**



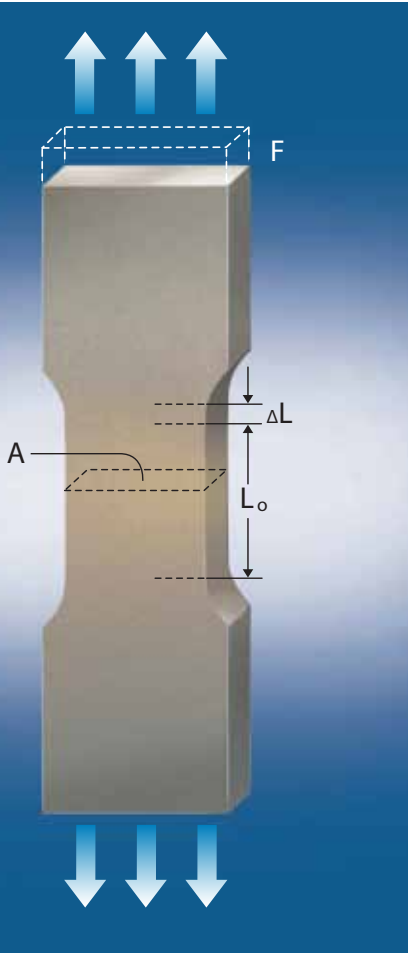
**America's Cup-seilasen foregår med båter som er laget av avanserte plastkompositter.**

### Undringsoppgave:

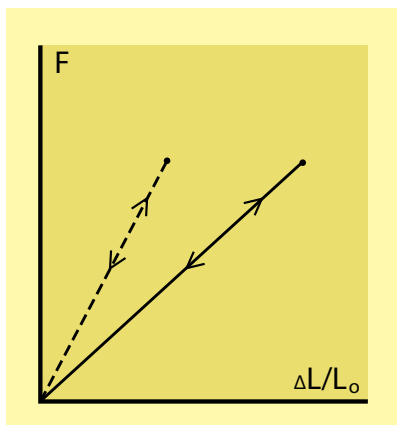
Hva er en fiberkompositt?  
Nevn tre typer fiberkompositter.



# Metaller



**Strekprøving 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 egen tyngden 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. Plattformen 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  $\Delta L$ . 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<sup>1)</sup>. 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.

<sup>1)</sup> Robert Hooke, engelsk vitenskapsmann (1635-1703).

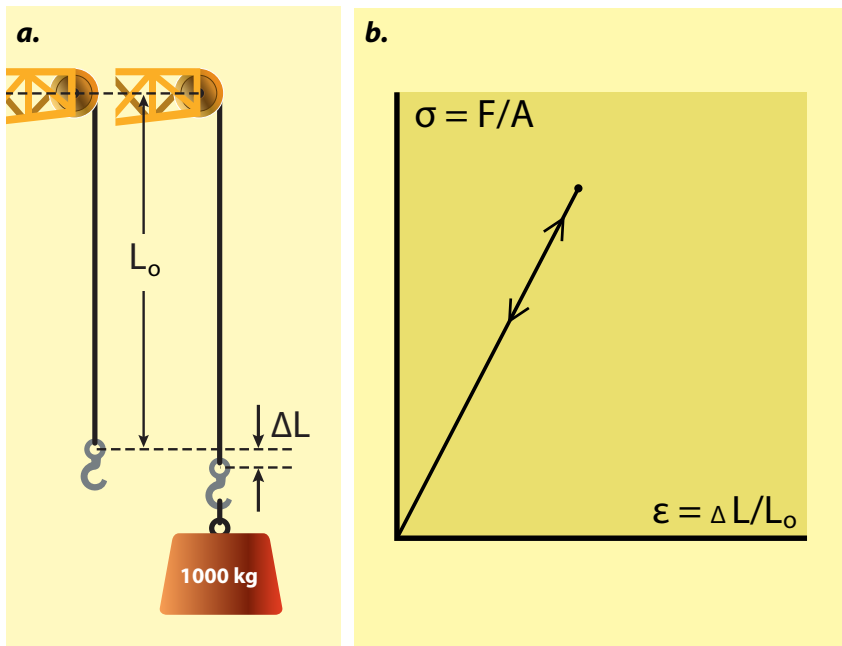
Hvis vi regner om måleresultatene i spenning og tøying, får vi et annet diagram. Spenningen i materialet er kraft/tverrsnittsareal:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Tøyingen i materialet (den relative forlengelsen) er:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

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 material-egenskaper som vil være de samme uansett hvilken konstruksjon vi bygger. Sammenhengen mellom spenning og tøying kan uttrykkes som:

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

der E er elastisitetsmodulen (E-modulen eller Youngs<sup>1)</sup> 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<sup>2)</sup> (N), forlengelse i meter (m). Av dette ser vi at spenning måles i  $N/m^2 = \text{Pascal}^3)$  (Pa). Tøying ser vi er ubenevnt, altså blir benevnningen 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.



### 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<sup>2</sup>. 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.

<sup>1)</sup> Thomas Young, britisk vitenskapsmann (1773-1829)

<sup>2)</sup> Isaac Newton, britisk vitenskapsmann, grunnlegger av mekanikken (1643-1727)

<sup>3)</sup> Blaise Pascal, fransk vitenskapsmann (1623-1662)

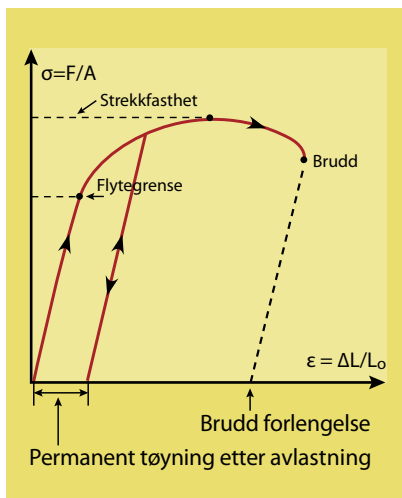


Tabell 1. Materialegenskaper for noen materialer

Materiale	Densitet (Mg/m <sup>3</sup> )	E-modul (GPa) <sup>1)</sup>	Flytegrense (MPa) <sup>1)</sup>	Strekkefasthet (MPa) <sup>1)</sup>	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 <sup>2)</sup>	-	0
Betong, stålarmeret	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

<sup>1)</sup> 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.

<sup>2)</sup> Målt i trykk. Betong uten stålarmering har svært liten styrke i strekk.



**Spennings-tøyningsdiagram inntil brudd.**

To viktige begreper:  
Flytegrense og strekkefasthet

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 tøyning. 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 *strekkefastheten* for materialet. Får vi spenninger utover den, vil vi få brudd i materialet og kanskje en meget alvorlig skade, for eksempel at et skip brytter i to, eller at en plattform brytter 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.

## Formbarhet

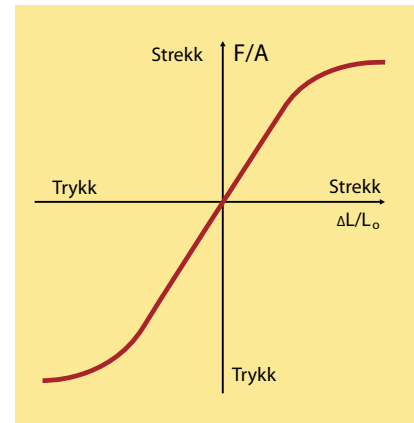
En konstruksjon handler ikke bare om styrke, men også om form—vi må kunne forme materialene. Det skjer på svært mange forskjellige måter. Konstruksjonsmaterialer som stål og aluminium blir støpt ut i store blokker som så vales ut til plater, stenger og profiler. Det betyr at materialene må kunne bearbeides 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 bryter. 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 høfaste 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.

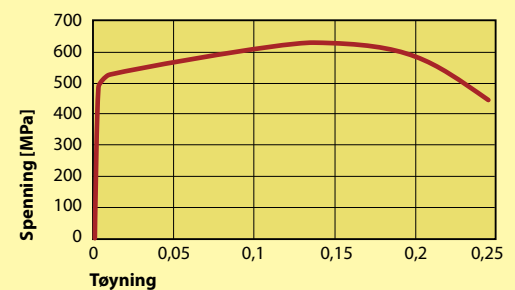
## Undringsoppgave:

I figuren øverst ser du spennings-/tøyingskurven 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 bruddtøyningen.

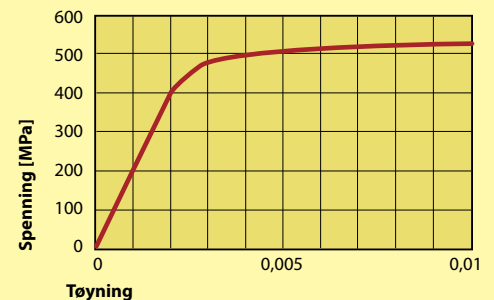


**Spennings-/tøyingsdiagram for strekk og trykk i et metall**

**Spennings-tøyingsdiagram for et konstruksjonsstål. Fig. 1**



**Spennings-tøyingsdiagram for et konstruksjonsstål. Fig. 2**



**Figurer til undringsoppgave**



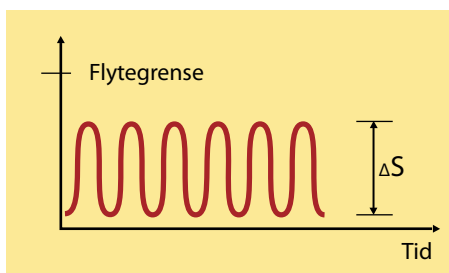
# Nedbrytingsmekanismer

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 spenningsyklus 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.

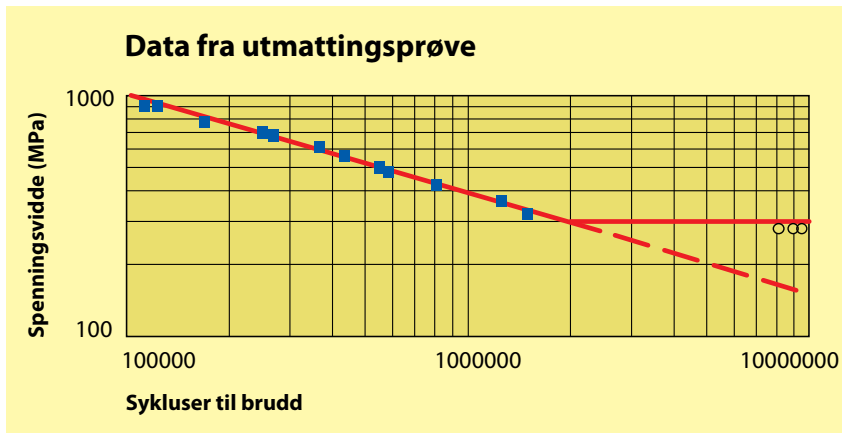


**Dynamisk belastning,  
f.eks. fra bølger.**





Prøver vi flere staver med forskjellig spenningsvidde ( $\Delta S$ ) 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 plote på logaritmisk skala. Stor spenningsvidde fører til kort levetid, mens liten spenningsvidde fører til lang levetid<sup>1)</sup>. 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.  $\Delta S$  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 ( $\Delta S_i$ ), og i diagrammet markeres denne med en horisontal strek. Hvis alle spenningscyklusene 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.



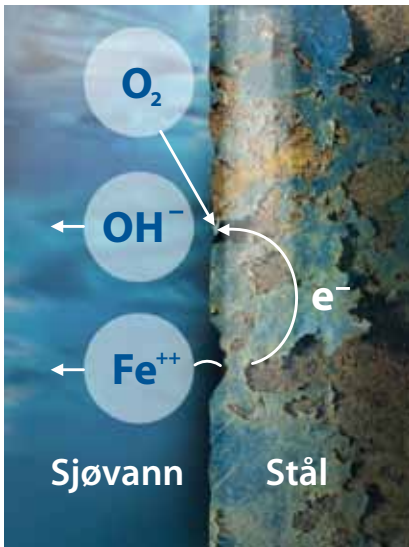
**Prøvestav for utmattingsforsøk.** Strekkraft veksler mellom maksimal verdi og null



### Undringsoppgaver:

- Finne verdien av  $C$  og  $m$  for SN-kurven i diagrammet.
- Vis at formelen for SN-kurven (se bort fra utmattingsgrensen) gir en rett linje på log-log-skala.
- Et skip blir bygget for en driftstid på 30 år. Hvor mange bølgeslag vil skipet bli utsatt for i løpet av driftstiden?

<sup>1)</sup> 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.



**Korrosjon av jern – jernet løses opp i sjøvannet som jern-ioner mens de frigjorte elektronene forbrukes i en katodisk reaksjon på overflaten.**

## Korrosjon

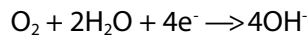
Som beskrevet tidligere, må stålkonstruksjoner beskyttes mot korrosjon, ellers vil de over tid få korrosjonsskade, det vil si at metallet blir spist opp av rust. Skip og plattformer, som er omgitt av salt sjøvann og atmosfære med mye salt, er spesielt utsatt. Uten god beskyttelse vil slike konstruksjoner 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.



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:



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<sup>1)</sup>. 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. Oksid-sjiktet 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.

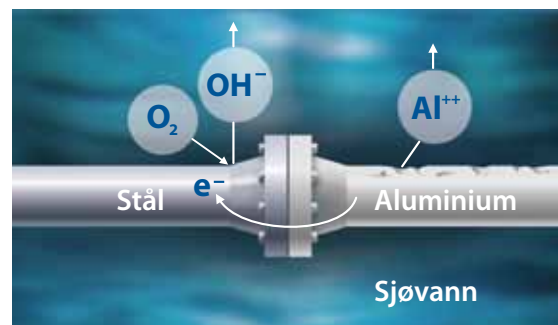
### Vi undrer oss på:

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?

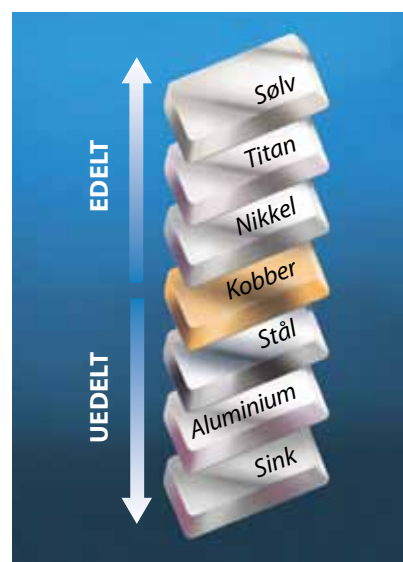
Hva om du setter en bit av titan på en stålkonstruksjon?

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.**

<sup>1)</sup> 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 aluminiumoksid. 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<sup>1)</sup>.

- 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
Strekfasthet: 490 MPa	Strekfasthet: 262 MPa	Strekfasthet: 950 MPa
Bruddtøyning: 21 %	Bruddtøyning: 22 %	Bruddtøyning: 14 %

<sup>1)</sup> 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 peisinnsetser 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<sup>1)</sup>. 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 verk-tøy, 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.

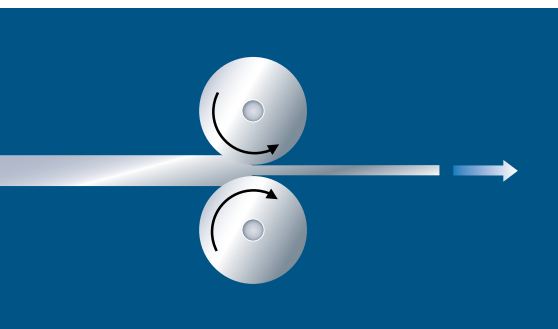


## Valsing

Mange konstruksjoner lages av plater eller profiler som formes og sammenføyes. Det gjelder skipsskrog, offshoreplattformer, fly, bil-karosseri 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 form-bart, og deretter valset ut i flere omganger til ønsket tykkelse. Hver blokk har et nøye kontrollert legeringsinnhold, og gjennom hele pro-essen blir temperatur og graden av utvalsing styrt for at sluttproduktet skal få de ønskede egenskapene med hensyn til styrke og duktilitet.

<sup>1)</sup> Johan Peter Wessel har i sitt dikt *Smeden og Bageren* gitt et humoristisk uttrykk for dette.



**Valsing av plate**



## 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

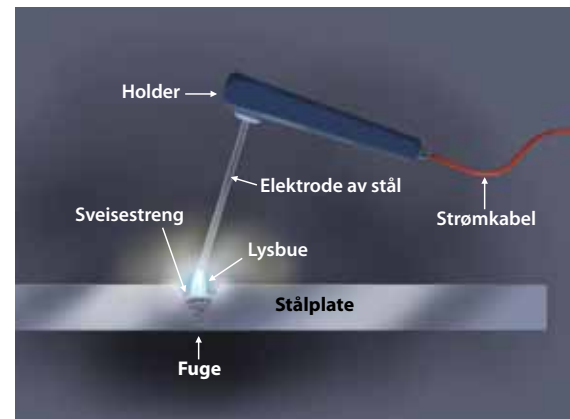
De aller fleste konstruksjoner består av deler som *sammenføres*.

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 sammenføres. 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 (sveistråden) 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-gulven 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 levert 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

- Hvordan vil du beskrive et funksjonelt materiale?
- Nevn noen eksempler på funksjonelle materialer og hva de brukes til

## Oppgave 4.2

- Hvilke er de viktigste typer metaller som brukes i skrog for skip og flytende plattformer? Beskriv de viktigste egenskapene for metallene.
- Hvilke andre tre hovedtyper konstruksjonsmaterialer har vi? Beskriv de viktigste egenskapene for disse.

## Oppgave 4.3

- Hva er en legering?
- Hva er stål?

## Oppgave 4.4

Hva er de hydrodynamiske årsakene til at hurtiggående båter oftest er laget av aluminium?

## Oppgave 4.5

- Lag en skisse som viser hvordan vi utfører en strekkprøve med et materiale.
- Tegn skjematisk spennings-/tøyningskurven for et metall, og vis hva vi mener med flytegrense og strekkfasthet.
- 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.

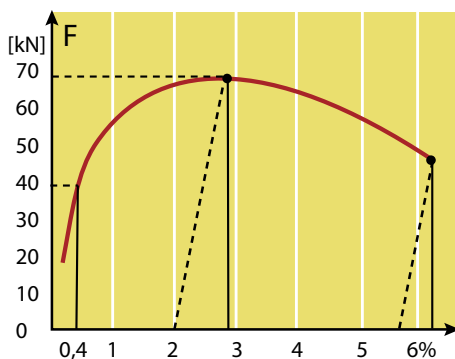
## Oppgave 4.8

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 marginen. Det er fastlagt ved hjelp av en prøvestav med lengde 200 mm og en diameter på 8 mm. Bestem:

- Flytegrensen (bruk linjal til å finne ut hvor kurven begynner å krumme).
- Forlengelsen i mm ved flytegrensen
- Strekkfastheten
- Forlengelsen når staven er belastet til strekkfastheten er nådd.
- Bruddforlengelsen i mm i ubelastet tilstand. Denne bestemmes ved hjelp av den stiplede skrålinjen på figuren. Hvorfor brukes ikke den vertikale linjen?
- E-modul uttrykt i  $\text{N/mm}^2$  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  $7,85 \text{ kg/dm}^3$ , E-modul på 207 GPa og en flytegrense på 800 MPa.

Bestem:

- Tyngden av en wire
- Oppdrift av en wire. Massetetthet for sjøvann er  $1,025 \text{ kg/dm}^3$
- Strekraft som påvirker wirene øverst når det tas hensyn til oppdrift og last. Bestem også midlere strekkraft over hele lengden.
- Strekkspenning øverst i wirene, uttrykt i MPa og  $\text{N/mm}^2$ . Hvor stort er forholdet mellom flytegrensen og strekkspenningen? Dette forholdet kaller vi gjerne sikkerhetsfaktor.
- Tøying og forlengelse av wirene.

**Oppgave 4.12**

- Hva er utmatting?
- 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-skruer som har en såkalt materialklasse 5.6. Dette er preget inn på skruhodet 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:

- Strekkspenning
- Forlengelse i mm og tøying i promille
- Sikkerhetsfaktor i forhold til flyting

## 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.