

ENERGI FRÅ HAVBØLGJER FØR, NO OG SIDAN

Johannes Falnes
Institutt for fysikk, Noregs teknisk-naturvitskaplege universitet,
7034 Trondheim

Naturgrunnlaget.

Ein del av solenergien blir til vindenergi i lufta, og ein del av vindenergien blir til bølgeenergi i det øvre laget av havet. I kvart steg i denne omforminga blir energien fortetta. I årsmiddel svarar solenergien til ca. 100-200 watt pr. kvadratmeter horisontal flate. Pr. kvadratmeter vertikal flate kan tilsvarende tal vera omlag ein halv til ein kilowatt for vindenergien og fleire kilowatt for bølgeenergien. Nordanfor tropiske område er vindenergien og bølgeenergien rikelegare om vinteren enn om sommaren.

Mest bølgeenergi er det ute i Atlanterhavet og Stillehavet mellom breiddegradane 40 og 65. Der er energitransporten typisk i området 50 til 100 kW pr. meter breidd av bølgekammen (bølgefrenten). På tropiske breiddegradar er det i området 10-20 kW/m. Nærmare land er det mindre energi, både fordi bølgjene blir hindra av øyar og fastland og fordi energi går tapt ved friksjon mot botnen i grunnare farvatn. Effekten i bølgjene som kjem inn til alle verdsens kystar er påreknar til å vera av storleiksorden 1TW (1 milliard kilowatt). Dette talet svarar til omlag tredjeparten av det globale elektrisitetsforbruket.

I havet utanfor norskekysten mellom Stad og Lofoten er bølgeenergitransporten i tidsmiddel i området 30-40 kW/m. Lenger sør og nord er det 20-30 kW/m, men mindre innover i Skagerak. Den totale ressursen i norske farvatn er ikkje vesentleg mindre enn energiressursen i alle våre vassdrag. Den middels bølgeenergien er minst dobbelt så stor om vinteren som om sommaren. Ved Toftestallen i Hordaland, der kraftverk produserte elektrisitet frå havbølger i åra 1985-1991, er energitransporten inn mot land typisk i området 7-10 kW/m. Der er det ein omlag 40 graders sektor mot ope hav i retning vestsørvest.

Metodar for utnytting.

Mesteparten av bølgekraftforskinga, i alle høve i Europa, har hatt som føremål å utnytte bølgeenergien til elektrisitetsproduksjon. Men det er mange andre, meir direkte føremål som bølgeenergien kan brukast til. Det kan vera til framdrift av farty, og til pumping av reint sjøvatn til fiskeoppdrettsanlegg eller til ureina hamnebasseng eller fjordarmar der det er for lite naturleg utskifting av sjøvatn. Sjøvatn pumpa til høgt trykk kan (gjennom prosessen omvendt osmose) brukast til produksjon av ferskvatn. Tilsvarende anlegg kan også kombinerast med delvis

elektrisitetsproduksjon ved å la høgtrykksvatnet driva turbinar. I somme tilfelle kan det vera nyttig å byggja bølgekraftverk som ein integrert del av ein hamnemolo, eller av andre bølgiesvekkjande innretningar for å hindra stranderosjon eller for å fremja strandbaserte fritidsaktivitetar. I ei meir fjern framtid er det tenkjeleg at bølgeenergien kan bli utnytta ute på storhava av store flytande anlegg som produserer hydrogen eller andre kjemiske stoff med rikt energiinnhald.

Omforminga av energi skjer primært ved at bølgiene vekselverkar med eit mekanisk svingesystem, der energien manifesterer seg som potensiell og kinetisk energi. I neste steg blir energien omforma til nyttig mekanisk eller elektrisk energi, med hjelp av eigna maskineri, som t.d. pumper, turbinar og elektriske generatorar. I patentlitteraturen er det gjort framlegg om eit mangfald av ulike tekniske innretningar for å verkeleggjera omforming av bølgeenergi til nyttig energi. Nokre aktuelle framlegg er viste skjematisk i figur 1.

Somme framlegg til bølgekraftverk er teknisk enkle, men det krevst mykje byggjematerial (som betong og stål) i høve til den nyttige energien som kan leverast frå kraftverket. Andre framlegg, som er teknisk meir avanserte, krev etter måten mykje mindre med byggjematerial, og har difor eit framtidspotensial for å kunna produsera nytteenergi billegare. Men det vil krevja ein forskingsinnsats over lengre tid, før meir avanserte bølgekraftverk kan bli utvikla.

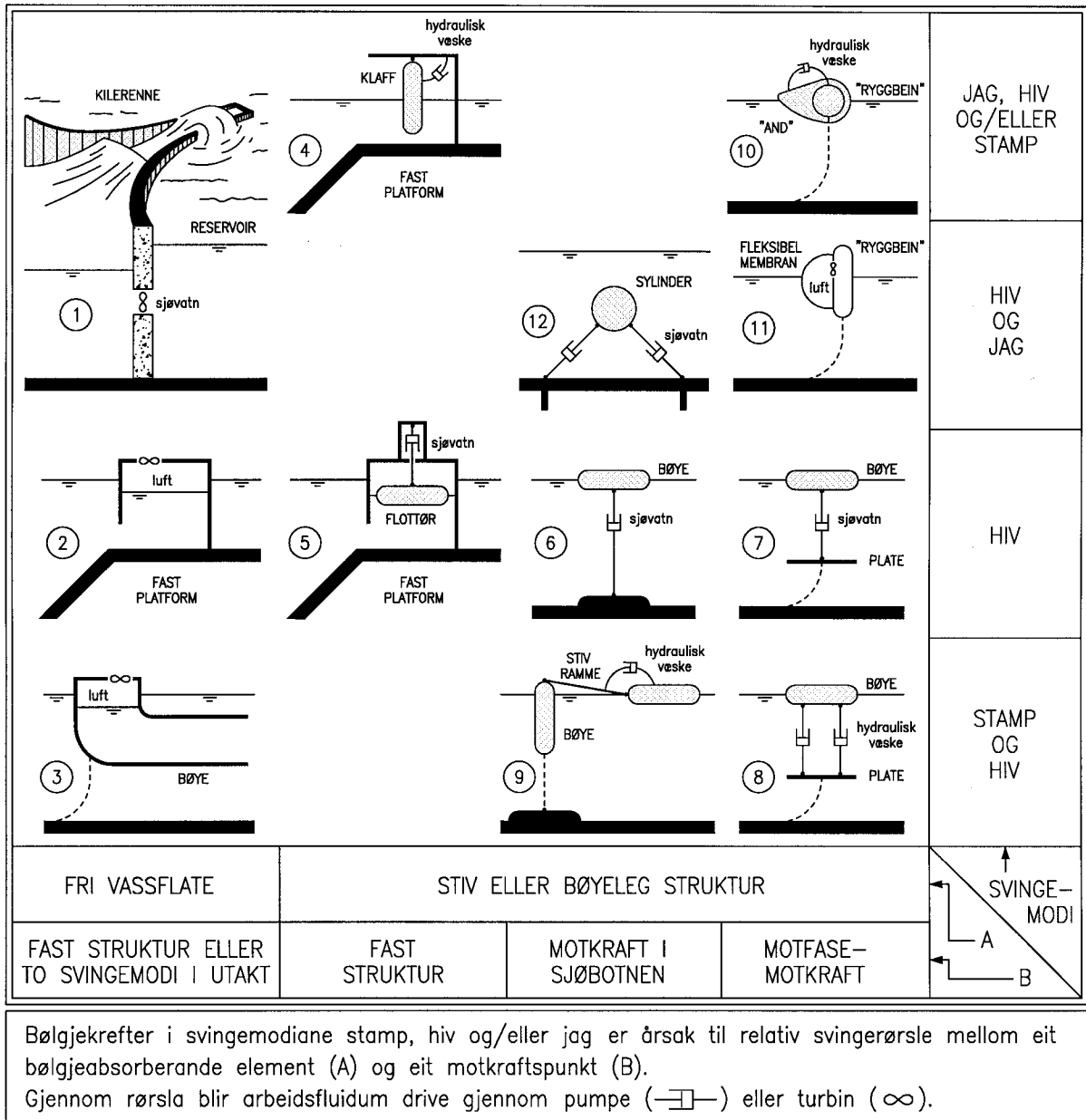
Gjennom dei siste tjue åra har det i Japan, Kina, Noreg, Portugal, Storbritannia, Sverige og fleire andre land vore arbeidd med forskning og utvikling på mange ulike typar bølgekraftverk, men det er altfor tidleg enno å seia kva type som til slutt vil vera den beste. Teknologien er enno på "spedbarnstadiet".

Somme forskarar meiner at tida ikkje enno er mogen for å setja bølgekraftverk i sjøen. På eit møte tilskipa av EU-Kommisjonen i Brussel 25.-26.april 1991 sa den kjende skotske bølgeenergiforskaren Stephen Salter: "Eg ynskjer ikkje å vera den fyrste med bølgekraftverk i sjøen. Eg ynskjer å vera den siste. Eg ynskjer å gjera mistaka for meg sjølv i laboratoriet, og bruka instrument som fortel meg kva gale eg har gjort, slik at eg slepp gjera mistaka om att."

Men andre meiner det er viktig å få prototypar eller forsøkskraftverk i sjøen snart. Særleg har japanske forskarar vore ivrige med dette. Gjennom dei siste tretti åra har japansk industri levert over eitt tusen navigasjonsbøyar med energiforsyning frå bølger (i storleiksorden 100 W) gjennom eit oppladbart batteri. I dei siste tjue åra har større bølgekraftverk med effekt opptil ein halv megawatt vore prøvde i sjøen i Japan, Noreg, Kina, India og Skottland (i kronologisk rekkjefølgje). Når det gjeld kraftverkseiningar med installert effekt over 100 kW, er det vel berre ein type som no er teknologisk nok mogen, nemleg det kilerennekraftverket som det norske selskapet Norwave A.S. har utvikla. Eit slikt anlegg med effekt 1,1 MW skal 1997-98 bli bygt på Java av eit anna norsk selskap, Indonor A.S.

Historikk - og litt politikk.

For hundre år sidan og fram til omkring fyrste verdskrigen, då billeg olje gjorde seg meir og meir gjeldande på energimarknaden, var det somme som arbeidde med utvikling av bølgekraftverk. Mange hundre framlegg til bølgekraftverk var då beskrivne i patentlitteraturen. Det eldste vi veit om, er frå eit fransk patentskrift datert i 1799. I mellomkrigstida ser det ikkje ut til å ha vore noka stor interesse for havbølgeenergi.



Figur 1. Eit b lgjekraftanlegg kan vera plassert i stranda, n r land p  ein molo eller p  ein botnst ande konstruksjon (1, 2, 4, 5), eller plassert i djupare vatn langt fr  land (3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12). B lgjekreftene verkar p  ein r rleg absorlator, som arbeider anten mot eit fast punkt (p  land eller sj botnen) (1, 2, 4, 5, 6, 12) eller mot ein annan r rleg, men motkraftytande, struktur (3, 7, 8, 9, 10, 11). N r eit langt "ryggbein", felles for fleire like absorbatorar, skal gi motkraft, b r det ha ei lengd p  meir enn ei typisk b lgjelengd. Den svingande r rlege absorbatoren kan vera sj vatn (1, 2, 3), eit b yeleg medium (11) eller ein stiv kropp (4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12). For dei fleste b lgjekraftanlegg er absorbatoren i vassflata, men han kan ogs  vera litt neddukka (12). Svinger rsla kan vera vertikal (hiv), horisontal (jag) eller roterande omkring ein akse langs r dande b lgjefrontretning (stamp). Luftturbinar (2, 3, 11) eller hydraulisk maskineri kan brukast for   konvertera den absorberte b lgjeenergien til nyttig energi. Det hydrauliske maskineriet kan vera ein vasssturbin (1) eller ei pumpe som skaffar trykk i ei hydraulikkv ske (vatn eller olje), som driv ein hydraulisk motor.

Den moderne pioneren har vore den japanske oppfinnaren Yoshio Masuda, som starta utviklingsarbeidet rett etter andre verdskrigen, og han har heilt til 1995 vore aktiv i bølgekraftforskninga. Slik forskning kom ikkje i gang ved noko universitet før under "oljekrisa" i 1973, fyrst i Edinburgh og nokre månader etterpå i Trondheim.

I siste halvdel av 1970-åra vart det stor politisk interesse for utvikling av bølgekraftverk. Den britiske regjeringa, ved energidepartementet, sette i 1976 i gang eit større forskingsprogram. Eit par år etterpå tok også regjeringane i somme andre land, m.a. Noreg og Sverige, til med å gi monaleg finansiell støtte til bølgekraftforskning.

I 1982 vart det vedteke å avslutta det storstilte britiske utviklingsprogrammet med bølgeenergi. Forfattaren David Ross påviser i si bok "Power from the Waves" (1995) at vedtaket var reint politisk, og at det ikkje kunne byggja på faglege tekniske grunnar. Det er òg døme på at ein forskingrapport vart forfalska for å setja bølgeenergien i eit dårleg lys, og dette vart sidan handsama i ein komite i det britiske parlamentet. Var det fare for at bølgeenergien kunne bli ein reell konkurrent til kjerneenergien, som den britiske regjeringa ynskte å byggja ut?

I dei nærmaste åra etter dette vedtaket i Storbritannia, følgde ei nedbygging av bølgeenergiforskninga også i ein del andre land, som Noreg og Sverige. Arbeidet i Japan vart truleg mindre påverka av det britiske vedtaket. Bølgeenergiarbeidet som har gått føre seg i India, Kina og Portugal, var berre i liten mon kome i gang føre 1982. Etter 1991 har EU-Kommisjonen løyvt litt pengar til utgreiingsarbeid om bølgeenergi og til bygging av anlegg som skal prøvast i sjøen, m.a. i Portugal og i Skottland. I Danmark har eit bølgeenergi prosjekt vore i gang frå ikring 1980, og det har fått så mykje finansiell støtte at det har vore råd å prøva eit anlegg i sjøen fleire gonger. I Danmark er det i større mon vindenergien heller enn bølgeenergien som, på kort sikt, har truga konvensjonell energi med konkurranse. (Dvs. det har vore mindre konkurransefarleg å "betala avlatspengar" til bølgeenergien!)

Det er velkjent at ny teknologi møter psykologiske barrierar og institusjonelle motbakkar. Kanaleigarane i Europa motarbeidde utbygging av jernbane, og jernbanane var lenge lite interesserte i å samarbeida med konkurrentar på vegane og i lufta. På 1950-talet hadde dei styrande i det norske Telegrafverket lite tru på andre telefonoverføringssystem enn dei med kablar og telefonlinjer, og det var andre instansar som utvikla trådløse telefonoverføring med elektromagnetiske mikrobølger.

Etter 1982 har satsinga på utvikling av bølgekraftverk vore langt mindre enn i femårsperioden omkring 1980. Og ein stor del av det vesle som har vore satsa, har gått til prøving i sjøen av nokre bølgekraftverk av teknisk sett enkle typar. Forskingsarbeidet som gjeld utvikling av framtidens meir avanserte typar bølgekraftverk har difor i stor mon vore forsømt etter 1982, bortsett kanskje frå i Japan.

Norsk innsats i bølgekraftforskninga.

Frå 1978 vart det gjennom Olje- og energidepartementet (OED) gitt offentlege løyvingar til bølgekraftforskninga. Nokre år tidlegare hadde fysikarar både ved SI i Oslo og ved NTH i Trondheim starta teoretiske studiar omkring utnytting av bølgeenergien, men med større ressursar tilgjengelege frå 1978 kunne grundigare utgreiingar og omfattande eksperimentelle aktivitetar bli sette i gang.

I den fyrste femårsperioden (t.o.m. 1982) vart det løyvt ca. 55 mill. kr. I dei to neste femårsperiodane vart det løyvt 28 og 18 mill. kr, og det var i den fyrste av desse to periodane at dei to bølgekraftanlegga vart bygde av Norwave og av Kværner Brug på Toftestallen i Øygarden, Hordaland. Etter 1992 har dei årlege løyvingane berre blitt mindre og mindre, så det må eit kraftig hopp oppover i budsjettet for 1997 om ikkje inneverande femårsperiode skal koma på jumboplass i samanlikninga her. Med dei relativt små løyvingane dei siste åra har det, trass alt, vore råd å halda ved lag ein viss aktivitet med universitetsforskning. Men sjølve den teknologiske utviklinga, som krev aktiv industriinnsats, må stort sett mangla når løyvingane er så små.

Merk at dei nemnde pengesummane her ikkje er inflasjonskorrigerte. I verkeleg pengeverdi er altså nedskjeringa i løyvingane endå større enn tala gir inntrykk av. Til samanlikning kan det nemnast at i femårsperioden omkring 1980 løyvde den britiske regjeringa om lag tre gonger så mykje til bølgeenergi som den norske, men endå mindre enn den norske regjeringa i dei to neste femårsperiodane.

Noreg med sin lange kyst har ein langvarig maritim tradisjon, og også når det gjeld bølgekraftforskning, var norske bølgekraftforskarar tidleg ute. Gjennom dei siste tjue åra har norske forskarar vore med i teten her, og dei har ytt viktige og originale tilskot til dette nye forskingsfeltet. Vi har framleis føresetnader for å vera ein leiande nasjon, noko som også bølgekraftprosjektet i Indonesia er eit vitnemål om. Men skal vi greia å halda denne skansen, trengst det ein kraftig auke i forskings- og (særleg) utviklingsarbeidet. Det er absolutt nødvendig å få industrien meir aktivt med i arbeidet, og til det trengst offentleg subsidiering, då dette er ei forskning som nødvendigvis er langsiktig. Det er potensial for ei svært høg avkastning på lengre sikt. Marknadspotensialet er enormt.

Framtidig inntening etter investering i forskning og utvikling.

Det er vanleg at eit nytt produkt er dyrare i fyrstninga enn seinare, når det er blitt selt meir av produktet. Ein typisk trend har vist seg å vera at produksjonskostnad og pris går ned med ca. 20 til 25 prosent for kvar dobling av det kumulative produksjonsvolumet. Dette er eit resultat av læring frå praktiske røynsler, ny kunnskap, nye oppfinningar, nye material, nedskrivning av utviklingskostnader, meir økonomiske produksjonsmetodar osv.

Bølgekraftteknologien er enno heilt i starten på ei slik utvikling. Det vil seia at ein ikkje direkte kan døma om framtida for utnytting av bølgeenergien ut frå den energikostnaden som dagens teknologi gir. Men indirekte kan ein analyse, nemnt nedanfor, gi grunnlag for ei vurdering.

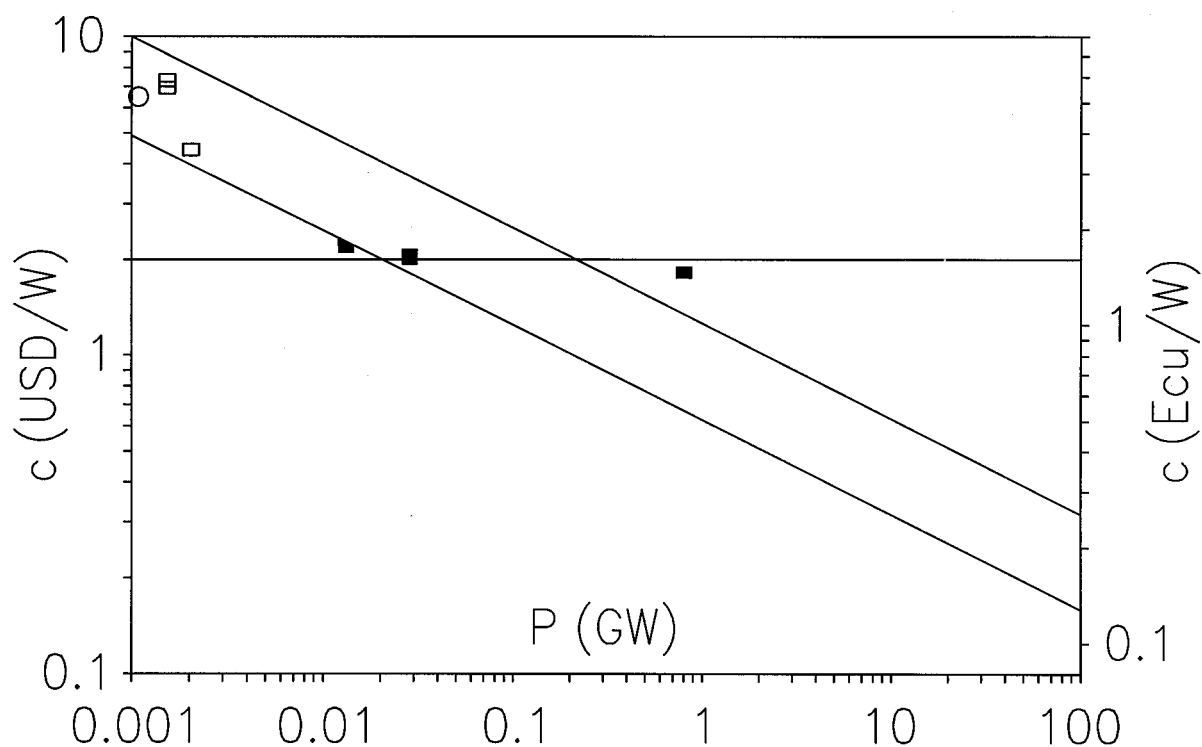
Det planlagde bølgekraftverket på Java skal ha ein installert effekt på 1,1 MW, og det er kostnadsrekna til vel 50 mill. kr. Det tilsvarar ikring 50 kr/W, dvs. noko mindre enn 10 USD/W. Dette vil vera ein godtakande marknadspris i mange små øysamfunn som har dyr elektrisitet frå dieselkraftverk. Men for å bli akseptert på den store globale energimarknaden, må investeringskostnaden ned i ca. 2 USD/W.

La oss som utgangspunkt for ein analyse gå ut frå at investeringskostnaden er 10 USD/W når den samla utbygginga av bølgekraftverk passerer 1 MW i installert effekt. Vidare skal vi konservativt gå ut frå at det blir ein kostnadsreduksjon på 19 prosent for kvar dobling av den totalt installerte effekten. Det svarar til ei halvering av kostnaden om produksjonsvolumet aukar med ein faktor 10. Når det då er bygt ut bølgekraftverk med ein samla effekt på 10 MW, 100 MW, 1 GW, 10 GW og 100 GW skulle investeringskostnaden bli respektivt 5, 2,50, 1,25, 0,625 og 0,3125 USD/W. I 1988 gjorde G. Hagerman, SEASUN Power Systems, Virginia, USA, ei evaluering av 12 ulike bølgekraftanlegg føreslått av tolv firma frå åtte land. Han kom då til kostnadstal, der dei fleste er noko lågare enn den trenden vi her byggjer vår analyse på. Sjå figur 2.

For å gjera analysen enkel ser vi her bort frå den delen av marknaden som kan betala meir enn 2 USD/W. I så fall vil ikkje bølgeenergien bli kommersiell før total investert effekt har kome opp til 210 MW. Inntil dette kan skje, trengst det då 180 mill. USD i subsidiering for å dekkja skilnaden mellom produksjonskostnad og marknadspris. Derimot vil den vidare utbygginga til 10000 MW = 10 GW, og sal av desse kraftverka, kunna gi ei avkastning på ca. 11 mrd. USD, eller omlag 60 gonger meir enn den ovannemnde nødvendige subsidieringa. Merk at 10 GW er berre om lag 1 prosent av den effekten som bølgjene inn mot alle kystane i verda representerer. Blir utnyttinga auka til 10 prosent, svarande til ein samla installert effekt på 100 GW, så gir analysen her ei netto avkastning på om lag 155 mrd. USD, som er over 800 gonger meir enn den subsidieringa som trengst for å utløyse denne avkastninga.

Her ligg det ei stor utfordring for det norske samfunnet og det norske næringslivet. Hugs at vi enno ligg i teten i forskinga i dette feltet! Hugs også at Noreg har både ein maritim tradisjon og ein tradisjon som stor energiproducent! Det er fyrst og fremst med eksport her kan vera eit godt beite for næringslivet.

Når bølgekraftteknologien har blitt utvikla til å bli kommersiell på vår energimarknad, er det råd å skaffa også vårt land eit viktig energitilskot frå bølgjene. Middeffekten i bølgjene inn mot norskekysten er i alt om lag 40 GW. Med ei utnytting på 10 prosent, kan bølgjene såleis representera eit tilskot på opptil 4 GW til vår installerte totale effekt i energiforsyninga.



Figur 2. Investeringskostnad for bølgekraftverk (i forhold til installert effekt) som funksjon av kumulativt produksjonsvolum (her: total installert effekt). Fallet i kurvene svarar til 19 prosent kostnadsreduksjon ved fordobling av volumet, dvs. halvering når volumet aukar med faktoren 10. Den øvre (pessimistiske) kurva går ut frå at kostnaden er 5 USD/W når total utbygd effekt er 10 MW = 0,01 GW. For den nedre (optimistiske) kurva er tilsvarende utgangskostnad 2,50 USD/W. Den tjukkare horisontale linja viser den pårekna marknadsprisen 2 USD/W. Dei kvadratforma punkta i diagrammet viser tal for nokre kraftverk, av ulike typar, som vart evaluerte i 1988 av G. Hagerman, SEASUN Power Systems, Alexandria, Virginia, USA. Det sirkelforma punktet gjeld det planlagde kilerennekraftverket som Indonor A.S. skal byggja på Java i Indonesia. [Merk at skalaene i diagrammet er logaritmiske. Det vil seia at avkastninga (arealskilnaden mellom marknadsprisen og investeringskostnaden i siste delen av utviklingsfasen) totalt sett er mange, mange gonger større enn den totale subsidieringa (arealskilnaden mellom investeringskostnad og marknadspris i den fyrste delen av utviklingsfasen).]

Bøker om bølgekraftverk.

Tre letlesne populariserte bøker (den fyrste om berre det britiske forskingsarbeidet, den andre har ei historisk-politisk vinkling, og deler av boka kunne kanskje ha vore dramatisert for teaterframføring!):

- David Ross: "*Energy from the Waves*", (Pergamon Press 1. utg. 1979, 2. utg. 1981).
- David Ross: "*Power from the Waves*", (Oxford University Press, 1995) (ISBN 0-19-856511-9).
- Curt Falkemo: "*Vågenenergiboken*", (Ingenjöröförlaget, Stockholm 1980).

Bøker med meir teknisk-vitskapleg behandling av stoffet:

- Michael E. McCormick: "*Ocean Wave Energy Conversion*", (John Wiley & Sons, New York, 1981).
- Ronald Shaw: "*Wave Energy. A Design Challenge*", (Ellis Horwood Ltd., Chichester, England, 1982).
- Lennart Claeson m.fl.: "*Energi från havets vågor*", Efn-rapport nr. 21 (Energiforskningsnämnden, Stockholm, 1987).

Følgjande bøker inneheld prenta foredrag frå vitskaplege konferansar:

- B. Count (editor): "*Power from SeaWaves*", (Academic Press, 1980).
- "*First Symposium on Wave Energy Utilization. Proceedings*", (CTH, Göteborg, 1979).
- "*Second International Symposium on Wave Energy Utilization. Proceedings*", (Tapir, Trondheim, 1982).
- D.V. Evans and A.F.O. Falcão (editors): "*IUTAM Symposium Lisbon 1985. Hydrodynamics of Ocean Wave Energy Utilization*", (Springer Verlag, 1985).
- T. Miyazaki and H. Hotta (editors): "*Third Symposium on Ocean Wave Energy Utilization*", (January 22-23, 1991, Tokyo, organised by Japan Marine Science and Technology Center).
- H. Kondo (editor): "*Proceedings of International Symposium on Ocean Energy Development*", (26-27 August 1993, Muroran, Hokkaido, Japan.) (ISBN 4-906457-01-0).
- G. Elliot and G. Caratti (editors): "*1993 European Wave Energy Symposium. Proceedings of an International Symposium held in Edinburgh, Scotland, 21-24 July 1993.*" (ECSC-EEC-EAEC, Brussels, 1994.) (ISBN 0-903640-84-8).

- Under førebuing (april 1996): Proceedings
 - - - Second European Wave Power Conference, 8-10 November 1995, Lisbon, Portugal.

Følgjande oversynsbøker har kvart sitt kapittel om bølgeenergi:

- G.L.Wick og W.R.Schmitt: "*Harvesting Ocean Energy*", (The Unesco Press. 1981).
- "*Akvatisk energi*", (Resultatrapport NE 1981:16 frå Nämnden för Energiproduktionsforskning, Box 1103, S-16312 Spånga, Sverige).
- G.Parmann: "*Alternative energikilder og energiøkonomisering*", (Dreyer, Oslo, 1978).
- Ø.Holter m.fl.: "*Alternative energiressurser*", (Universitetsforlaget, 1979).
- R.H.Taylor: "*Alternative Energy Sources for the Centralised Generation of Electricity*" (Adam Hilger, Ltd., Bristol 1983).
- J.W. Twindel and A.D. Weir: "*Renewable Energy Resources*", (E.& F.N. Spon Ltd., London, 1986)
- R.J. Seymour (editor): "*Ocean Energy Recovery. The State of the Art.*" (American Society of Civil Engineers, New York, 1992.) (ISBN 0-87262-894-9).
- Tim Jackson (editor): "*Renewable Energy: Prospects for implementation.*" (Stockholm Environment Institute, 1993.) (ISBN 91 8811672-1).
- G. Boyle (editor): "*Renewable Energy. Power for a Sustainable Future.*" (Oxford University Press, 1996.) (ISBN 0-19-856451-1).
- F. Salvesen (redaktør): "*Nye fornybare energikilder.*" (Norges forskningsråd i samarbeid med Norges vassdrags- og energiverk, mars 1996.) (ISBN 82-12-00664-6).