

S e m i n a r o m

A L T E R N A T I V E E N E R G I K I L D E R

5. april og 6. april 1978 i Oslo

B Ø L G J E K R A F T V E R K A V
S T Y R T E S V I N G A N D E
F L O T T Ø R A R

av

Dosent Johannes Falnes

Institutt for eksperimentalfysikk
Norges Tekniske Høyskole, Trondheim

17.3.1978.

Foredrag 5.april 1978 ved seminaret "Alternative energikjelder i Norge fram til år 2000":

BØLGJEKRAFTVERK SETT SAMAN AV BØYAR MED STYRT SVINGERØRSLE.

Johannes Falnes og Kjell Budal
Institutt for eksperimentalfysikk, 7034 Trondheim-NTH.

1. INNLEIING

Det er velkjent i fysikken at skal eit svingesystem ta opp mest mogleg energi frå ei bølge, bør svingesystemet vera avstemt til resonans med bølgjene. Dette prinsippet er utnytta f. eks. i ein radiomottakar.

Ved Institutt for eksperimentalfysikk, NTH, tok me i 1973 for alvor opp eit teoretisk arbeid for å utnytta dette prinsippet til å ta opp energi frå havbølgjer på ein effektiv måte. Ein del viktige teoretiske resultat er generelle, slik at dei gjeld for mange ulike mekaniske svingesystem, som kan ta opp bølgeenergi. Trass i det generelle utgangspunktet kan det stellast opp visse tal og prinsipp, som bør vera ei rettesnor ved utveljinga av eit mekanisk system.

Eit svingesystem som skal kunna ta opp energi frå havbølgjer, må ha eit svingande element som kan fortrengja vatn. Men elles kan det vera mekanisk utforma på mange tenkjelege måtar, f.eks. som heilt neddykka system eller som svingande vatn i eit røyr med ein munning i sjøen. Men me har tenkt mest på ein flytande bøye som kan fortrengja vatn ved å svinga opp og ned.

2. TEORETISK GRUNNLAG

Resonans.

Ved regulær (eller sinusforma) bølge vil eit resonant svingesystem ha eit utsving (jfr. fig. 1, kurve b) som i fase er ein kvart periode etter den dynamiske krafta (fig. 1, kurve a). Denne krafta, som bølgja øver på bøyen, vil dermed vera i fase med utsvingsfarten til bøyen. Det vil difor

under heile svingeperioden bli ei ikkje-negativ innmating av energi til svingesystemet frå bølga. Denne energiinnmatinga er ein grunn til at utsvinget blir så stort i eit resonant svingesystem. Dersom svingesystemet ikkje er resonant, vil innmatinga av energi derimot vera negativ ein viss brøkdel av perioden.

Som eksempel på svingesystem vil me sjå på ein flytande bøye som har ein halvveges nedsøkket likevektsposisjon. Ein resonansavstemt, sirkulærsymmetrisk bøye, som utfører vertikale svingingar, og som er optimalt dempa, vil i regulære bølger absorbera like mykje energi som bølga transporterer langs ein bølgefrent av breidd

$$A = \frac{L}{2\pi} \quad (1)$$

der L er bølglengda. For den typiske bølgeperioden

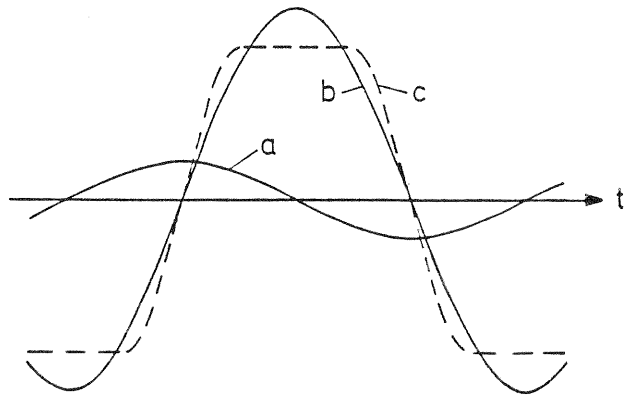
$$T = 10 \text{ s} \quad \text{blir} \quad L = 156 \text{ m} \quad \text{og} \quad A = 25 \text{ m} \quad (2)$$

etter teorien. Merk at dette teoretiske resultatet, for små innfallande bølger, er uavhengig av storleik og form av den sirkulærsymmetriske bøyen. Diameteren av bøyen kan gjerne vera mindre enn A. Det vil seia at transporten av energi i sjøen blir konsentrert inn mot bøyen. Denne "sugeverknaden" heng saman med at den resonante bøyen svingar med større amplitude enn bølga. Den maksimalt absorberte effekten P_{maks} aukar når bølgehøgda H (målt mellom bølgetopp og bølgedal) aukar. Etter teorien får me for $T = 10 \text{ s}$

$$P_{\text{maks}}/H^2 = 243 \text{ kW/m}^2 \quad (3)$$

D.v.s. at for ei bølgehøgda $H = 2 \text{ m}$ vil effekten bli nærmare 1 MW dersom både bøyen og maskineriet i han er dimensjonerte for å kunna ta opp så stor effekt.

Fig. 1. Bølgjeutsving og utsving av bøye som funksjon av tida ved regulær (sinusforma) bølgje.



Kurve a: Utsvinget av havoverflata, som er det same som utsvinget av ein lett bøye.

Kurve b: Utsvinget av bøye som er i resonans med bølgja (optimal rørsle).

Kurve c: Utsvinget av bøye som har kortare eigenperiode enn bølgjeperioden, men som ved ein fasthaldingsmekanisme kan styrast til å få tilnærma optimal rørsle.

Skal ein vertikaltståande sylindrisk bøye vera resonansavstemt til ein periode $T = 10$ s, må han ha så stor masse at sylinderbotnen får ei djupn på $g(T/2\pi)^2 = 25$ m. (Her er g tyngdeakselerasjonen.) Eit problem med resonansavstemming er at denne nødvendige djupna må varierast mellom 12 m og 50 m når perioden varierer mellom 7 s og 14 s, som er typiske ytterverdiar for variasjonsområdet for perioden av havbølgjer. Ved resonans må nemleg eigenperioden justerast lik bølgjeperioden. (Eigenperioden er perioden bøyen kan svinga med om han svingar fritt opp og ned på stille sjø etter å ha blitt pressa djupare ned enn til jamvektsposisjonen).

Kunstig resonans ved fasthalding

I staden for å justera massen til resonans er det greiare og betre å bruka ein bøye som har mindre masse, og difor for kort eigenperiode, men som kan haldast fast i visse tidsintervall. Lengda av tidsintervalla må kontrollerast av ein datamaskin som får signal frå ein eller fleire bølgjemålarar. Bøyen må sleppast laus i rette tidspunkt slik at farten på bøyen blir mest mogleg i fase med den vekslende påverknadskrafta frå den innkomande bølgja. Jfr. kurve c i fig. 1. Sidan bøyen har ei svingerørsle (kurve c) som avvik litt frå den optimale (kurve b i fig. 1), vil den absorberte effekten vera nokre få prosent mindre enn det teoretiske maksimum. Men dette vil bli meir enn kompensert

ved at i verkelege vindgenererte bølger, som ikkje er regulære, vil den absorberte effekten bli større med ei datamaskinstyrt svingerørsle enn med ei passiv svingerørsle i eit enkelt resonant system. Ved irregulære bølger vil avstandane mellom etterfølgjande bølgetoppar og bølgedalar variera statistisk. Trass i dette kan me med det datamaskinstyrte systemet få til ei svingerørsle som alltid har den rette fasen. Då går bøyen med størst fart oppover i sjøen når den innkomande bølga har ein topp, og med størst fart nedover når der er ein bølgedal. (Jfr. fig. 1, kurve c.)

Prinsippskissa i fig. 2 viser korleis maskineriet i bøyen kan tenkjast laga. Opninga og stenginga av dei to ventilane blir styrte av datamaskinen. Når begge ventilane er stengde, er bøyen låst i fast posisjon. Ventilane tener såleis den fasereguleringa som er nemnt framanfor. For at bøyen skal få den optimale utsvingsamplituden, må ventilane også syta for at noko hydraulikkvæske pendlar att og fram mellom dei to trykktankane, men i netto blir det under ein syklus ført ei viss mengd væske frå lågtrykkstanken til høgtrykkstanken.

Den produserte elektrisiteten kan tenkjast ført i land ved ein bøyeleg kabel eller ved ein fast kabel og glidekontaktar.

Alternativt kan heile maskineriet plasserast på sjøbotnen. Stempelstonga, som då vender oppover, er forbunden med den tomme bøyen, som rører seg opp og ned på sjøoverflata (i samsvare med kurve c i fig. 1).

Bøyar i rekkje.

Eit større bølgekraftverk kan tenkjast sett saman av mange bøyar som er plasserte med visse mellomrom langs ei linje utanfor kysten der det er rikeleg med bølgeenergi. For å halda kostnaden med kablar på eit rimeleg nivå bør ikkje linja vera langt frå land. Bøyane vil interferera med kvarandre, noko som gjer at kvar bøye kan absorbera meir effekt enn P_{maks} i likn. (3), som gjeld for ein isolert bøye. Den innbyrdes avstanden d mellom bøyane bør veljast i området 50 m til 100 m. Dersom $d < L/2$, kan ei slik rekkje

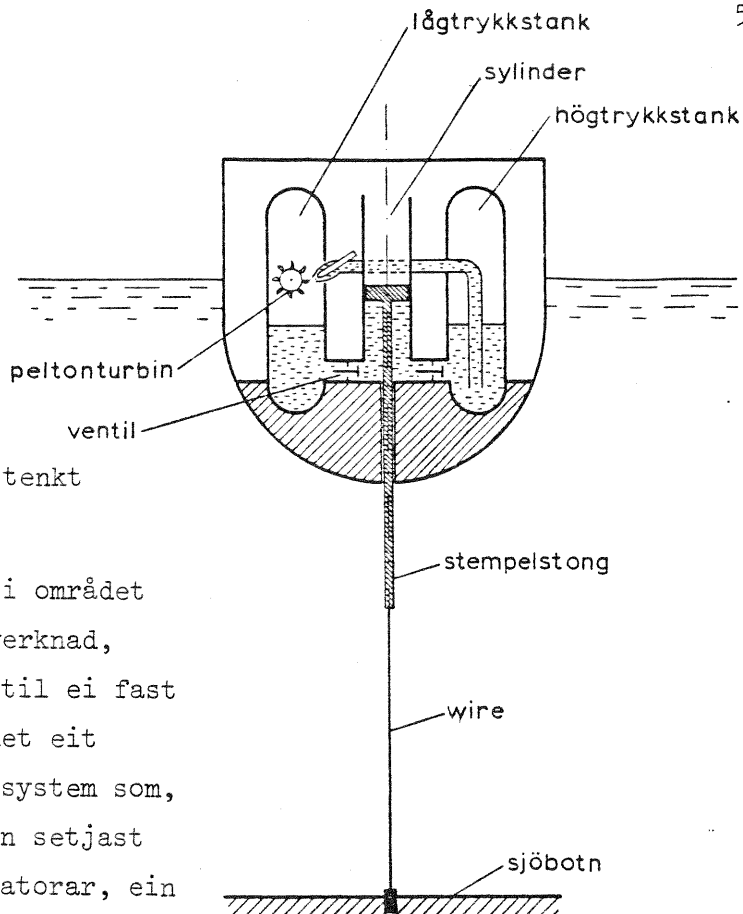


Fig. 2. Prinsippskisse for tenkt bølgekraftverk.

Ein stor bøye (med tverrmål i området 5-15 m) kan, under bølgepåverknad, svinga opp og ned i forhold til ei fast forankring. Inni bøyen er det eit hydraulisk stempel-sylinder-system som, ved hjelp av to ventilar, kan setjast i samband med to gassakkumulatorar, ein høgtrykkstank (t.d. 75 atm) og ein lågtrykkstank (t.d. 25 atm). Hydraulikken med trykkstankane tener tre funksjonar: (1) å dra den forholdsvis lette bøyen ned i sjøen slik at det alltid er strekk i forankringa, (2) å køyra bøyen opp og ned på den ynskte måten, og (3) å tappa energi frå systemet gjennom ein turbin som er plassert inne i lågtrykkstanken. Turbinen ($\frac{1}{2}$ til 1 MW) går med jamn fart, og han har felles aksling med ein elektrisk generator som er kopla til samkøyringsnettet. Bølgjene utfører eit netto arbeid ved at noko hydraulikkvæske blir pumpa frå lågtrykkstanken til høgtrykkstanken, når bøyen svingar opp og ned.

av optimalt styrte bøyar, teoretisk ta opp halvparten av den bølgeenergien som fell inn mot rekkja. Med to parallelle rekkjer kan teoretisk 100% av den innfallande bølgeenergien bli absorbert.

3. KONSTRUKSJON I PRAKSIS

Dimensjonering av bøyen.

I praksis vil det ikkje vera økonomisk akseptabelt å konstruera bøyane så høge at me alltid kan oppnå den teoretisk optimale utsvingsamplituden og den teoretisk maksimale energi-

absorpsjonen. Dei teoretiske resultatane, som er nemnde frammanfor, vil difor berre vera gyldige når bølghøgda er under ei viss grense. Dette må me ta omsyn til når me skal rekna ut kor mykje energi som blir absorbert av eit bølgekraftverk i eit gjeve bølgeklima.

Dersom bøyan har ein diameter på 16 m og ei maksimal vertikal slaglengd på 8 m (største utsvingsamplitude 4 m), vil den absorberte energien pr. bøye vera ca. 10^7 kWh i året, for bøyar som er plasserte i Nordatlantisk klima. Med $T = 10$ s vil ein slik bøye nå si maksimale slaglengd 8 m ved ei bølghøgde $H \approx 1,5$ m, og bøyen vil der svinga med full slaglengd ca. 70% av året.

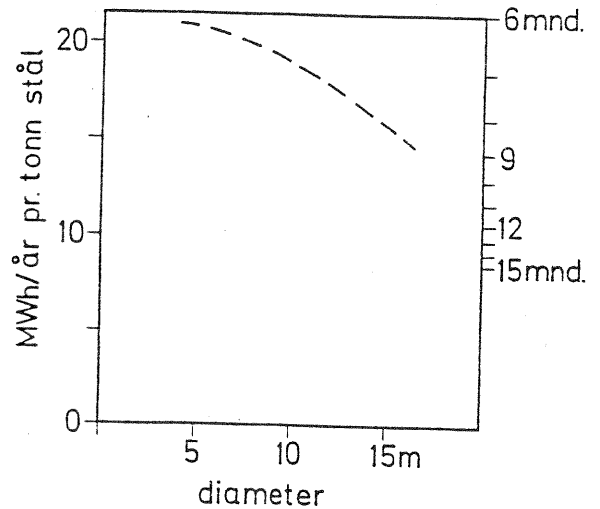
Ut frå dei sparsame data som føreligg om bølgeklimaet på norskekysten kan me grovt rekna med ein innkomande middels bølgeenergi 20 kW pr. m kystlinje. Med grunnlag i dette kan det reknast ut at kvar bøye med ovannemnde dimensjonar kan absorbera ca. $5 \cdot 10^6$ kWh i året. Går me ut frå at energien kan konverterast til elektrisitet med eit maskineri som har ein verknadsgrad på 80%, vil den produserte elektrisiteten pr. bøye då bli ca. $4 \cdot 10^6$ kWh/år.

Dersom diameteren på bøyen blir redusert frå 16 m til 8 m, medan slaglengda er 8 m som før, vil den produserte energien bli redusert til omlag halvparten. Men kostnadene med å byggja bøyen vil truleg bli redusert med meir enn halvparten. F. eks. vil forankringskrafta gå ned til fjerdeparten. Kurva i fig. 3 indikerer at det i bøyen då trengst mindre stål i forhold til energiproduksjonen. Det ser difor ut til at det vil løna seg å byggja bøyar med mindre diameter enn 16 m.

Energioppteningstid og kostnad.

Med grunnlag i ein spesiell variant til maskineriet vist i fig. 2 har me gjort eit overslag over dei stålmengdene som trengst i den hydrauliske sylindern og i gassakkumulatorane. I samanlikning med desse komponentane går det lite stål i resten av maskineriet. Blir sjølve bøyekroppen laga av stål, er det den som likevel vil krevja mesteparten av stålmengda i heile bøyen medrekna maskineriet. På den eine sida har me

Fig. 3. Grovt overslag over sammenhengen mellom elektrisitetsproduksjonen og stålmengda i bøyen og maskineriet. Den høgre loddrette skalaen gjeld den tida (energioppteningstida) som kraftverket må gå for å levera så stor energimengd som trengst for å produsera stålet. (1 tonn stål svarar til $4 \cdot 10^{10} \text{ J} = 11 \text{ MWh}$).



overslaget over dei stålmengdene som trengst i konstruksjonen, og på den andre sida har me eit overslag over den energien som bølgekraftverket kan levera frå eit bølgeklima som på den norske vestkysten. Dette er grunnlaget for kurva i fig.3, som viser at energiproduksjonen i forhold til stålforbruket aukar om bøyediameteren går ned. Vidare tyder dette grove overslaget på at "energioppteningstida" for stålet i bøyen kan bli mindre enn eitt år.

Ein skal vera merksam på at forankringa og utstyret for ilandføring av elektrisiteten ikkje er med i det ovannemde overslaget. På den andre sida kan det tenkjast at det vil løna seg å laga sjølvve bøyekroppen av betong eller kunststoff heller enn av stål.

Absolutte tal for kva prisen vil bli på energien frå eit slikt bøyekraftverk, har me ikkje å leggja fram enno. Men, dersom kostnaden med forankringa ikkje blir for høg, er det gode voner for at det kan bli ein rimeleg energipris, om me samanliknar med andre typar bølgekraftverk som dei arbeider med i andre land. Dette heng saman med den energikonsentrasjonen i sjøen det fører til at bøyane si rørsle er styrt med tanke på maksimalt energiopptak, og at dei dermed kan svinga med større utsving enn bølgiene. På den måten kan det takast opp ei viss energimengd med ein konstruksjon som har eit monaleg mindre volum i sjøen, og som difor bør vera billegare.

Noko anna som talar i favør av bøyekraftverk, er at desse minikraftverka kan serieproduserast i eit verft, og at det er ein minimal del av bygginga som må gjerast i form av anleggsarbeid til havs.

Miljøpåverknader.

Den verknaden eit bøyekraftverk vil ha på miljøet i sjøen, tykkjest bli liten; det blir noko stillare sjø på innsida av rekkja av bøyar. Denne molo-verknaden vil, relativt sett, gjera seg mindre gjeldande ved uver enn ved moderate bølger. Kraftverket bør sjølvstekt ikkje leggjast i skipsleia, slik at det hindrar ferdsla på sjøen. Mindre fart vil kunna passera mellom bøyane i ei rekkje. Men fiske med botnreidskap blir hindra der det er anker og elektriske kablar, og eventuelt andre installasjonar, på sjøbotnen.

4. ARBEIDET FRAMOVER

Modellforsøk og utvikling av prototyp.

Arbeidet med utviklinga av eit bølgekraftverk etter ideane framanfor er enno berre i startgropa, og mesteparten av arbeidet til no er gjort berre ved skrivebordet. Kvarner Brug A/S har sidan 1975 deltatt i prosjektet og hatt støtte frå NTNF i 1976 og 1977.

Med velvilje og støtte frå ymse institutt ved NTH starta me arbeid med modellforsøk i 1977. Det siste halve året har dette arbeidet også fått noko økonomisk stønad frå NVE. Det fyrste forsøket starta våren 1977 i den minste bølgetanken ved VHL. Ein bøye, som har diameter 15 cm og er utan maskineri, er avstemt til resonans med ei regulær bølge. Forsøka viser resultat i samsvar med teorien. Den neste modellen, som er bygd ved Skipsteknisk avdeling, NTH, har innvendig maskineri, og diameteren er 0,8 m. Ved forsøk i skipsmodelltanken ved NSFI er det nyleg blitt demonstrert at det går an å fasestyra rørsle (jfr. kurve c i fig. 1) ved hjelp av fasthaldingsprinsippet.

Det vil vera aktuelt å byggja fleire modellar med ulike variantar til maskineri. Fleire typar må prøvast i redusert

målestokk for å finna betre og billegare løysingar på ymse detaljar.

Også på modellstadiet må ein vera prismedviten. Å konstruera bølgekraftverk er fyrst og fremst ein kamp om å få ned prisen på den produserte elektrisiteten. Finn me fram til løysingar som er rimelege nok i anlegg, blir det også eit viktig problem å finna tekniske løysingar som er driftsikre og krev lite vedlikehald. Desse spørsmåla må vurderast så nøye det let seg gjera, før me går til eit neste steg i utviklinga: ein større modell for prøving i sjøen eller ein prototyp ytst på kysten.

I 1979 vonar me å kunna byggja ein modell med tverrmål ca. 3 m. Denne modellen, som er eit passeleg mellomsteg på vegen mot ein prototyp på ca. 10 m, kan prøvast både i skipsmodelltanken og i naturlege bølger i sjøen, f.eks. i Trondheimsfjorden.

Dersom forsøka blir teknisk vellukka, og dersom teknisk-økonomiske vurderingar framleis gjev lovande resultat, kan det kring 1981 byggjast ein prototyp for prøving på kysten. Kostnadene med bygging og prøving av prototyp vil bli fleire titals millionar kroner. Dersom det skal koma til ei praktisk utnytting av bølgeenergien, er det nødvendig å satsa minst så mykje pengar i utviklingsarbeidet. Men merk at dette er ein liten pengesum samanlikna med den milliardsummen som årleg blir investert i utbygging av norske kraftverk.

Kostnaden med å utvikla bøyekraftverk bør bli relativt liten, for di det er tale om å utvikla eit minikraftverk i området ein halv til ein megawatt. Av same grunn trengst det etter måten kort tid for å gjera utviklingsarbeidet, dersom ein ikkje støyter på for mange tekniske og økonomiske vanskar.

Bølgekraftverk i norsk elektrisitetsproduksjon.

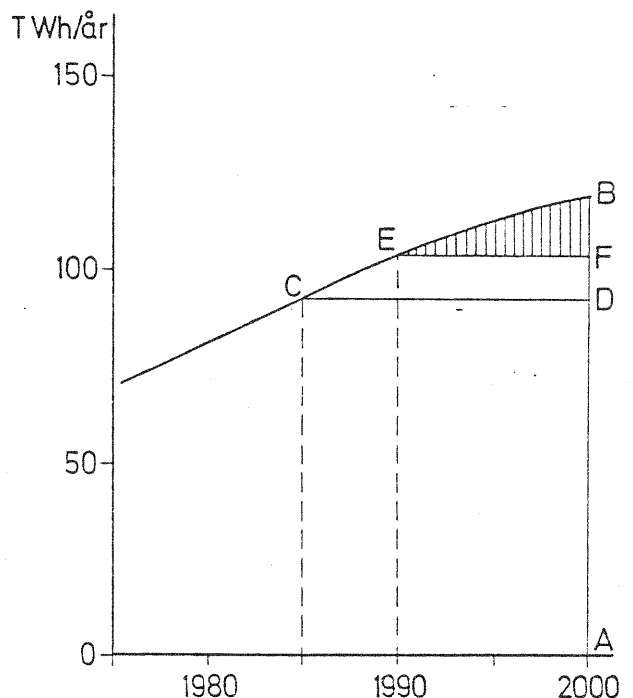
Før det kan byggjast bølgekraftverk i stor skala, d.v.s. ei rekkje med hundrevis av bøyar, trengst det nokre års røynsler frå drift av prototypen. Difor kan det tidlegast bli kring 1985 at bølgjene for alvor kan ta til å levera større

energimengder til samkjøringsnettet. Men det er vel meir realistisk å rekna med at me må venta til kring 1990 før bølgekraftverka kan stå for all auken i norsk elektrisitetsproduksjon. Og vilkåret for at det kan skje, er at bølgeenergien kan konkurrera økonomisk med andre energikjelder, som det kan vera aktuelt å byggja ut.

Fram til 1985 er det venta at vasskraftverk skal dekkja så å seia heile det norske elektrisitetsforbruket (svarande til lina AD i fig. 4). For veksten vidare fram til 2000 (lina DB i fig. 4) kan andre energikjelder gjera seg sterkt gjeldande. Med ein viss rett kan det seiast at ved år 2000 kan andre energikjelder, også havbølgjene, spela berre ei relativt liten rolle ved sida av vasskraft. (I fig. 4 er lina DB berre ein liten del av lina AB.) Men denne utsegna gjeld sjølvstakt berre når ein talar om den totale elektrisitetsproduksjonen ved tusenårsskiftet.

Spør ein derimot kor energiveksten skal takast frå, steller problemet seg annleis.

Fig. 4. Diagrammet viser ei tenkjeleg utvikling av det norske brutto elektrisitetsforbruket fram til år 2000. Energimengda svarande til det skraverte feltet (over lina EF) kan kanskje bli levert av bølgekraftverk.



I den aktuelle energidebatten møter me følgjande to påstandar med motsette "forteikn":

- 1) Bølgjeenergien kan ikkje spela ei vesentleg rolle for veksten i norsk elektrisitetsproduksjon føre år 2000.
- 2) Me treng ikkje byggja varmekraftverk eller fleire vasskraftverk, for etter 1985 kan me berre byggja bølgjekraftverk.

Me kan kort konstatere at det i dag ikkje finst sikre tal om bølgjekraftverk til å kunna underbyggja nokon av desse to påstandane.

Dersom også me skal våga oss til å koma med ein spådom som byggjer meir på tru enn på sikre tal, så vil me gissa på at havbølgjene er hovudkjelda for auken i den norske elektrisitetsproduksjonen frå 1990. Jfr. det skraverte området i fig. 4. Dersom bølgjekraftverk kan levera elektrisitet til ein akseptabel pris, talar følgjande moment for tidspunktet 1990:

- 1) Ved 1990 har me hatt høve til å samla røynsler frå fleire års drift av bølgjekraftverk. Det gjev høve til forbetringar i konstruksjonen. Det blir tid til planlegging av eit rasjonelt produksjonsopplegg for serieframstilling av minikraftverk baserte på svingande bøyar.
- 2) Det er 12 år til 1990. Når me tenkjer på den teknologiske utviklinga på dei 12 åra etter 1966, f.eks. i datateknikken eller i oljeaktivitetane i Nordsjøen, verkar det ikkje urealistisk å tenkja seg ei teknisk utvikling som fører fram til regulær utbygging av bølgjekraftverk i 1990.