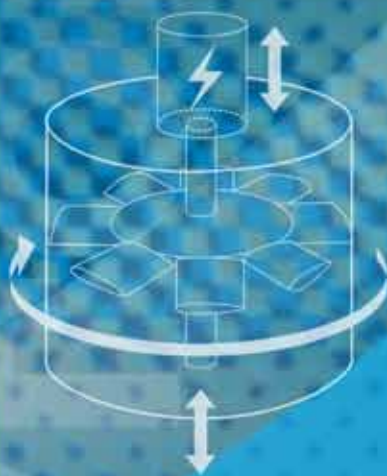




Forfattere: Jørgen Hals og Leif Lundby

Fornybar energi til havs



Innhold

Innledning.....	2
Vindkraftverk.....	4
Bølgekraftverk.....	6
Vind- og bølgeressursen.....	8
Tidevannskraftverk.....	10
Referanser.....	12

B

Vi har gjentatte ganger foran påpekt at utslipp av CO₂ 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 CO₂-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

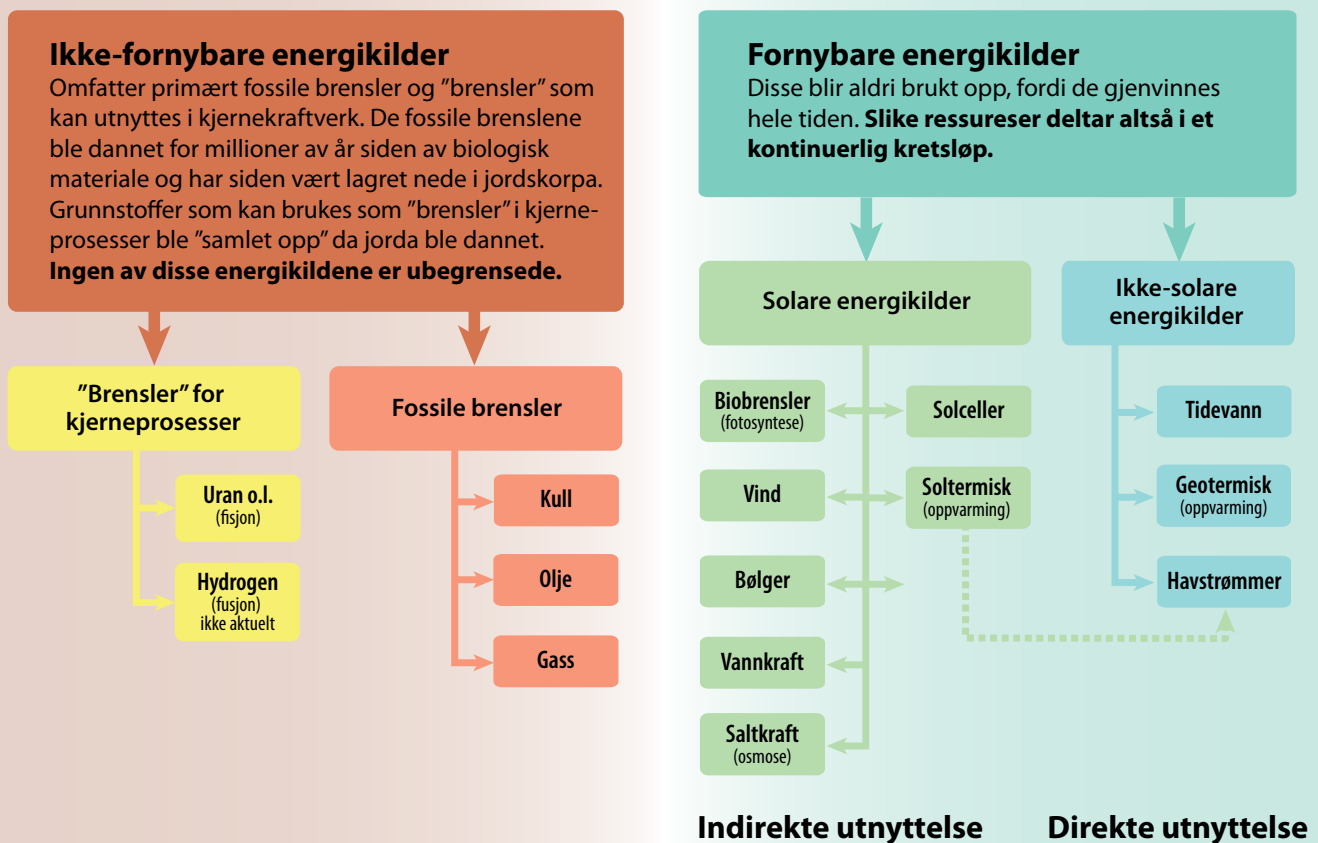
Vi skal i dette kapitlet se nærmere på hvilke muligheter som da eksisterer.

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 CO₂, 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.

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.

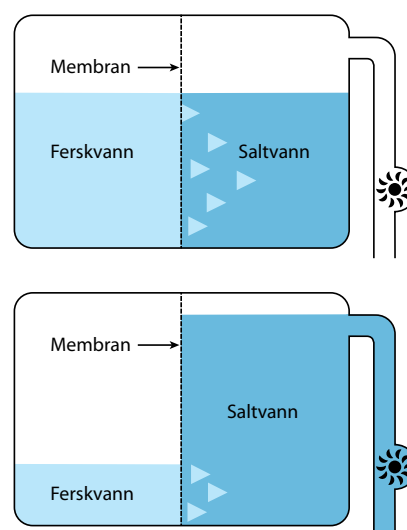
Utnyttelsen av det osmotiske prinsippet er nevnt for å gjøre oversikten på forrige side komplett, men verken vanlig vannkraft- eller saltkraftanlegg "hører hjemme" i en bok med tittel *Havromsteknologi*. Det samme gjelder også geotermiske og stort sett de soltermiske energikildene. Disse utnytter termisk 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).



Wallenius Wilhelmsen E/T Orcele

Framtidens skip? Skipet har både solcellepaneler og seil (dreibare) som leverer energi til framdrift. Samtidig har skroget svært liten motstand.

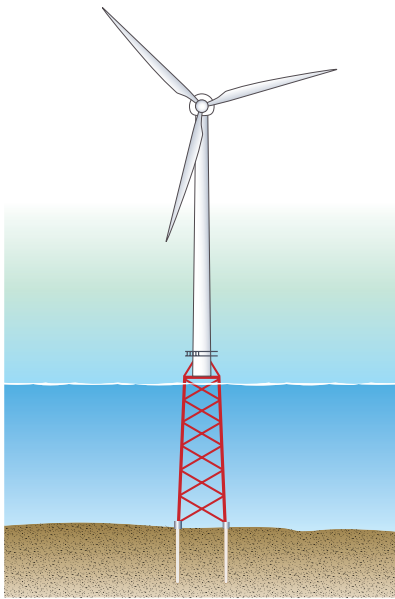
www.wilhelmsen.com



Prinsipp for saltkraftanlegg

Vannturbinen driver en generator for leveranse av elektrisk energi, som kan knyttes til et elektrisk nett for videreføring av energien.

Vindkraftverk



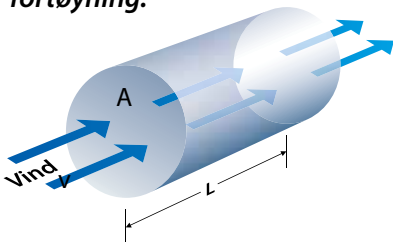
Bunnfast vindturbin.



Illustrasjon: MARINTEK Sintef/Stenberg

- 1 Gir med tre trinn (kan utføres med ett trinn hvis generatoren lages med mange nok polpar).
- 2 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 marginen, 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:

$$\frac{P_{\text{vind}}}{A} = \frac{E_k}{A \Delta t} = \frac{\rho \cdot A \cdot L \cdot v^2}{2 \cdot A \cdot \Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

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 mariningeniør 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

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \cdot A_{\text{rotor}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 = \frac{16}{54} \cdot \rho \cdot A_{\text{rotor}} \cdot v^3 \text{ [W]}$$

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 $\eta_{\text{rotor}} = 0,8 \cdot \frac{16}{27} = 0,47$. Før energien kan leveres til strømmettet, er det ytterligere tap i omformingen fra mekanisk til elektrisk energi. I dagens turbiner benyttes vanligvis et mekanisk gir for å øke akseleghastigheten 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

$$\eta_{\text{tot}} = \eta_{\text{rotor}} \eta_{\text{gir}} \eta_{\text{el}} = 0,47 \cdot 0,97 \cdot 0,95 = 0,43$$

I dag (2009) har de største vindturbinene en installert effekt på 5 MW. 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 generatorene (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 generatorene 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), turbindiameter 72 m og virkningsgrader som gitt ovenfor. Beregn: vindens effektressurs per m² (P_{vind}/A), effektressurs for rotorarealet (P_{vind}), vindturbinens leverte effekt (P_{turbin}) og levert elektrisk effekt fra kraftverket (P_{el}),

Løsning:

$$P_{\text{vind}}/A = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 = \frac{1}{2} \cdot (1,29 \text{ kg/m}^3) \cdot (10 \text{ m/s})^3 = 0,645 \text{ kW/m}^2$$

$$P_{\text{vind}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A_{\text{rotor}} = (0,645 \text{ kW/m}^2) \cdot \pi \cdot (36 \text{ m})^2 = 2,62 \text{ MW}$$

$$P_{\text{turbin}} = P_{\text{vind}} \cdot \eta_{\text{rotor}} = 2,62 \text{ MW} \cdot 0,47 = 1,23 \text{ MW}$$

$$P_{\text{el}} = P_{\text{turbin}} \cdot \eta_{\text{gir}} \cdot \eta_{\text{gen}} = 1,23 \text{ MW} \cdot 0,97 \cdot 0,95 = 1,13 \text{ MW}$$

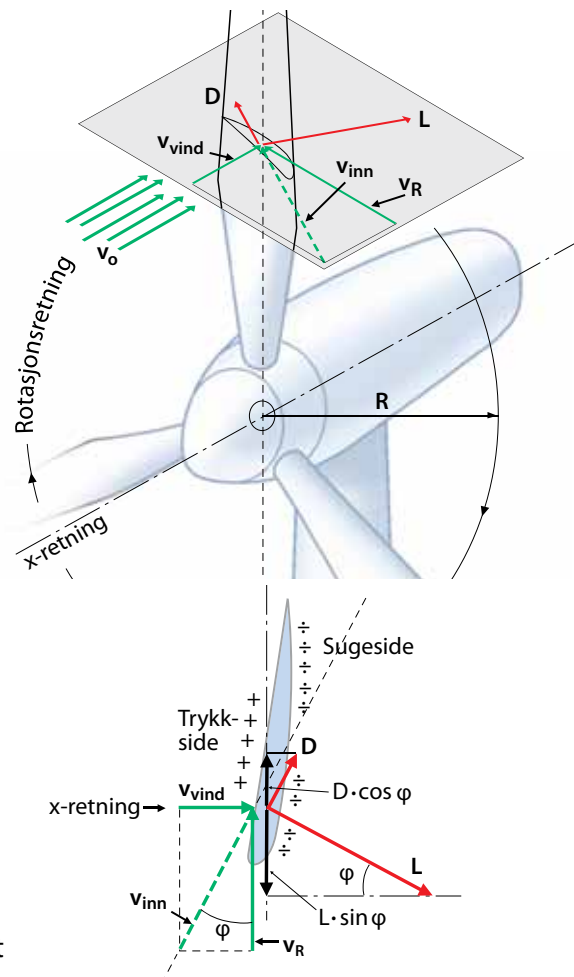


Vi undrer oss på:

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 innstrømnings-hastighet sett fra bladet, danner vinkelen φ med rotasjonsplanet

Krefter (på en flate med lengdeelement ΔR i bladets lengderetning)

L = løftekraft

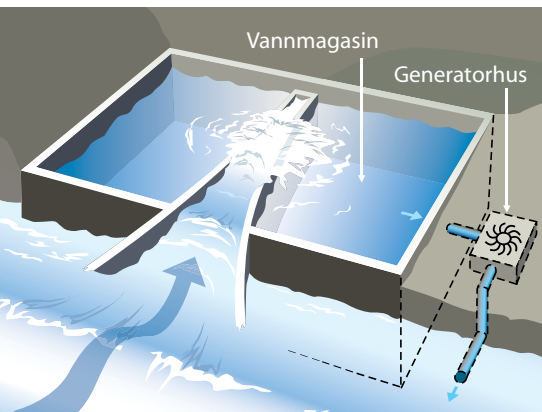
D = friksjon

Dreiemoment fra et turbinblad (sum over lengdeelementer):

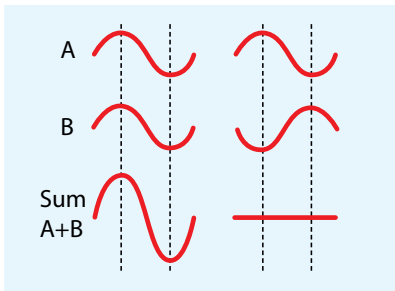
$$M_d = \sum (L \cdot \sin \varphi - D \cdot \cos \varphi) \cdot R$$

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.

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 vantturbine 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.

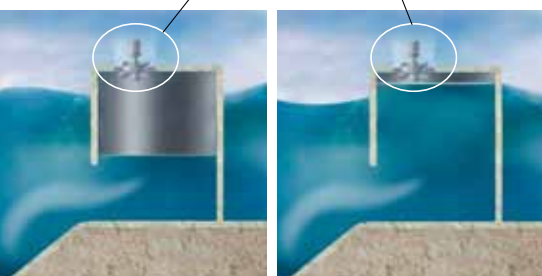
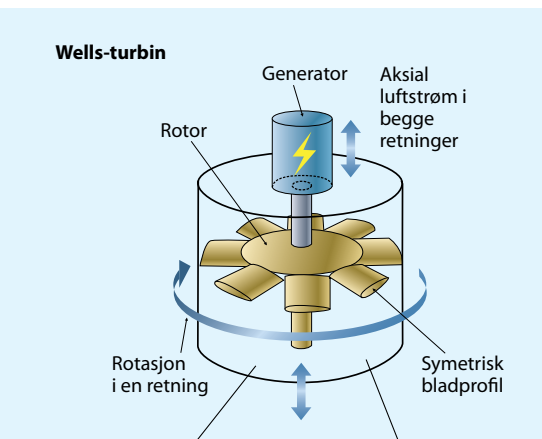
Klarer vi med vår bølge B å oppnå destruktiv interferens med bølge A, vil den resulterende bølgen ha mindre amplitude enn bølge A, og det betyr det at vi har hentet energi ut av bølgen. Det er dette som skjer i alle signalmottakere (mobiltelefoner, radio og fjernsyn), i mikrobølgeovner (hvor vannmolekylene 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 bølgekaraktistika (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 luftturbine. 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 luftturbine, 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.



Svingende vannsøyle som vekselvis blåser og suger luft gjennom en turbin.

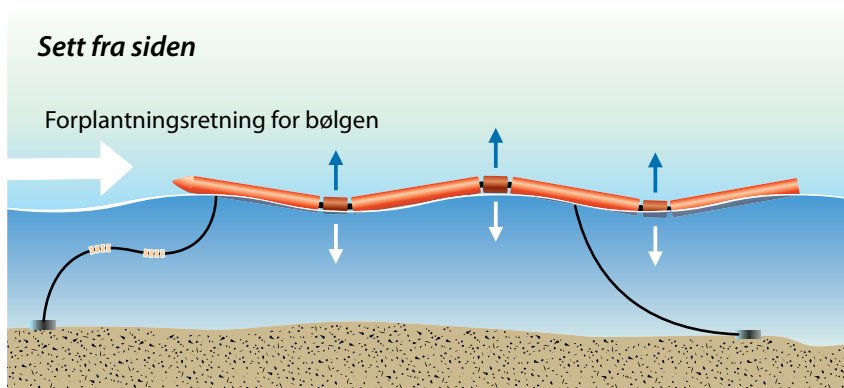
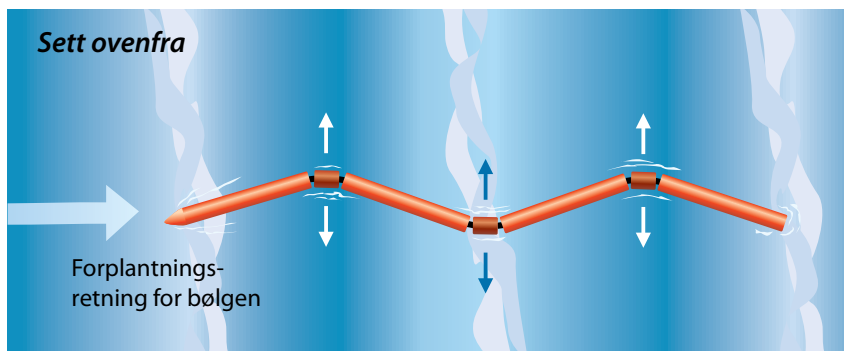
Eksempel 11. Allerede i 1985 prøvde man ut et bølgekraftverk av denne typen ved Toftestallen nordvest for Bergen. Det hadde en ti meter bred kammeråpning mellom dybde 3,5 m og 7,0 m. La oss anta at bølgekraftverket kan omforme 90 % av energien som kommer inn over en bredde lik kammeråpningen. Med en 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/horisonal 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 vannsøylar 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. Sylindlerleddene 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 koblet 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).

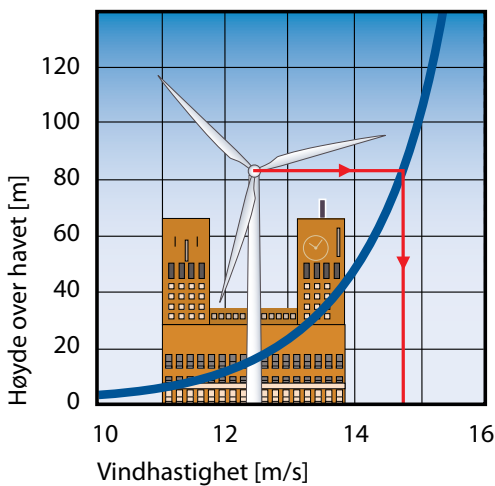
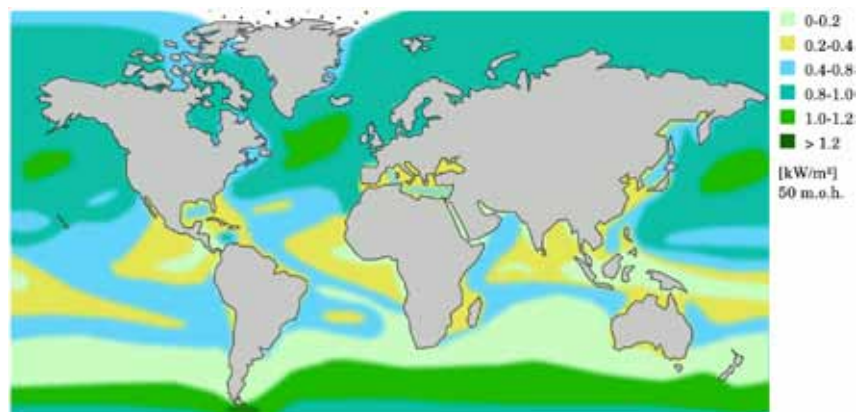
Variasjon. Vinden er en del av det globale værssystemet, og varierer derfor med både tid og sted. Hos oss i nord er vinden på havet i snitt mye sterkere vinterstid enn om sommeren, mens det ved ekvator generelt er mye mindre vind enn hos oss, og liten variasjon mellom årstidene. Dette gjenspeiler seg 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 bremsset 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/m² i høyde 50 meter over havet.



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.

Fordeling av den globale vind-effektressursen pr. m² (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:

$$\frac{P}{B} = \frac{1}{2} \rho g \left(\frac{H}{2} \right)^2 \frac{v_w}{2} = \frac{\rho g^2}{32\pi} TH^2 \text{ [W/m]}$$

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]

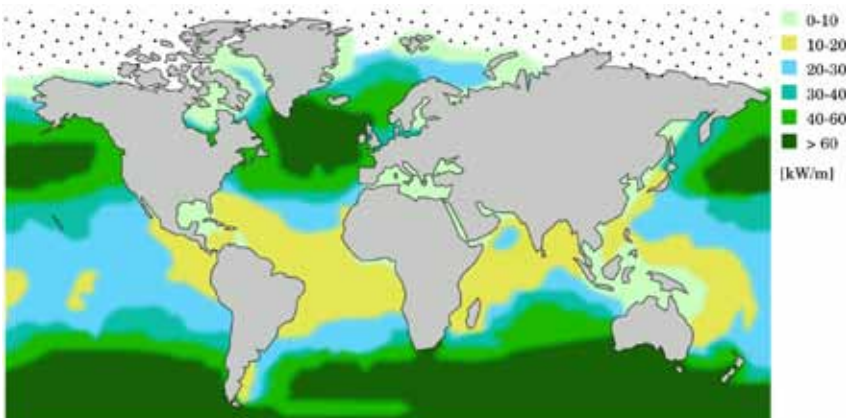
Ved innsamling av bølgedata fra alle verdens hav, kan bølgenergi-strømmen beregnes av uttrykket ovenfor og framstilles som vist i kartet under. Utenfor norskekysten har vi typisk et årsgjennomsnitt på 30-50 kW/m.

Eksempel 12

Typiske verdier for bølger i vintervær utenfor norskekysten kan være: bølgehøyde $H=5$ m og bølgeperiode $T = 9$ s. Beregn bølgenes effektressurs pr. m bredde.

$$\frac{P}{B} = \frac{1025 \text{ kg/m}^3 \cdot (9.81 \text{ m/s})^2}{32\pi} 9 \text{ s} \cdot (5\text{m})^2 = 221 \text{ kW/m}$$

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.



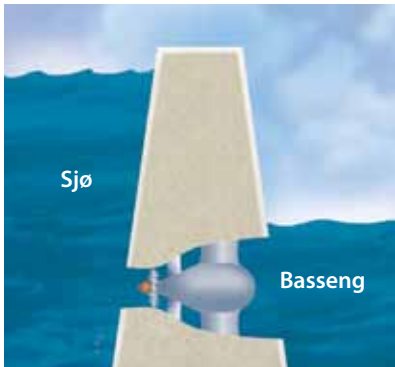
Global fordeling av bølgenes effektressurs pr. meter bredde (årsgjennomsnitt). Basert på tall fra Cruz: Ocean Wave Energy (2008).



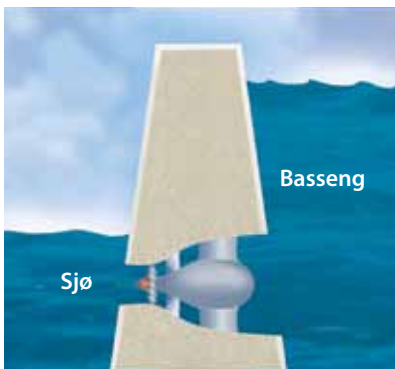
Vi undrer oss på:

Hvorfor er både vind- og bølgeressursen mindre nær land enn ute på havet?

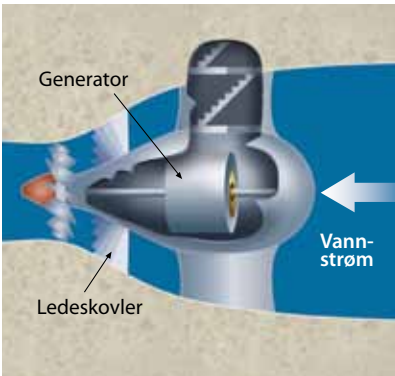
Tidevannskraftverk



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 vantturbine 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 vantturbinene 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 km² 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:

$$E_p = m_{tot} \cdot g \cdot \Delta h = 9,02 \cdot 10^{10} \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 5,5 \text{ m} = 4,87 \cdot 10^{12} \text{ J}$$

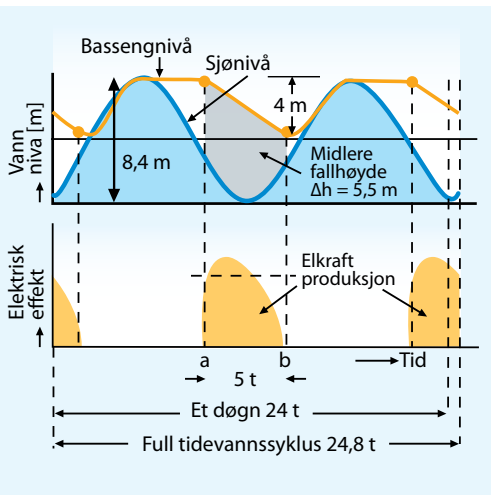
Siden produksjonen skjer over en periode på fem timer, får vi at turbin- og generatorsystemet totalt må levere en midlere effekt på

$$P_{el} = \eta_{tot} \cdot E_p / \Delta t = 0,63 \cdot 4,87 \cdot 10^{12} \text{ J} / (5 \cdot 3600 \text{ s}) = 170 \text{ MW}$$

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 ($1,29 \text{ kg/m}^3$), og at strømningshastighetene i tidevannsstrømmene vanligvis er lavere enn typiske vindhastigheter.

I Kvalsundet i Finnmark er maksimumshastigheten til tidevannsstrømmen ca. $2,5 \text{ m/s}$ 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 $12,4 \text{ h}$ og at turbinen i snitt over tidevannsyklusen vil kunne produsere halvparten av maksimal-effekten. Anta videre at midlere rotorvirkningsgrad (effekt i forhold til tilgjengelig effekt i vannstrømmen medregnet Benz'grense) er $\eta_{\text{rotor}} = 0,3$. Vi får da en snitteffekt på

$$P_{\text{el}} = 0,50 \cdot \eta_{\text{rotor}} \cdot P_{\max} = 0,50 \cdot 0,3 \cdot 2,5 \text{ MW} = 375 \text{ kW}$$

Dette gir en årsproduksjon lik $375 \text{ kW} \cdot 24 \cdot 365 \text{ h/år} = 3,3 \text{ GWh/år}$, som dekker behovet for ca. 150 typiske husstander.

Tidevannsressursen

Flo og fjære oppstår hovedsakelig i en kombinasjon av månens tiltrekning på jorda, og månens 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. $10 \mu\text{s}$ 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:

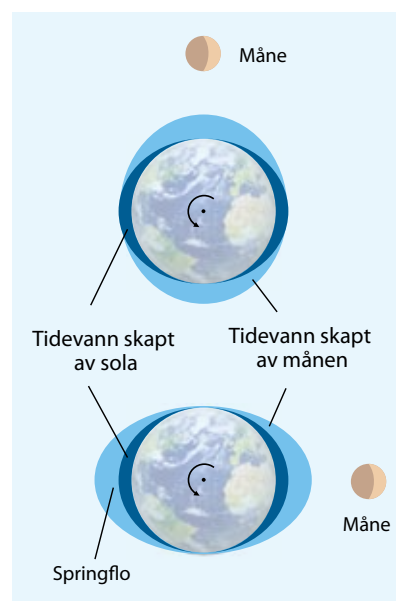
Hva kan man gjøre for å få en jevn tilgang på elektrisk energi, i stedet for den variasjonen man ser i figuren nederst på venstre side?



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