

Ressourceopgørelse for bølgekraft i Danmark

J. P. Kofoed

Carried out under contract for:

Klimakommissionen

Sekretariatet
Energistyrelsen
Amaliegade 44
1256 København K



DCE Contract Report No. 59



Aalborg University
Department of Civil Engineering
Wave Energy Research Group

DCE Contract Report No. 59

Ressourceopgørelse for bølgekraft i Danmark

by

J. P. Kofoed

May 2009

© Aalborg University

Scientific Publications at the Department of Civil Engineering

Technical Reports are published for timely dissemination of research results and scientific work carried out at the Department of Civil Engineering (DCE) at Aalborg University. This medium allows publication of more detailed explanations and results than typically allowed in scientific journals.

Technical Memoranda are produced to enable the preliminary dissemination of scientific work by the personnel of the DCE where such release is deemed to be appropriate. Documents of this kind may be incomplete or temporary versions of papers—or part of continuing work. This should be kept in mind when references are given to publications of this kind.

Contract Reports are produced to report scientific work carried out under contract. Publications of this kind contain confidential matter and are reserved for the sponsors and the DCE. Therefore, Contract Reports are generally not available for public circulation.

Lecture Notes contain material produced by the lecturers at the DCE for educational purposes. This may be scientific notes, lecture books, example problems or manuals for laboratory work, or computer programs developed at the DCE.

Theses are monographs or collections of papers published to report the scientific work carried out at the DCE to obtain a degree as either PhD or Doctor of Technology. The thesis is publicly available after the defence of the degree.

Latest News is published to enable rapid communication of information about scientific work carried out at the DCE. This includes the status of research projects, developments in the laboratories, information about collaborative work and recent research results.

Published 2009 by
Aalborg University
Department of Civil Engineering
Sohngaardsholmsvej 57,
DK-9000 Aalborg, Denmark

Printed in Aalborg at Aalborg University

DCE Contract Report No. 59

Forord

Denne note er blevet til på baggrund af en henvendelse fra KlimaKommisionen til forfatteren, med henblik på at få et bidrag til vurdering af potentialet af bølgekraft, som del af den fremtidige energiforsyning i Danmark. Dette er i henhold til aftale mellem KlimaKommisionen og Bølgeenergiforskningsgruppen ved Aalborg Universitet (AAU), Institut for Byggeri og Anlæg.

Notatet er udarbejdet i perioden januar – februar 2009, af Forskningsgruppeleder Jens Peter Kofoed fra bølgeenergiforskningsgruppen ved AAU (tlf: +45 9940 8474, e-mail: jpk@civil.aau.dk).

Aalborg, Feb. 2009

Version	Date	Author	Comment
0.1	20.02.2009	JPK	First draft
0.2	02.03.2009	JPK	Second draft, sent to client
1.0	07.05.2009	JPK	Final version, sent to client

Indholdsfortegnelse

Beskrivelse	5
Resource.....	6
Teknologi.....	6
Status	9
Potentiale.....	11
Økonomi.....	15
Referencer.....	17

Beskrivelse

De fleste er efterhånden enige om, at vores fremtidige energi forsyning ikke på længere sigt kan være baseret på fossile brændsler, og vedvarende energikilder må derfor gradvis tage over. Men hvad har bølgeenergi at byde på i denne forbindelse – hvad er status, og hvad er teknologiens forcer og ulemper?

Indledningsvis er det på sin plads kort at ridse banen for udnyttelse af bølgeenergi til el-produktion op. Motivationen for bølgeenergi deles langt hen ad vejen med motivationen for de øvrige vedvarende energikilder - det vil sige faktorer som de CO₂ drevne klimaændringer samt det faktum at de fossile brændsler vi i dag baserer vores civilisation på, er en endelig ressource. Om klimaændringerne er menneskebetiget eller ej har været til stor debat over årene, men tvivlen herom er generelt set formindsket væsentligt på det seneste. Hvorom alting er udgør udtømning af de tilgængelige fossile brændselsressourcer rigelig med motivation til at hurtigst muligt at få kørt alternativerne i stilling, således at overgangen fra "olie æraen" til "den vedvarende energi æra" kan ske så lempeligt som muligt. Estimer baseret på nuværende forbrugsniveau peger i retning af udtømning af let tilgængelige oliereserver vil ske inden for ca. 35 år, og tilsvarende for kul indenfor ca. 200 år (se fx Hubbert, 1976, dog er disse tal behæftet med betydelig usikkerhed, Laherrere, 2005). Yderligere taler faktorer som sikkerhedspolitik, forsyningsikkerhed og lokal beskæftigelse også stærkt for de vedvarende energikilder, idet disse som oftest er decentralt og lokalt baserede.

Men hvad er så problemerne? Ja, den primære hemsko er udviklingsstade og dermed pris. Dernæst spiller variationen i den vedvarende energi en rolle, idet vi jo også skal bruge el selvom det ikke blæser. Der vil derfor på længere sigt blive brug for et mix af de forskellige tilgængelige vedvarende energikilder, suppleret med opmagasinering af elektriciteten, samt udveksling over store afstande. Idet bølgerne genereres af vinden, der føder energi heri over store områder, vil bølgeenergi kunne medvirke til at udjævne energiproduktionen i det samlede system, da denne er mere udjævnet og typisk også faseforskudt i forhold til vind. Endvidere lader bølgeenergien sig lettere forudsige end det er tilfældet for vind, hvilket er af væsentlig betydning for planlægning af den øvrige energiproduktion i nettet.

Er der andet der taler for bølgeenergi i forhold til de andre vedvarende energikilder? Tænkes der fremad på storskala udnyttelse af både vind og bølger offshore, så vil energiproduktion pr. arealenhed have blive en konkurrenceparameter systemerne imellem, og her vil offshore bølgeenergianlæg, for de attraktive placeringer mod åbent hav, typisk have en væsentlig fordel i forhold til offshore vindmøller. Dog kan sameksistens vise sig i visse situationer at være den allerbedste løsning, både med hensyn til udnyttelse af det tilgængelige areal, men også med hensyn til fælles udnyttelse af infrastruktur (ilandføringskabler), service mv. Med hensyn til systemernes påvirkning af miljøet er et af de største problemer for vindmøller deres visuelle påvirkning. Dette problem er for bølgeenergianlæg i sagens natur meget mindre. Endelig kan bølgeenergianlæggene tænkes anbragt som "afskærmning" for offshore vindparker, og dermed bidrage til at forbedre tilgængeligheden af disse anlæg, og dermed nedbringe vedligeholdelsesudgifter hertil.

Resource

Hvor stor en bølgeenergiressource er der så til rådighed? Et tal i størrelsesordenen 150.000 PJ/år på verdensplan (30.000 – 300.000 PJ/år, i henhold til Sørensen & Weinstein, 2008), vurderes at være et realistisk bud, med udgangspunkt i de teknologier, der kendes i dag. For at sætte dette i relief er det globale middelenenergiforbrug i 2005 opgjort til ca. 450.000 PJ, hvoraf elektricitet udgjorde ca. 10 %. (Til sammenligning kan det nævnes at den mængde solenergi der rammer kloden udgør ca. 3.600.000.000 PJ/år, eller 8.000 gange vores forbrug!). Globalt set er det altså teoretisk muligt at udvinde flere gange klodens elektricitetsforbrug af bølgerne. De europæiske kyster rammes i middel af en mængde bølgeenergi, der svarer til Europas forbrug af elektricitet, og det samme gør sig nogenlunde gældende for Danmark. Det er selvsagt ikke realistisk at tro at al denne energi kan omdannes til elektricitet, men mindre kan også gøre det. Det siger dog at bølgeenergi har potentialet til at kunne bidrage væsentligt til el-produktionen lokalt, regionalt og globalt.

Teknologi

Når energien i bølgerne skal tappes, er det vigtigt at forstå nogle karakteristika ved havbølger. Når bølgerne bevæger sig henover havoverfladen transmitteres bølgeenergi ligeledes og dette kan på åbent hav ske over store afstand uden nævneværdigt energitab. Selve vandpartiklerne i bølgebevægelsen flytter sig til gengæld ikke – på samme måde som tilskuerne ikke flytter sig, men blot "skubber til" naboen, når der laves "bølge" på et stadion. De enkelte vandpartikler i bølgen bevæger sig således på dybt vand i cirkulære baner med aftagende radius som man kommer ned igennem vandsøjlen. På lavere vand, hvor vandpartikelbevægelsen rammer havbunden, "komprimeres" den lodrette komponent, og vandpartikelbanerne bliver til ellipser. I denne situation øges energitabet ved bølgenes udbredelse gennem bundfriktion og bølgebrydning. Bølgeforholdene vil veksle med vejr og vind. Det vil sige, at de karakteristiske bølgeparametre ikke er konstante over tid, og man må derfor ved udformning af bølgeenergianlæg have detaljeret kendskab til den statistiske fordeling af disse for at tilpasse anlægget til en given lokalitet. Endvidere er bølgerne uregelmæssige og retningsspredte, hvilket vil sige at de enkelte bølger i en given bølgetilstand vil have varierende højde, periode og retning. Disse forhold betyder at energiindholdet på åbent hav langt er større end på lavere vand (typisk tæt på land). Tilsvarende er forholdet mellem kraftpåvirkninger i produktionssituationer og i ekstremssituationer langt større på åbent hav end på lavere vand. Dette betyder at det er svært at sige noget entydigt om, om det er økonomisk mest optimalt at placere sådanne anlæg på åbent hav eller på lavere vand, idet anlæg på åbent hav må forventes at kunne producere mest energi, men også må konstrueres til at modstå væsentligt større kræfter. Generelt kan siges at bølgeenergianlæg skal være effektiv til at optage bølgeenergien i mindre, men ofte forekommende bølger, men ineffektiv i store, sjældent forekommende, bølger, da det i disse situationer handler om overlevelse mere end energiproduktion.

Hvordan ser et sådan bølgeenergianlæg så ud? Svaret herpå er langt fra entydigt. Idérigdommen er enorm – der findes i hundredevis af koncepter og mindst ligeså mange patenter på området, og endnu er der ikke opstået nogen entydig konvergens. Dog lader de fleste anlæg sig klassificere som enten "point absorbere", "terminators" og "attenuators". Ved point absorbere forstås flydende legemer med en udbredelse der kun udgør en brøkdel af den typiske bølgelængde den skal virke i bedst. Det vil sige legemet vil bevæges sig op og ned under påvirkning fra bølgerne, og forbindes dette legeme til en fast

eller relativ reference kan der ekstraheres energi heraf. Eksempler herpå er AquaBuoy, WaveBob og mange andre. Ved terminators forstås anlæg, der ligger på tværs af bølgeretningen, og som så at sige "sluger" bølgeenergien. Eksempler herpå er kystnære anlæg der står på havbunden, som for eksempel OWC'ere og overskylsbaserede anlæg såsom det norske SSG, men også flydende anlæg som det danske Wave Dragon (se Figur 1, tv.) hører til denne gruppe. Attenuators er anlæg, der ligger på langs af bølgeretningen og aktueres af de passerende bølger. Eksempler herpå er det skotske koncept Pelamis, der er 4 rør, der er sammen koblet i 3 led, hvori der er placeres hydrauliske stempler til at tappe energien fra den relative bevægelse mellem de enkelte rør. Det danske anlæg Wave Star (se Figur 1, th.) kan også opfattes som hørende til denne kategori, selvom de egentlig består af en samling af point absorbers. Det er endnu et åbent spørgsmål om der, som for vindmøllernes vedkommende, vil ske en egentlig konvergens. Personligt tror jeg det ikke, da der så mange parametre i spil i forbindelse med udvælgelse af bølgeenergianlæg til en given projektlokalitet, men det er samtidig klart at ikke alle anlæg der er bragt på banen idag vil nå til fuldskalastadiet, og endnu færre til egentlig kommerciel produktion.



Figure 1. Prototypeafprøvning af Wave Dragon (tv.) og Wave Star (th.) i Nissum Bredning.

En "hage" ved udviklingen af bølgeenergianlæg er også, at man i opstartsfasen (hvor vi er idag) vil være tilbøjelig til at fokusere på udvikling af mindre anlægstyper (typisk på under 1 MW installeret effekt), da disse er økonomisk set mere overkommelige af få udviklet og afprøvet i stor skala. Når det enkelt stående anlæg er "færdigt" kan der så bygges "kraftværker" (bølgeenergifarme i "mange" MW, fx 100 MW klassen eller mere) ved at multiplicere disse. Det er dog ikke sikkert dette vil være den rigtige løsning til storskala udnyttelse af ressourcen, da man således ender med et meget stort antal enkeltanlæg, der hver især skal tilses og vedligeholdes. På den lange bane er det derfor sandsynligt, at det vil være fornuftigt at fokusere på anlægstyper, der består af væsentligt større, og dermed færre, enheder. Problemet er, at disse er langt mere omkostningstunge og dermed risikofyldte at udvikle, da man i sagens natur ikke kan bygge mindre end "et" anlæg. Således vil de anlæg der nemmest/billigst lader sig udvikle, ikke nødvendigvis være de bedste for storskala udnyttelse.

Status

Udvillingen af bølgeenergianlæg i Danmark har været igang i godt og vel i et par årtier. For 10-12 år siden blev udviklingen "boostet" af "Det Danske Bølgeenergi-program", der blev til via en bevilling på finansloven på 40 mill. over 4 år. Programmet blev administreret af Energistyrelsen, og der blev etableret en praksis hvor udviklingen af bølgeenergianlæggene blev faseopdelt (fase 1 til 4) – fra "Proof of concept" afprøvninger i lille skala til fuldskala demonstration. Dette medførte en bred screening af vidt forskellige idéer (op mod 40-50 forskellige koncepter blev afprøvet i fase 1), mere detaljerede udviklingsprojekter med feasibility og parametriske studier (fase 2 projekter, 10-20 projekter) og enkelte af disse har efterfølgende gennemgået langtidsafprøvning i "rigtigt", men dog beskyttet, havmiljø i fx. Nissum Bredning (fase 3). Flere af disse, bl.a. Wave Star og Wave Dragon, er nu på vej mod fuldskala afprøvning (fase 4). Denne udvikling og fremgangsmåde blev grundlagt i Det Danske Bølgeenergi-program omkring årtusindskiftet, men er siden blevet fortsat via andre udviklingsprogrammer som ForskEL og EUDP (Frigaard et al., 2008)

Status for branchen i Danmark er pt. at Wave Dragon kæmper for at få finansiering på plads til Walisisk demonstrations projekt (4-7 MW). Dette har vist sig meget svært, og de afsøger også andre muligheder, blandet for evt. afprøvning i den Danske del af Nordsøen. Wave Star har sikret finansiering af pilot projekter, i første omgang en sektion af kommende demonstrationsanlæg (2 stk. fuldstørrelse flydere) ved Roshage, Hanstholm. Dette skal danne baggrund for et fuldt demonstrationsanlæg, formodentligt ved Horns Rev (500 kW), planlagt opførelse inden for de nærmeste par år. Disse koncepter har i nogle år dannet "fortrop" for udviklingen i Danmark, men de seneste par år er en række andre også kommet på banen med afprøvning, eller konkrete planer her for, af storskala anlæg i havmiljø. Her tænkes på koncepter såsom Poseidon, WavePlane, LeanCon, DEXA mv.

På trods af at der allerede er foretaget en bred screening af projekter, kommer der fortsat jævnligt nye idéer til koncepter på banen. Dette gælder både i Danmark og internationalt. Ser man ud over branchen er der således ikke som sådant sket en konvergens imod en bestemt type af anlæg, der skiller sig ud som oplagt "vinder", og konkurrencen er stor og fortsat meget åben. Dog må Pelamis fra Skotland nævnes, da de skiller sig ud som branchedeende på nuværende tidspunkt, hvor de har forestået det første salg af bølgeenergianlæg på noget der med rette kan kaldes for kommercielle vilkår. Dette er dog sket til placering i Portugal, der opererer med favorable afregningspriser for el produceret fra bølgeenergi på ca. 1,90 kr/kWh (ca. 0,25€) for de første installerede anlæg (20 MW).

I Danmark gives støtten til udvikling af bølgeenergikoncepter fra offentlig side pt. primært via programmerne ForskEL (PSO midler) og EUDP, men i Danmark opereres ikke med særskilt afregningspris for bølgeenergi som kan matche Portugal, Storbritanien, Irland m.fl. Danmark har dog alligevel en chance for at tiltrække demonstrationsprojekter, idet procedurerne i forbindelse med at opnå tilladelser til at udlægge forsøgsanlæg har vist sig at være væsentligt simplere i Danmark i forhold til andre lande, som fx. Storbritanien, hvor processen er så tung at de enkelte udviklingselskaber har svært ved at løfte opgaven.

Potentiale

Potentialet for udnyttelse af bølgeenergi til storskale el-produktion i Danmark, ligger stort set udelukkende i den danske del af Nordsøen, jf. Figur 2.

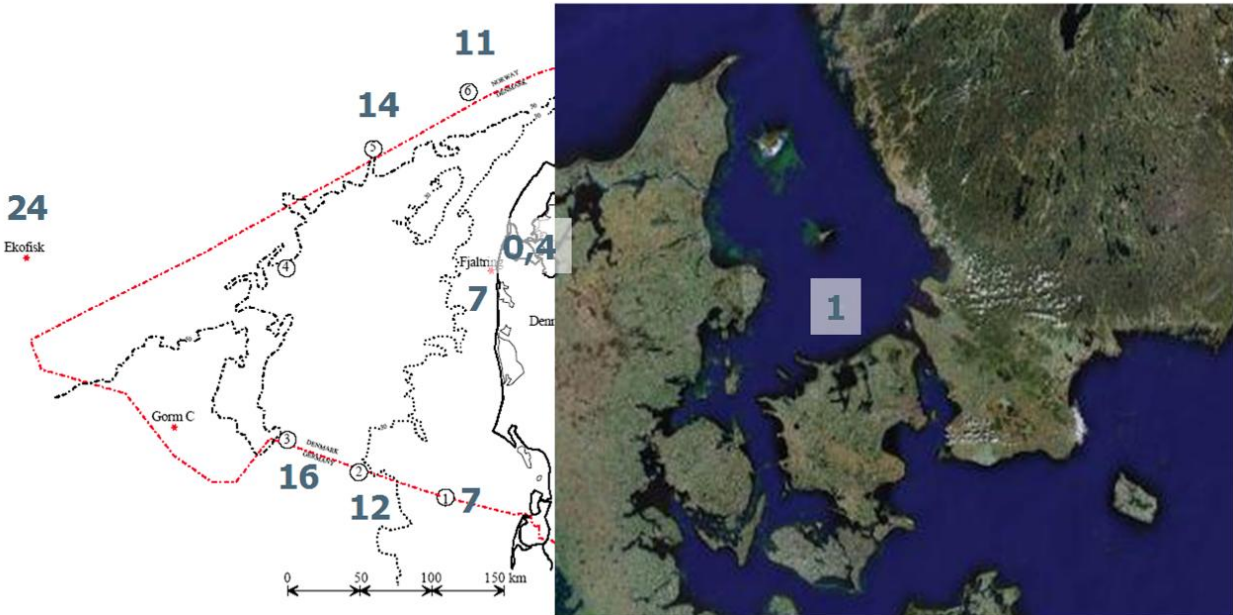


Figure 2. Potentiale for udnyttelse af bølgeenergi i danske farvande. Talværdier angiver middel bølgeenergiflux (den gennemsnitlige effekt der passerer en lodret vandsøjle) i kW/m.

Her ligger potentialet (bølgeenergiflux, den gennemsnitlige effekt der passerer en lodret vandsøjle), på ca. 15 kW/m, fra 24 kW/m i den fjerneste del, og ca. 7 kW/m tæt på kysten (Rugbjerg & Nielsen, 1999). I de indre danske farvande ligger potentialet på ca. 1 kW/m og derunder, hvilket gør disse områder stort set uinteressante for andet end forsøgs- og demonstrationsformål.

I Ingeniørforeningens Energiplan 2030 (IDA, 2006) opereres der med et delmål for udbygning med bølgekraft på 500 MW i 2030, så 5 % af Danmarks elforbrug (som er på ca. 125 PJ/år) dækkes med el produceret af bølgekraftanlæg. Baseret på en antagelse om en load factor (forholdet mellem antal fuldlasttimer og totalt antal timer pr. år) på 40 %, en middeleffektivitet af bølgeenergi-parken på 10 % (forholdet mellem parkens middel el-produktion og middel bølgeenergifluxen over bredden af parken, i realistiske produktionstilstande) og en middel bølgeenergiflux på 15 kW/m, vil dette lægge beslag på en strækning på ca. 133 km i Nordsøen. Dette vurderes at være et realiserbart mål, uden her at angive hvilken type anlæg der vælges.

For at få et indtryk af hvad det øvre teoretisk realiserbare loft for el-produktionen i Danmark fra bølgeenergi er, kan følgende scenarie betragtes:

Som eksempel forestilles det at, den danske del af Nordsøen, der ligger mindst 25 km fra kysten, samt med en vanddybde på min. 25 m, fyldes ud med Wave Dragon anlæg (svarende til et brutto areal på ca. 40.000 km²). Det antages at der er tale om 4 MW enheder, der hver især vil kunne producere 1 MW i

middeleffekt i en middel bølgeenergiflux på 16 W/m i det betragtede område. Placeres Wave Dragon anlæggene på linier bestående af to rækker Wave Dragon anlæg med indbyrdes afstande på 2 gange bredden af de enkelte anlæg (som foreslået af Beels et al., 2009), kan der placeres ca. 2,5 anlæg pr. km (dette svarer til en middeleffektivitet af bølgeenergi-parken på godt 15 %). Antages det, at der for at få regenereret bølgeenergifluxen skal være en afstand på 40 km mellem linierne vil dette resultere i at der er plads til ca. 2.500 Wave Dragon anlæg, der tilsammen vil producere ca. 83 PJ/år, svarende til ca. 2/3 af Danmarks elforbrug. Da dette vil lægge beslag på en meget stor del af den danske del af Nordsøen, betragtes dette ikke som værende realistisk, blandt under hensyn tagen til skibsruiter, fiskeområder, oliefelter mv., kan et ”praktisk loft” måske sættes til ca. halvdelen heraf, dvs. ca. 1/3 af Danmarks elforbrug.

Det er klart at denne betragtning er ét groft skud, og det realiserbare loft vil afhænge meget af den fremtidige teknologiudvikling, men det siger dog at allerede med den teknologi, der er kendt i dag, vil bølgekraft kunne bidrage betydeligt til elforsyningen.

I forhold til de europæiske Atlanterhavs kyststrækninger ses det af Figur 3, at potentialet i Danmark er temmelig begrænset set i forhold til lande som Storbritannien, Irland, Norge, Frankrig, Portugal mv., der har kyststrækninger med op mod 5 gange større bølgeenergiflux end Danmark. Dette indikerer at hvis man i Danmark får succes med udvikling af en industri omkring bølgekraft, er eksportpotentialet til vores nærområde stort.

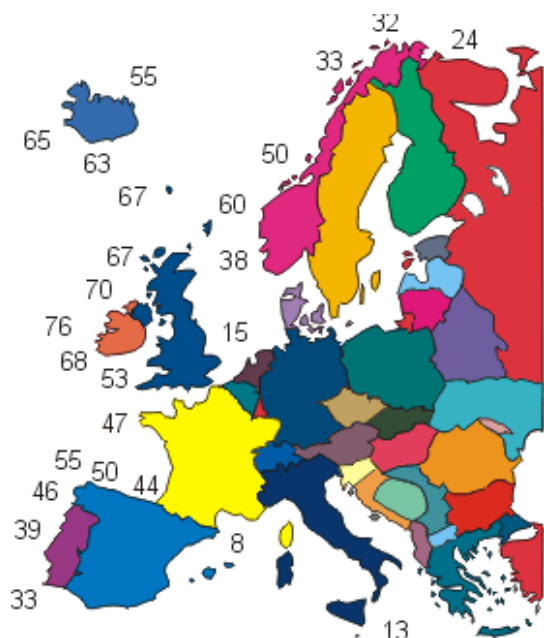
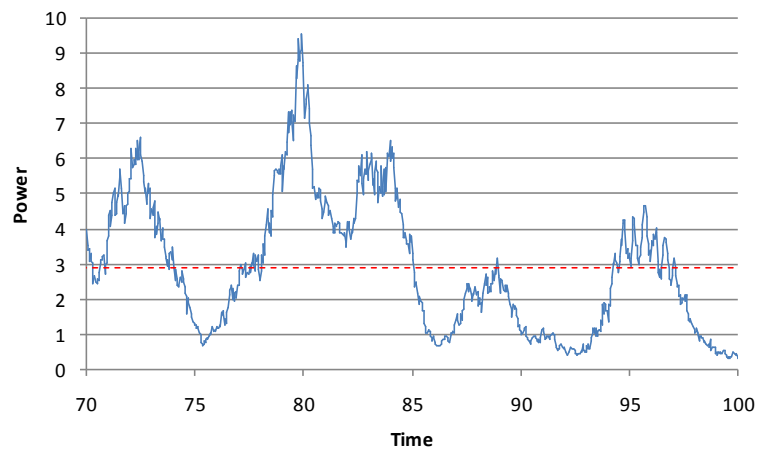


Figure 3. Bølgeenergi-potentialet langs Europas kyster. Talværdier angiver middel bølgeenergiflux (den gennemsnitlige effekt der passerer en lodret vandsøjle) i kW/m.

Ved vurdering af potentialet er det dog også vigtigt at notere sig at bølgekraft er en temmelig varierende energikilde. Variationen i middel bølgeenergifluxen fra år til år, ligger på op til +/- 25 %, og

årstidsvariationen (fra sommer til vinter) ligger i størrelsesordenen 1:5, med størst potentiale i vintermånederne (Rugbjerg & Nielsen, 1999).

Herudover vil energiproduktionen fra bølgeenergianlæg også variere på korttidsskalaen, idet bølgerne er uregelmæssige. Hvor stor denne "bølge-til-bølge" variation er, afhænger igen meget af hvilket anlæg der er tale, da nogle anlæg har indbygget større buffer kapacitet i power take-off systemet end andre. I Figur 4 er der vist et eksempel herpå.



Figur 3. Eksempel på tidserie af energiproduktion fra et bølgeenergianlæg. Tidsserien vist på grafen svarer til ca. 20 bølgeperioder, dvs. ca. 2,5 min. i fuld skala.

Økonomi

På grund af branchens tidlige stade, er erfaringsgrundlaget for at udtale sig om økonomien i bølgeenergianlæg meget begrænset. Dog foreligger der informationer om at 3 stk. Pelamis anlæg (å 750 kW installeret generator kapacitet) til installation i Portugal blev handlet til £8 mill., svarende til ca. 35 mill. dkr. pr. MW. Til sammenligning viser Wave Dragons beregninger beregninger at de første 4 MW anlæg vil koste ca. €16 mill., svarende til ca. 30 mill. dkr. pr. MW, og på sigt (efter salg af hundredevis af anlæg) forventes denne pris at kunne næsten halveres. For større anlæg (op til 12 MW anlæg, beregnet for sites med 48 kW/m eller mere) forventes prisen på sigt at kunne komme ned på ca. 12 mill. dkr. pr. MW (efter installation af hundreder af anlæg). Disse priser indeholder ikke el-tilslutninger, dekommissionering mv. Hertil kommer prisen for at drive og vedligeholde anlæggene, hvilket er en stort set ubekendt størrelse, indtil erfaringer har været indsamlet over en årrække.

Referencer

Beels, C.; Troch, P., De Visch, K., Kofoed, J. P. & De Backer, G.: Application of the time-dependent mild-slope equations for the simulation of wake effects in the lee of a farm of Wave Dragon wave energy converters. Accepted for publication in Renewable Energy (RENE-S-09-00036), Jan. 2009.

Bølgekraftudvalgets Sekretariat (K. Nielsen): *Bølgekraft – forslag til forsøg og rapportering*. (61 pages in danish). Published by Bølgekraftudvalgets Sekretariat / Danish Energy Agency. 1999.

Hubbert, M. K.: *Outlook for fuel reserves*. Published in the McGraw-Hill Encyclopedia of Energy ca. 1976.

IDA: *Ingeniørforeningens Energiplan 2030, Hovedrapport*. ISBN: 87-87254-64-6, Udgivet af Ingeniørforeningen i Danmark, IDA. December 2006.

Frigaard, P., Kofoed, J. P. & Nielsen, K.: *Assessment of Wave Energy Devices. Best Practice as used in Denmark*. World Renewable Energy Congress (WREC X), Glasgow, Scotland, 21st - 25th July, 2008.

Laherrere, J.: *Forecasting production from discovery*. ASPO Lisbon, May 19–20, 2005.
<http://www.oilcrisis.com/laherrere/lisbon.pdf>.

Rugbjerg, M. & Nielsen, K.: Kortlægning af bølgeenergiforhold i den danske del af Nordsøen. ENERGISTYRELSEN J.no. 51191/97-0014. Juni 1999.

Sørensen, H. C. and Weinstein, A.: *Ocean Energy: Position paper for IPCC*. Key Note Paper for the IPCC Scoping Conference on Renewable Energy, Lübeck, Germany, January 2008