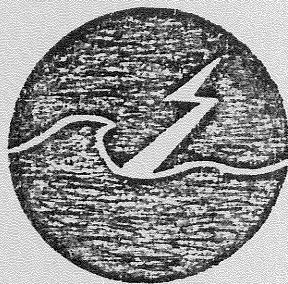


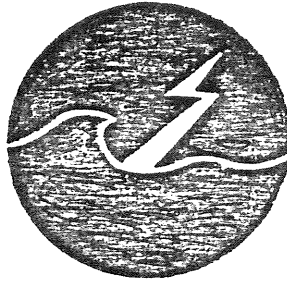
# GRUPPEN FÖR VÅGENERGIFORSKNING



V Å G E N E R G I I S V E R I G E

Rapport GR:16  
GÖTEBORG den  
14 maj 1979  
2:a upplagan  
feb. 1980

# GRUPPEN FÖR VÅGENERGIFORSKNING



V Å G E N E R G I I S V E R I G E

Rapport GR:16  
GÖTEBORG den  
14 maj 1979  
2:a upplaga  
feb. 1980

## FÖRORD

På uppdrag av Nämnden för Enerkiproduktionsforskning har Gruppen för Vågenergiforskning fortsatt det arbete som redovisas i planeringsrapporten "Vågenergi i Sverige, NE 1977:4". Arbetet syftar till att ge underlag för en bedömning av om vågenergin har förutsättningar att bidra till den framtida svenska elenergiförsörjningen. Eftersom allt erforderligt bedömningsunderlag ännu ej kunnat framtas måste föreliggande slutrapport för Fas 1 (omfattande etapp 2 och 3 tiden 1977-07-01 till 1979-09-30) betraktas som preliminär.

Ytterligare information främst från försöken i Lygnern samt från försök i oregelbundna vågor i laboratorium kommer att komplettera rapporten i slutet av sommaren.

Arbetet har bedrivits vid Chalmers Tekniska Högskola och Birger Ludvigson Ingenjörbyrå AB.

I Gruppen för Vågenergiforskning har följande personer varit verksamma i arbetet som redovisas i denna rapport.

Civiling	Filip Alm		ME
Civiling	Per Andersson		EL
Tekn dr	Lars Bergdahl		VB
Civiling	Per Bergström		EL
Civiling	Lennart Claeson	samordnare	Li
Professor	Curt Falkemo	ordförande	SH
Civiling	Jan Forsberg		EL
Civiling	Karl-Gustav Jansson		SH
Civiling	Åke Kinnander		EL
Professor	Johannes K Lunde		SH
Civiling	Göran Olsson		VB
Ingenjör	Thomas Rindby		Li
Civiling	Anders Rylander		Li
Fil kand	Lars-Ove Sörman		VB
Civiling	Lars Wernersson		VB
Professor	Svante von Zweybergk		EL

Som programledare och biträdande programledare vid NE fungerade till en början civiling Per Johan Svenningsson och civiling Jackie Bergman. Efter en omfördelning av arbetsuppgifterna inom NE har motsvarande uppgifter övertagits av civiling Ingvar Andersson respektive civiling Arne Kaijser.

En NE rådgivande grupp, NEGA-V, har i viss omfattning följt och givit impulser till den svenska forskningen. Denna grupp består av följande ledamöter

Professor	Curt Falkemo	ordförande	CTH, SH
Civiling	Lennart Claeson	sekreterare	Li
Direktör	Håvard Berge		VHL, Trondheim
Distributör	Walter Deines		Trollhätte Kraftverk
Civiling	Lennart Båveryd	} alternerar	Salén Energy
Civiling	Ove Englund		Salén Energy
Civiling	Åke Eriksson		Svenska Varv
Professor	Anders Sjöberg		CTH, VB
Professor	Svante von Zweybergk		CTH, EL

CTH = Chalmers Tekniska Högskola

Li = Birger Ludvigson Ingenjörbyrå AB

ME = Institutionen för maskinelement, CTH

EL = "- elektromaskinlära

VB = "- vattenbyggnad

SH = "- skeppshydromekanik

Göteborg 1979-05-14

#### FÖRORD TILL ANDRA UPPLAGAN

I föreliggande upplaga har tillfogats ett avsnitt om vågkraftverkens ianspråkstagande av kusten vid olika utbyggnadsgrader, sid 6:18 och 6:19. I kapitlet om vågkraftsbojarnas energiupptagning har en noggrannare metod tillämpats, vilket föranlett omskrivning av sidorna 5:2 - 5:6. Den ändrade metoden har medfört en höjning av energipriset från 0.25 till 0.27 kr/kWh, vilket inom ramen för övriga osäkerheter får anses betydelselöst.

Göteborg 1980-02-20

## Innehållsförteckning

Förord

Innehållsförteckning

Sammanfattning

1. Inledning
  2. Teoretiskt underlag för vågenergiomvandlare av bojtyp
  3. Modellförsök med bojar i laboratoriebasängar
  4. Modellförsök i naturliga vindvågor i sjön Lygnern samt funktionsprov i laboratorium
  5. Elektriska generatorer för vågbojar
  6. Vågenergi i svenska vatten
  7. Beräknad energikostnad mm för tre olika typer av vågkraftverk
  8. Förslag till fortsatt verksamhet
  9. Referenser
- Bilaga 1. Förteckning över grupprapporter
- Bilaga 2. Förteckning över reserapporter

## SAMMANFATTNING

Allmänt

Arbetet inom Gruppen för Vågenergiforskning vid Chalmers tekniska högskola bedrivs i enlighet med de linjer, som framlades i bilaga till planeringsrapporten NE 1977:4 "Vågenergi i Sverige" samt NE Plan för programmet Akvatisk energi.

Fas 1 av detta arbete skall avslutas med en resultatrapport i oktober 1979. Arbetet avsåg ursprungligen svenska vatten, men efterhand har intresset också inriktats mot "andra närliggande farvatten, från vilka den utvunna energin kan importeras till Sverige" (regeringens formulering i beslut om forskningsarbetet 1978-08-24).

Forskningsarbetet har förutom i ovannämnda planeringsrapport resulterat i reserapporter och forskningsrapporter, vilket framgår av förteckningar i bilaga 1 och 2.

Sammanfattningsvis har arbetet givit följande resultat:

Kännedom om den internationella forskningen inom vågenergiområdet. Personliga kontakter med flera utländska forskare har erhållits.

Kunskap om de grundläggande teorierna för omvandling av vågornas långsamma, oregelbundna krafter och rörelser till högspänd växelström, som matas in i elnätet.

Uppfattning om tillgänglig vågenergi i svenska farvatten samt om kostnaden för omvandling till elenergi.

God kunskap om de experimentella metoderna för studium av olika typer av vågenergiomvandlare i laboratoriebasängar och i naturliga, vindgenererade vågor.

Ett mål för den kunskapsuppbyggande verksamheten under fas 1 är, att den svenska vågenergiforskningen skall nå den internationella forskningsfronten.

Ett internationellt symposium "Ocean wave energy utilization" anordnas vid CTH hösten 1979 med ett stort antal internationella forskare. Organisationen av detta symposium har utförts som en del av arbetet under fas 1.

Vågenergipotentialen i Norden är mycket stor.

Vågenergin kräver inga stora intrång på land, miljöintrånget för allmänheten blir ringa, men störningar kan i vissa fall uppstå för fiske, sjöfart och friluftsliv.

Is kan utgöra ett stort problem för vågkraftverk i svenska vatten. Emellertid kan kraftverken konstrueras på sådant sätt, att de sänks ner under vattenytan vid isfara.

## Tillgänglig vågenergi i svenska vatten och kostnaden för dess utvinning

En viktig del av arbetet gäller vågenergens storlek och fördelning på riktningar och i tid. Genom att jämföra de uppmätta vågorna vid Ölands södra grund med sådana som teoretiskt beräknats med kännedom om vinden, har en enkel metod utvecklats, som medgivit beräkning av bruttoenergin längs svenska kusten. Resultaten visar att vågenergin är av samma storleksordning som tidigare antagits (planeringsrapporten).

I kapitel 6 redovisas dessa beräkningar. I själva verket är energipotentialen avsevärt större än som beräknats i rapporten, eftersom man kan räkna med flera rader vågkraftverk till sjöss. t ex med 50 km avstånd.

Genom att även föra in vindenergi direkt i vågkraftverkens elsystem synes ytterligare besparingar kunna göras vad gäller vind- och vågenergi.

Räknar man med en enda rad av vågkraftverk längs svenska kusten och tar hänsyn till isläggningsen, erhålles en total energimängd (brutto) om ca 50 TWh/år. På grund av sjöfart, fiske, friluftsliv mm kan ej hela denna energimängd utnyttjas. Tillgänglig vågenergi uppskattas därför till 10 - 25 TWh/år. Genom förluster vid omvandling och ilandföring beräknas en mindre del (minst 30 %) av denna nettoenergi kunna erhållas som elenergi på nätet, d v s 3 - 15 TWh/år. Vågenergi kan utvinnas till en kostnad som beräknas till ca 0,25 kr/kWh, om man utnyttjar det i rapporten studerade bojkraftverket, vilket dock ej betraktas som en optimal lösning ur kostnadssynpunkt.

Anläggningskostnaden för vågkraft blir stor men kostnaden för den utvunna energin synes vara av samma storleksordning som från andra alternativa energikällor.

Kostnaden för vågenergi är förra beroende av inflationen sedan kraftverket väl är byggt, eftersom den inkommande energin är kostnadsfri. Energikostnaden blir av flera skäl lägre i svenska vatten än t ex i Atlanten.

### Det svenska bojkraftverket

I rapporten behandlas relativt detaljerat konstruktionen av ett bojkraftverk med linjära elgeneratorer. Avsikten är inte att prioritera denna systemlösning bland det stora antalet möjliga sådana. Bojkraftverket har valts som ett konkret arbetsexempel inom vars ram ett flertal tekniska och ekonomiska frågor kan studeras.

I kapitel 2 antyds sålunda teorin för en vågboj. Teorin har krävt ett grundläggande teoretiskt förarbete av allmän hydrodynamisk natur. De hydrodynamiska teorierna räcker emellertid ej för att lösa problemet om energiupptagningen från vågorna. De måste kompletteras med experiment dels i modellbassäng, där repeterbara, regelbundna vågor kan åstadkommas, dels till sjöss i naturliga vindvågor. Dessa experiment redovisas i kapitel 3 och 4. Experimenten har givit underlag för bojarnas konstruktion samtidigt som de givit allmänna kunskaper om experimentella metoder för studium av vågenergiomvandlare i allmänhet.

Vid ett relativt stort forsknings- och utredningsarbete som det här redovisade är det lämpligt att det inriktas mot en egen konstruktion. Eftersom den avviker från andra kända lösningar, är den intressant som vetenskapligt bytesobjekt.

Bojkraftverket uppfyller dessa önskemål dels hydrodynamiskt, genom att den består av två flytande delar med inbördes rel. rörelse, dels genom att denna rörelse direkt i bojen utnyttjas för generering av elenergi via en linjär generator. Linjära elgeneratorer för långsamma rörelser blir tunga, vilket är av mindre betydelse, om de utnyttjas i vågbojar, som har stort displacement av andra skäl. Beräkningsarbetet med elgeneratorn har utnyttjats även för en del modellförsök, där dämpkonstanten har kunnat varieras, samtidigt som den utdämpade energin lätt kunnat mätas. I kapitel 5 presenteras kortfattat principen för den linjära elgeneratorn.

Med kunskaper om bojarnas hydrodynamiska egenskaper kan deras storlek, form och elmaskineri optimeras med hänsyn till vågförhållandena på platsen.

När det gäller försök i naturliga vindvågor måste bojarna förankras och dimensioneras så att de klarar storm.

Mätutrustning, datainsamling och analys är krävande såväl praktiskt vad gäller hårdvaran som teoretiskt vad gäller den statistiska analysen. Dessa frågor diskuteras närmare i kapitel 3 och 4. Praktiska erfarenheter från experimenten på sjön Lygnern är av stort värde även när det gäller att lägga ut större bojar till sjöss.

#### Andra typer av kraftverk

Ett antal olika vågenergiomvandlare är kända och beskrivna så, att man kan göra jämförande kostnadsberäkningar med det svenska bojkraftverket. Sådana beräkningar redovisas i detalj i kapitel 1.7. Av beräkningarna framgår, att bojkraftverket ger jämförelsevis låg kostnad per kWh. varför man bör fortsätta att utveckla detta kraftverk, som har många andra fördelar, bl a riktningsoberoende och enkel moduluppbyggnad. Kraftverksbojarna måste dock förses med något slags regleringssystem, som anpassar dem till rådande vågförhållanden. Vågkraftverk där energiomvandling sker ovanför vattnet t ex genom luftturbiner, kan visa sig fördelaktiga, speciellt ur driftssynpunkt.

Det brittiska vågenergiforskningsprogrammet innehåller inga riktningsoberoende bojomvandlare. Erfarenheterna från detta program är ej giltiga för vågkraftverk i svenska vatten vad gäller kostnader mm.

#### Fortsatt arbete

Det fortsatta arbetet kan lämpligen delvis bedrivas i nordiskt samarbete. För Sveriges del bör man inrikta sig på att vidareutveckla bojkraftverket i första hand genom att rel. stora bojar läggs ut till sjöss för att ge konkreta driftserfarenheter. På något längre sikt bör ett prototypkraftverk byggas. kanske i nordiskt samarbete. Först med ertarenhet av ett sådant kan säker ställning tagas till vågenergins möjligheter för den nordiska elförsörjningen.

Konkret forskningssamarbete diskuteras för närvarande med norska och finska forskare. Samarbetetsmöjligheterna förefaller goda, se kapitel 8.



1 INLEDNING

## 1. INLEDNING

Föreliggande rapport sammanfattar det arbete som hittills utförts sedan planeringsrapporten "Vågenergi i Sverige", NE 1977:4 skrevs.

Rapporten kommer tillsammans med kompletterande resultat från sommarens arbete att utgöra underlag för den resultatrapport som NE skall utarbeta i höst.

De för uppdraget viktigaste delarna är uppskattningen av vågenergipotentialen samt beräkning av energikostnaden.

Framtagningen av dessa delar har krävt en omfattande kunskapsutveckling. Denna har åstadkommit genom litteraturstudier, kontakter med andra forskare samt genom erfarenheter och resultat från egna försök och egen teoriutveckling.

Kontakterna, som främst etablerats i samband med resor, har även bidragit till att föra fram den svenska forskningen internationellt. Detta accentueras genom det stora intresse som höstens vågenergisymposium i Göteborg rönt hos den internationella expertisen.

Underlaget för bestämning av vågenergipotentialen är otillräckligt, särskilt när det gäller utförda vågmätningar.

I stor utsträckning har vinduppgifter måst utnyttjas för beräkning av vågor genom sk hindcasting. Härvid har de av SMHI utförda vågmätningarna utnyttjats för kontroll av godheten hos de relativt enkla datorprogram som använts.

Hindcastingberäkningar från sjöstationer har endast hunnit göras för ett fåtal år för tre platser.

För övriga kustområden har dels gamla observationer utnyttjats dels hindcastingberäkningar för vissa stationer nära kusten. Osäkerheten i de sålunda framtagna värdena är relativt stor.

Kännedomen om vågförhållandena ute på havet långt från land (> 50 km) är mycket dålig. Detta är en stor brist eftersom potentialen i sådana områden sannolikt är av samma storleksordning som den för kustområdena framräknade potentialen.

Den tillgängliga vågenergin på västkusten och på Gotlands Östersjöside är betydligt större än vad som tidigare antagits.

Vågornas fortskridningsriktning har konsekvent antagits överensstämma med vindriktningen, vilket är diskutabelt. Hänsyn till vattendjup och dyningar har ej tagits.

Beräkningar av energikostnader har genomförts i två olika steg där det ena går ut på att bestämma ett kraftverks årliga energiproduktion och det andra på att bestämma årskostnaderna för kraftverket.

En viss koppling finns i det att energiproduktion och dimensioner är beroende av varandra.

De mest ingående studierna har gällt bojar i olika utformningar. Teoretiska samband har uppställts och modellförsök utförts. God överensstämmelse mellan teori och försök har erhållits. På grundval av detta har lämpliga dimensioner för fullskala kunnat bestämmas och förväntad energiproduktion beräknas.

Som energiomvandlare har bojen försetts med en linjär elgenerator. Denna har studerats ingående och ett dimensioneringsprogram har tagits fram. Denna typ av generator har uppenbara fördelar i det att elenergin erhålles direkt från bojrörelsen, utan mellanled.

Vid försök i sjön Lygnern och i en bassäng i laboratorium har en lämplig utformning av boj och förankring vuxit fram. Samtidigt har mätmetodik och mätutrustning utvecklats.

Kostnadsberäkningen behandlar i första hand kapitalkostnaderna som relativt väl kan beräknas när kraftverkets utformning väl är bestämd. De största osäkerheterna ligger här på förankringssystemen. Även antagandena om avskrivningstid är osäkra, särskilt som de är kopplade till underhållets omfattning.

Det omfattande teoretiska arbete som utförts avser leda till sofistikerade matematiska modeller som sedan kan utnyttjas för simulering av omvandlarnas funktion.

Arbetet har präglats av en ökande tro på vågenergens möjligheter. Många oförutsedda praktiska problem har övervunnits men lett till förseningar.

Vågenergin kan i princip värderas på samma sätt som vindenergin, se DFE-rapport nr 18. Underlaget för en sådan värdering synes dock ännu för knapphändigt både beträffande omfattning och noggrannhet.

Allmänheten har informerats om vågenergins möjligheter och problem dels vid utställningar och genom föredrag dels genom massmedia samt även genom personlig information till grupper och enskilda.

2. TEORETISKT UNDERLAG FÖR VÅGENENERGIOMVANDLARE  
AV BOJTYP

## 2. TEORETISKT UNDERLAG FÖR VÅGENERGIOMVANDLARE AV BOJTYP

### 2.1 Använda begrepp

För att underlätta förståelsen av den följande texten bör vissa grundläggande begrepp klarläggas. För fördjupade studier hänvisas dock till t.ex. Kinsman (1965).

Våghöjd  $H$  (m)

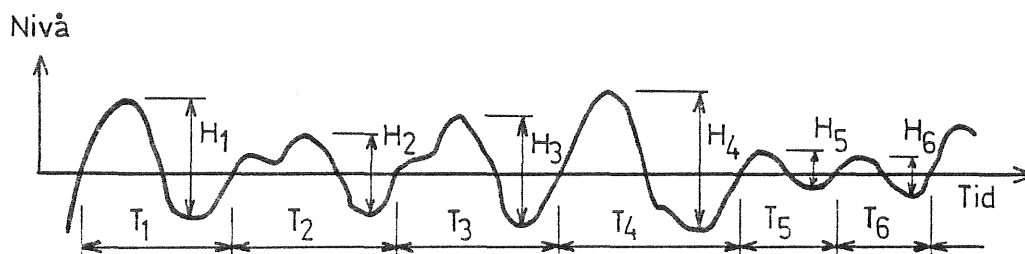
Våghöjden  $H$  är det vertikala avståndet mellan en vågtopp och efterföljande vågdal. Se figur 2.1 och 2.2.

Vågamplitud  $a$  (m)

Vågamplituden är det vertikala avståndet från vågtopp eller vågdal till medelvattenytan. För en sinusvåg är  $H = 2a$ .

Signifikant våghöjd  $H_s$  (m)

Signifikanta våghöjden är medelvärdet av de  $N/3$  högsta våghöjderna i en lång serie om  $N$  vågor.



Figur 2.1 Punktregistrering av en vågrörelse

Vågperiod  $T$  (s)

En vågperiod är tiden mellan två på varandra följande skärningar (nollgenomgångar) uppåt av medelvattenytan. Se figur 2.1.

Medelvågperiod  $T_z$  (s)

Medelvågperioden eller nollgenomgångsperioden för ett vågtåg är medelvärdet av alla vågperioder  $T_i$  i vågtåget.

Frekvenser  $f$  (Hz),  $f_z$  (Hz) och  $\omega$  ( $s^{-1}$ )

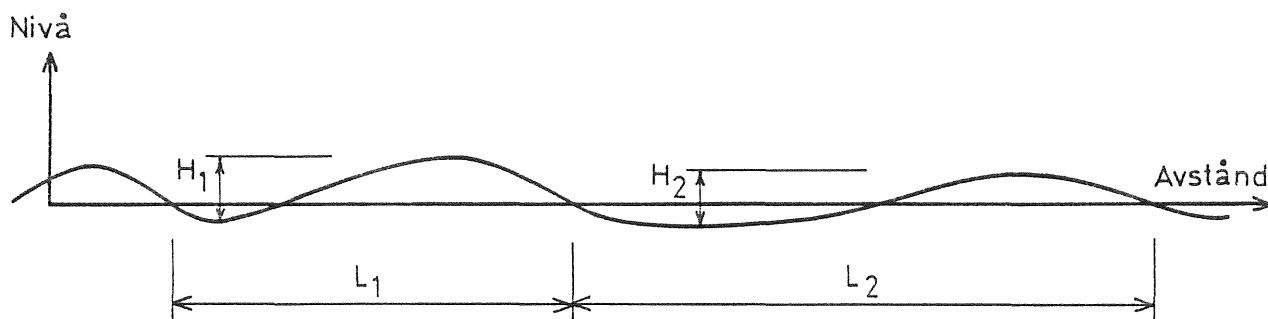
Vågornas frekvens är  $f = 1/T$ .

Nollgenomgångsfrekvensen är  $f_z = 1/T_z$ .

Vågornas vinkelfrekvens är  $\omega = 2\pi f \cong 2\pi/T$ .

Våglängd  $L$

Våglängden är det horisontella avståndet mellan två intilliggande skärningar med medelvattenytan med positiv lutning. Se figur 2.2.



Figur 2.2 Ögonblicksbild av ett vågtåg

Vågenergi  $E$  ( $J/m^2$ )

Vågenergin är tidsmedelvärdet av vågrörelsens energi per ytenhet av havet. För en sinusvåg gäller

$$E = \rho g a^2 / 2 \quad \dots (2.1)$$

Vågeffekt  $p$  (W/m)

Vågeffekten är för en vågrörelse med ensartad utbredningsriktning energiflödet genom en vertikal yta parallell med vågkammarna. För en sinusvåg gäller på djupt vatten

$$p = E L / 2T = 0.5 gE / \omega \quad \dots (2.2)$$

För en oregelbunden vågrörelse med olika utbredningsriktning hos vågorna kan vågeffekten definieras som energiflödet in genom manteln på en vertikal infinitesimal cylinder. Vågeffekten blir med denna definition oberoende av vågornas utbredningsriktning och kan då beräknas ur en nivåmätning i en punkt.

Vågspektrum  $S(f)$  ( $m^2s$ )

Ett oregelbundet vågtåg som i figur 2.1 kan beskrivas av en summa av sinusfunktioner med hjälp av fourierserieanalys. Vågens form erhålles av uttrycket

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \sin(2\pi f_i t + \alpha_i) \quad \dots (2.3)$$

där  $\zeta$  är vattenytans nivå  
 $a_i$  vågkomponentens amplitud  
 $f_i$  vågkomponentens frekvens  
 $\alpha_i$  vågkomponentens fasvinkel

Frekvenserna  $f_i$  ges av

$$f_i = \Delta f/2 + i \Delta f \quad \dots (2.4)$$

där  $\Delta f$  kallas frekvensdelningen för serien.

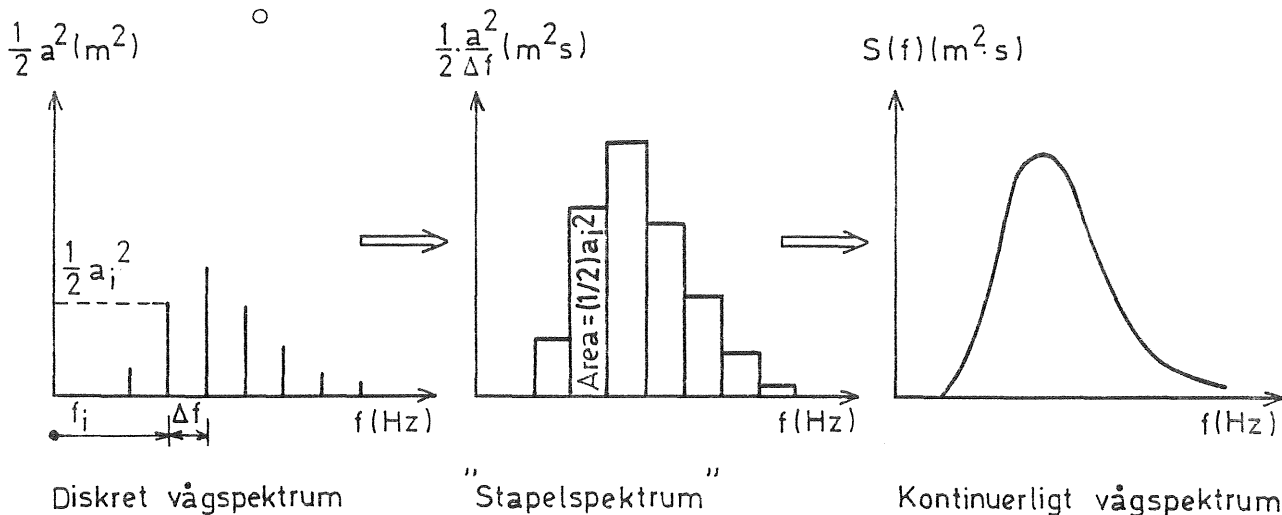
Vågspektrum är vågenergens fördelning på olika frekvensband. Vågenergens spektraltäthet blir

$$S(f_i) = \frac{1}{2} a_i^2 / \Delta f \quad \dots (2.5)$$

Om frekvensdelningen  $\Delta f$  görs godtyckligt liten övergår  $S(f_i)$  till ett kontinuerligt spektrum  $S(f)$ . Vågspektrum kan bestämmas genom direkt mätning eller genom att tillämpa empiriska spektra som kan beräknas ur uppgift om vindstyrka, stryklängd och vindens varaktighet. Exempel på vågspektra visas i figur 2.2b.

Mellan vågenergin i en oregelbunden vågrörelse och vågspektrum gäller sambandet

$$E = \rho g \int_0^{\infty} S(f) df \quad \dots (2.6)$$



Figur 2.2b Illustration av begreppet vågspektrum.



Effektspektrum  $p(f)$  (Ws/m)

Vågeffekten kan på liknande sätt delas upp på frekvensband varvid erhålls ett effektspektrum eller vågeffektens spektral-täthet. Utgående från vågspektrum erhålls detta till

$$p(f) = \frac{1}{4\pi} \rho g^2 f^{-1} S(f) \quad \dots (2.7)$$

Mellan vågeffekten i en oregelbunden vågrörelse och effektspektrum gäller följande samband

$$p = \int_0^{\infty} p(f) df \quad \dots (2.8)$$

Värdet av integralen (2.8) kan överslagsmässigt anges till  $0.5 H_S^2 T_Z kW/m$ .

Stryklängd  $F$  (m)

Stryklängden är den sträcka över vilken vinden verkar på vågorna i dessas utbredningsriktning. I begränsade vattenområden som Östersjön och Kattegatt är stryklängden oftast avståndet till land i lovartsriktningen. I större havsområden begränsas stryklängden oftast av att vinden endast blåser med en viss styrka och riktning över ett område som är mindre än avståndet till land.

Varaktighet

Vinden måste blåsa under en viss minsta tid för att de största vågor som svarar mot stryklängden skall hinna utbildas. Om så inte är fallet bestäms vågornas storlek av vindens varaktighet

2.2 Studier av grundläggande teorier

Under tiden fram till och med sista världskriget grundade man sig nästan uteslutande på experimentella undersökningar och erfarenheter från konstruktionsarbeten inom den del av hydrodynamiken, där vågor måste tas med i beräkningarna.

Sedan sista världskriget och särskilt under de två senaste decennierna har det emellertid uppstått en markant åsiktsförskjutning och omvärdering av hur forskningen inom detta område borde drivas för att nå fram till lösningar av och en djupare förståelse för de hydrodynamiska problemen, i det att man nu inte längre drar sig för ganska komplicerade och avancerade matematiskt betonade hydrodynamiska teorier. Idag finner man också, att beräkningar baserade på matematisk-hydrodynamiska teorier och experimentella undersökningar kompletterar varandra, något som har lett till en mycket bättre insikt i de komplicerade hydrodynamiska problem som uppstår inom all offshore verksamhet, sett i detta ords vidaste bemärkelse. Denna utveckling är ändå bara i sitt allra första skede.

Härvid skiljer sig hydrodynamiken inte från den utveckling som äger rum inom fysiken, där en djupare inblick i och förståelse av naturlagarna är målet, och där teoretiska och experimentella undersökningar kompletterar varandra.

Gruppens forsknings- och utvecklingsarbete för praktiskt utnyttjande av vågenergin som supplement till Sveriges elförsörjning skall byggas på en solid grund, och därför har vi under bearbetande ett brett upplagt och ganska ambitiöst matematiskt-hydrodynamiskt arbete, där den grundläggande teorin för vågrörelse, vågenergi, kroppars rörelse i vågor, vågenergiomvandling och tillhörande områden som t ex förankring och förtöjning kommer att behandlas. I verkligheten är arbetet upplagt så, och måste också vara upplagt på sådant sätt att de utvecklade teorierna också täcker annan off-shore verksamhet, t ex borrhullformars och andra kroppars rörelse i vågor, våginducerade krafter och moment på stationära bottenfasta kroppar samt förankrade flytande kroppar osv.

Medan vi i och för sig inte söker komplicerad och avancerad matematik, så skall vi inte heller dra oss för sådan när lösningar av problemen gör detta både önskvärt och nödvändigt för djupare inblick och förståelse.

Arbetet beskrivs i Grupprapport 20: Hydrodynamic Theory of Ocean Surface Waves and Energy Conversion. I de första kapitlen är det huvudsakligen redogjort för de olika integralteorier (baserade på Greens och Stokes arbeten) som är nödvändiga för det fortsatta arbetet. Vidare är teorier utvecklade för vätskerörelsens kinematik samt spänningar och tryck i vätskor. I ett efterföljande kapitel är grundläggande ekvationer uppställda för rörelsen av en ideell grund så väl som djup vätska med fri vattenyta (dvs med vågor). Vidare har utvecklats teorier för hydrostatiska och hydrodynamiska krafter och moment som verkar på kroppar i rörelse djupt under den fria vattenytan.

De efterföljande kapitlen omfattar hydrodynamiska teorier för flytande kroppars rörelse i vågor, där kroppen tillåtes ha maximalt 6 frihetsgrader och där förutsättningarna för den fria vätskeytan såväl som för kroppens yta tillfredsställes linjärt. Vidare behandlas den hydrodynamiska teorin för vågenergiomvandling.

Den statistiska teorin för vindgenererade vågor kommer att få en bred behandling. Som stöd för detta arbete kommer de grundläggande teorier inom sannolikhetsläran och statistiken som använts att behandlas i en bilaga.

Teorin för förankrings- och förtöjningskrafter kommer att behandlas i ett kapitel.

Detta är en grov översikt över arbetets innehåll, men det är redan nu klart att flera detaljområden inom hydrodynamiken utöver de nämnda huvudområdena måste tillkomma för att forskningsgruppens arbete skall vara förankrat i och ge en solid inblick i och förståelse för den hydrodynamiska delen av vågenergiomvandlingen. Vidare kommer det sannolikt att visa sig önskvärt att även pröva på en sådan behandling av de hydrodynamiska problemen att gränsbetingelserna tillfredsställes till en högre ordning.

Det är meningen att de hydrodynamiska teorierna skall utvecklas på sådant sätt att de (även när de ej kan ges som konkreta formler uttryckta med hjälp av kända och tabulerade funktioner) när de tillämpas på speciella modeller likväl kommer att lämpa sig för beräkningar med hjälp av datorer i samband med detaljdimensioneringen av vågkraftverk samt vid beräkningar av förankringskrafter m.m.

### 2.3 Tillämpad teori

Den matematiska modell som hittills använts vid arbetet med utvecklingen av gruppens vågenergiboj har presenterats dels i Vågenergi i Sverige (NE 1977:4), dels utförligare i Grupp-rapport 10. Utgångspunkten har varit att bojen endast kan röra sig i vertikalled. Den infallande vågen som sätter bojen i rörelse antas vidare vara sinusformad.

$$\zeta(t) = \zeta_0 \cos \omega t \quad \dots (2.9)$$

$\zeta(t)$	vattenytans läge i vertikalled relativt medelvattennivån i en punkt i höjd med bojen
$t$	tiden
$\zeta_0$	vågamplituden
$\omega$	vågens cirkelfrekvens

Bojens rörelse bestäms enligt teorien av en andra ordningens differentialekvation. På djupt vatten gäller

$$(m+a) \ddot{z} + (b+b_1) \dot{z} + cz = \left[ (c-a\omega^2)^2 + (b\omega)^2 \right]^{1/2} \cdot e^{-kD} \zeta_0 \cos(\omega t + \alpha) \quad \dots (2.10)$$

Här är

$m$	masströgheten hos det svängande systemet
$a$	den hydrodynamiska massan (medsvängande vattenmassa)
$z$	bojens läge i vertikalled relativt jämviktsläget
$b$	den hydrodynamiska dämpningen
$b_1$	dämpkonstant för den yttre dämpningen som gör att energi tas från vågorna
$c$	fjäderkonstanten för den hydrostatiskt återförande kraften
$k$	vågtalet $2\pi/L$
$D$	bojens sjunkdjup, avståndet från vattenytan till "kölen"
$\alpha$	fasförskj. mellan den drivande kraften och vågrörelsen.

För fjäderkonstanten  $c$  gäller att

$$c = \rho g A \quad \dots (2.11)$$

där $\rho$	är vattnets densitet
$g$	jordaccelerationen
$A$	bojens vattenlinjearea

Observera att det svängande systemet kan ha en masströghet  $m$  som är större än displacementets massa  $\rho V$ . Detta inträffar t.ex. då en roterande generator används som energiupptagare vare sig den placeras på bojen eller på botten under bojen. För de i kapitel 3 beskrivna försöken är dock masströgheten lika med displacementets massa så när som på en motvikt och potentiometer som gör att skillnaden högst är 2.7% vilket har försumrats.

### Dämpkonstanten $b_1$

För försök utan energiupptagning har antagits  $b_1 = 0$ , dvs friktionen i upphängningen har försumrats vid utvärderingen. Vid direkt mätning visades den vara mycket liten jämfört med den hydrodynamiska dämpningen. För försök med energiupptagaren i funktion eftersträvade reglerutrustningen ett konstant värde

$$b_1 = F/\dot{z} \quad \dots (2.12)$$

där  $F$  är momentanvärdet av den yttre dämpkraft som härrör från den elektriska dämputrustningen och friktionen i upphängningen.

### Amplitudresponsfunktionen

Vid lösningen av differentialekvationen (2.10) har antagits att alla koefficienter är konstanta med avseende på tiden dvs differentialekvationen är linjär. Detta ger en lösning

$$z(t) = \zeta_0 \left\{ \frac{(c - a\omega^2)^2 + (b\omega)^2}{(c - (m+a)\omega^2)^2 + (b+b_1)^2\omega^2} \right\}^{1/2} e^{-kD} \cos(\omega t + \psi) =$$

$$= z_0 \cos(\omega t + \psi) \quad \dots (2.13)$$

där  $\psi$  är fasvinkeln mellan bojens hävningsrörelse och vågrörelsen. Förhållandet  $Y = z_0/\zeta_0$  kallas amplitudresponsfunktionen.

### Hydrodynamisk massa och dämpning

Den hydrodynamiska massan,  $a$ , och dämpningen,  $b$ , varierar båda med

- o frekvensen hos rörelsen
- o kroppens form och displacement
- o vattendjupet
- o avståndet till andra begränsningen i planet.

Vid laboratorieförsöken har beroendet av kroppens form och displacement undersökts. Inverkan från försöksrännornas väggar har konstaterats (se kapitel 3).

Ett sätt att beskriva frekvensberoendet finns refererat i GR:10. (Se även Havelock 1955).

Man definierar två variabler  $\mu(\omega)$  och  $\varepsilon(\omega)$  som

$$\mu(\omega) = a/(\rho V) \quad \dots (2.14)$$

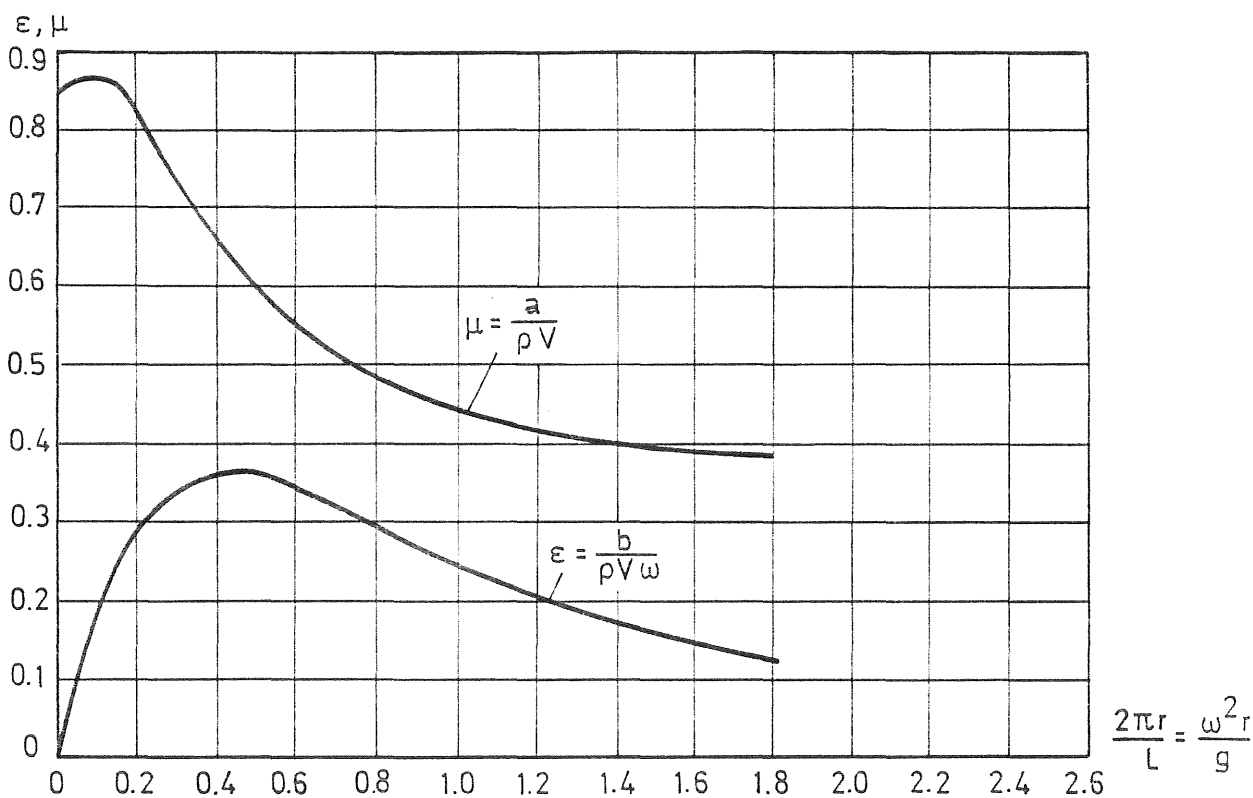
$$\varepsilon(\omega) = b/(\rho V \omega) \quad \dots (2.15)$$

där  $V$  är displacementens volym.

När mätresultaten jämförts med teorin har approximativt satts att  $\mu$  och  $\varepsilon$  är konstanta lika med de värden som gäller vid resonans,  $\omega = \omega_0$ . En jämförelse mellan amplitudresponsfunktionen för  $\mu(\omega_0)$  och  $\varepsilon(\omega_0)$  konstanta och för  $\mu(\omega)$  och  $\varepsilon(\omega)$  ger, med Havelocks teoretiska värden, små skillnader jämfört med försöksvärdenas spridning.

### Havelocks beräknade koefficienter

Havelock (1955) har med hjälp av potentialteori beräknat masskoefficienten  $\mu(\omega)$  och dämpkoefficienten  $\varepsilon(\omega)$  för en till hälften nedsänkt sfär. Resultatet av denna beräkning återges i figur 2.3



Figur 2.3 Masskoefficient  $\mu = a/(\rho V)$  och dämpkoefficienten  $\varepsilon = b/(\rho V \omega)$  för en till hälften nedsänkt oscillerande sfär. Displacementens volymen är  $V = 2\pi r^3/3$ . Stort vattendjup. (Efter Havelock 1955).

Om  $\mu$  och  $\varepsilon$  tas ur diagrammet för en sfär med radien  $r = 0.15$  m erhålles med hjälp av ekvation (2.19) iterativt resonansfrekvensen till 1.31 Hz ( $\omega_0 = 8.23 \text{ s}^{-1}$ ). Härvid har displacementens massa satts

lika med den svängande massan  $m$  vilket ger 7.06 kg. Vid resonansfrekvensen är  $\omega^2 r/g = \omega_0^2 r/g = 1.03$  vilket enligt figur 2.3 ger masskoefficienten  $\mu(\omega_0) = 0.44$  och dämpkoefficienten  $\epsilon(\omega_0) = 0.24$ .

### Normaliserat deplacement

För uppskalnings- och jämförelseändamål uttrycks deplacementet  $V$  i våra försök med ett normaliserat deplacement  $\hat{V}$  på så sätt att aktuell deplacementsvolym divideras med volymen av ett halvklot med samma radie som bojen.

$$\hat{V} = V / (2\pi r^3 / 3) \quad \dots (2.16)$$

Jämförelser kan då direkt göras mellan bojar i olika skalor. För samma värde på  $\hat{V}$  skall t.ex. den vid resonans erhållna masskoefficienten och dämpkoefficienten  $\epsilon$  vara lika.  $\hat{V}$  för den tidigare beskrivna halvsfären blir definitionsmässigt  $\hat{V} = 1.00$ .

### Vattendjupets inverkan

Ekvation (2.10) och (2.13) gäller endast då vattendjupet är så stort att vågorna inte påverkas av botten. När vattendjupet  $h$  är mindre än halva våglängden bör faktorn  $e^{-kD}$  bytas mot faktorn

$$\frac{\cosh k(h-D)}{\cosh kh} \quad \dots (2.17)$$

Vid de mätningar som redovisas i kapitel 3 är korrektionen av mycket liten betydelse. Vid resonansfrekvensen 1 Hz är den cirka 1% och vid de längsta vågorna (0.7 Hz) cirka 3%.

### Egensvängningsförloppet

Vid försök, där bojen fått svänga i stillastående vatten efter att ha släppts från något begynnelseläge  $z(0)$ , kan svängningsekvationen enligt teorien skrivas (jfr ekv 2.10)

$$(m+a)\ddot{z} + b\dot{z} + cz = 0 \quad \dots (2.18)$$

Lösningen till denna ekvation är

$$z(t) = z(0) \cdot e^{-k_1 t} \cos(t\sqrt{\omega_0^2 - k_1^2}) \quad \dots (2.19)$$

där  $z(0)$  är utgångsläget  
 $k_1 = \frac{b}{2(a+m)}$   
 $\omega_0 = \sqrt{c/(a+m)}$

$\omega_0$  är den odämpade svängningens vinkelfrekvens. Den dämpade svängningens vinkelfrekvens  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - k_1^2}$

Ur registrerade egensvängningsförlopp (se figur 3.1) har konstanterna  $b$  och  $a$  beräknats genom att perioden  $T$  och avklingningen i amplitud för successiva svängningar mätts. För ett ideellt förlopp gäller nämligen

$$\frac{z(n\pi/\omega)}{z((n+2)\pi/\omega)} = e^{k_1 T} \quad \dots (2.20)$$

för  $n = 0, 1, 2, \dots$

### Bojens energiupptagning

Eftersom reglersystemet ger en kraft i upphängningen  $F$ , som är proportionell mot hastigheten (se ekv. 2.12) kan den momentant upptagna effekten skrivas

$$P(t) = F(t) \cdot \dot{z}(t) = b_1 (\dot{z}(t))^2 \quad \dots (2.21)$$

I regelbundna sinusformade vågor erhålles genom insättning av  $z = z_0 \cos(\omega t + \psi)$  och integrering över ett jämt antal perioder den ur vågorna upptagna medeleffekten

$$P_{\text{med}} = \frac{b_1}{2} \omega^2 z_0^2 \quad \dots (2.22)$$

Medeleffekten som funktion av frekvensen kan enkelt uttryckas med hjälp av amplitudresponsfunktionen  $Y(\omega)$  och infallande våg-amplitud  $\zeta_0$ .

$$P_{\text{med}}(\omega) = \frac{b_1}{2} \zeta_0^2 \omega^2 Y^2(\omega) \quad \dots (2.23)$$

eller

$$\frac{P_{\text{med}}(\omega)}{\zeta_0^2} = \frac{b_1}{2} \omega^2 Y^2(\omega) \quad \dots (2.24)$$

där högerledet är oberoende av vågamplituden.

### Hydrodynamisk verkningsgrad

Vid sinusformade vågor på djupt vatten bestäms medeleffekten per meter vågfront  $p$  av uttrycket

$$p = \frac{\zeta_0^2}{4} \rho g^2 \frac{1}{\omega} \quad \dots (2.25)$$

Utgående från detta kan man teckna ett uttryck för verkningsgraden för en vågenergiomvandlares förmåga att absorbera vågornas energi. För en boj med radien  $r$  kan denna hydrodynamiska verkningsgrad skrivas

$$\eta = \frac{P_{\text{med}}}{p \cdot 2r} \quad \dots (2.26)$$

Uttrycks verkningsgraden med hjälp av amplitudresponsfunktionen fås

$$\eta = \frac{b_1 \omega^3 Y^2(\omega)}{\rho g^2 r} \quad \dots (2.27)$$

Den tillämpade definitionen av verkningsgrad kan för vissa typer av punktformiga omvandlare ge värden över 1. Detta beror på att omvandlaren i så fall tar upp energi från en större bredd än sin egen diameter eller energi reflekterad på intilliggande omvandlare. Produkten  $2r \cdot \eta$  kan uppfattas som en transferfunktion mellan vågeffekten  $p$  och den upptagna effekten  $P_{med}$ .



### 3. MODELLFÖRSÖK MED BOJAR I LABORATORIEBASSÄNGER

### 3. MODELLFÖRSÖK MED BOJAR I LABORATORIEBASSÄNGER

#### 3.1 Målsättning

Försök med en vågkraftboj har gjorts i modellskala i laboratorium. Syftet med försöken var att bestämma bojens energiupptagande förmåga för varierande displacement, utformning och vågförhållanden. Närmast har den uppställda teoriens giltighet kontrollerats och resultaten har använts dels för dimensionering av en större modellboj för försök i en insjö, dels för dimensionering av den fullskaleboj som dimensionerats och kostnadsberäknats i kapitel 7.

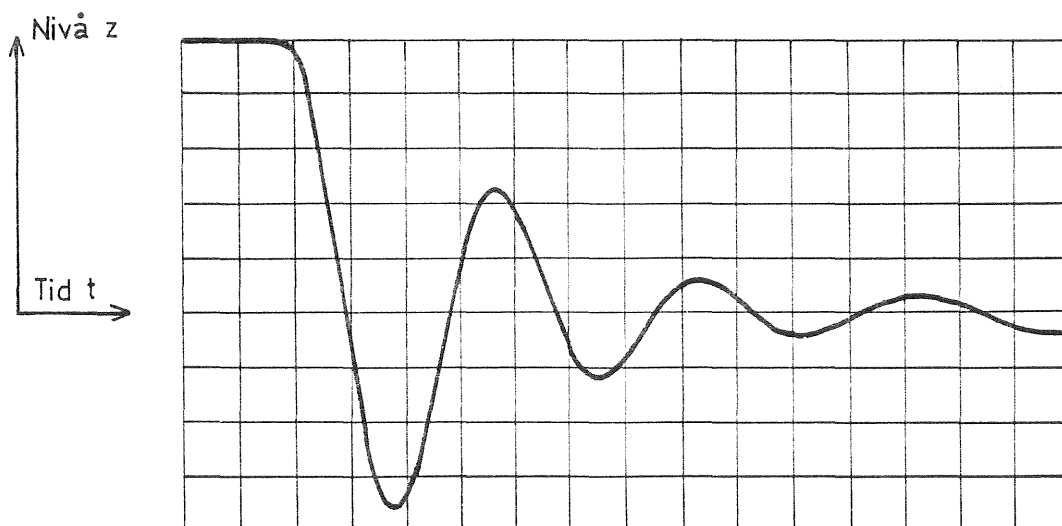
#### 3.2 Utförda modellförsök

Modellbojarna har provats i frihetsgraden hävning dvs rörelse i vertikalled. Egensvängningsförsök i lugnt vatten och försök i regelbundna vågor har utförts i såväl ränna som bassäng. Tre olika utformningar av bojen och tre olika displacement har prövats. Skaleffekten har undersökts. Slutligen har bojens energiupptagning simulerats med hjälp av en reglerbar elektrisk bromsanordning. Försöken utan energiupptagning i rännor har redovisats i Grupp rapport 11, motsvarande försök i bassäng i Grupp rapport 13 och försöken med energiupptagning i Grupp rapport 14. En sammanställning över utförda försök finns i tabell 3:2.

#### Egensvängningsförsök

Vid egensvängningsförsöken har modellbojen lyfts en bestämd sträcka och sedan släppts momentant. Egensvängningsrörelsen har därvid registrerats på skrivare. Motsvarande försök har utförts med bojen i nedtryckt läge, och försöken har upprepats för olika utgångslägen. Ett av skrivaren registrerat förlopp visas i figur 3.1. Ur egensvängningsförsöken har bojarnas resonansfrekvens samt deras hydrodynamiska massa och dämpning bestämts.

78 03 02 - 1

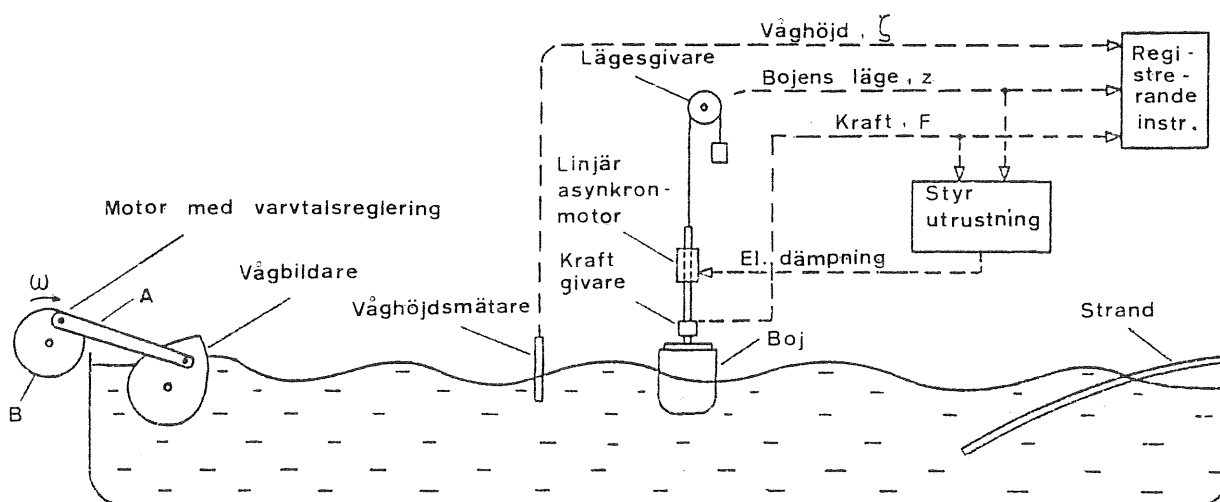


Figur 3.1 Exempel på registrering från egensvängningsförsök. Modellen har släppts från ett upplyft läge.

### Försök i regelbundna vågor

Försök i regelbundna vågor har utförts med en försöksuppställning enligt den schematiska bilden figur 3.2. Vid de första försöks-serierna var den visade dämpningsutrustningen inte byggd.

Vid försöken har den infallande vågen och bojens rörelse registrerats. Vid dämpförsöken har även kraften i upphängningen registrerats. Försöken har utförts för en serie vågfrekvenser och inledningsvis studerades inverkan av olika branthet. Amplitudrespon-sen dvs förhållandet mellan bojens lägesamplitud och vågamplituden har sedan beräknats för respektive frekvens.



Figur 3.2 Schematisk bild av försöksuppställningen.

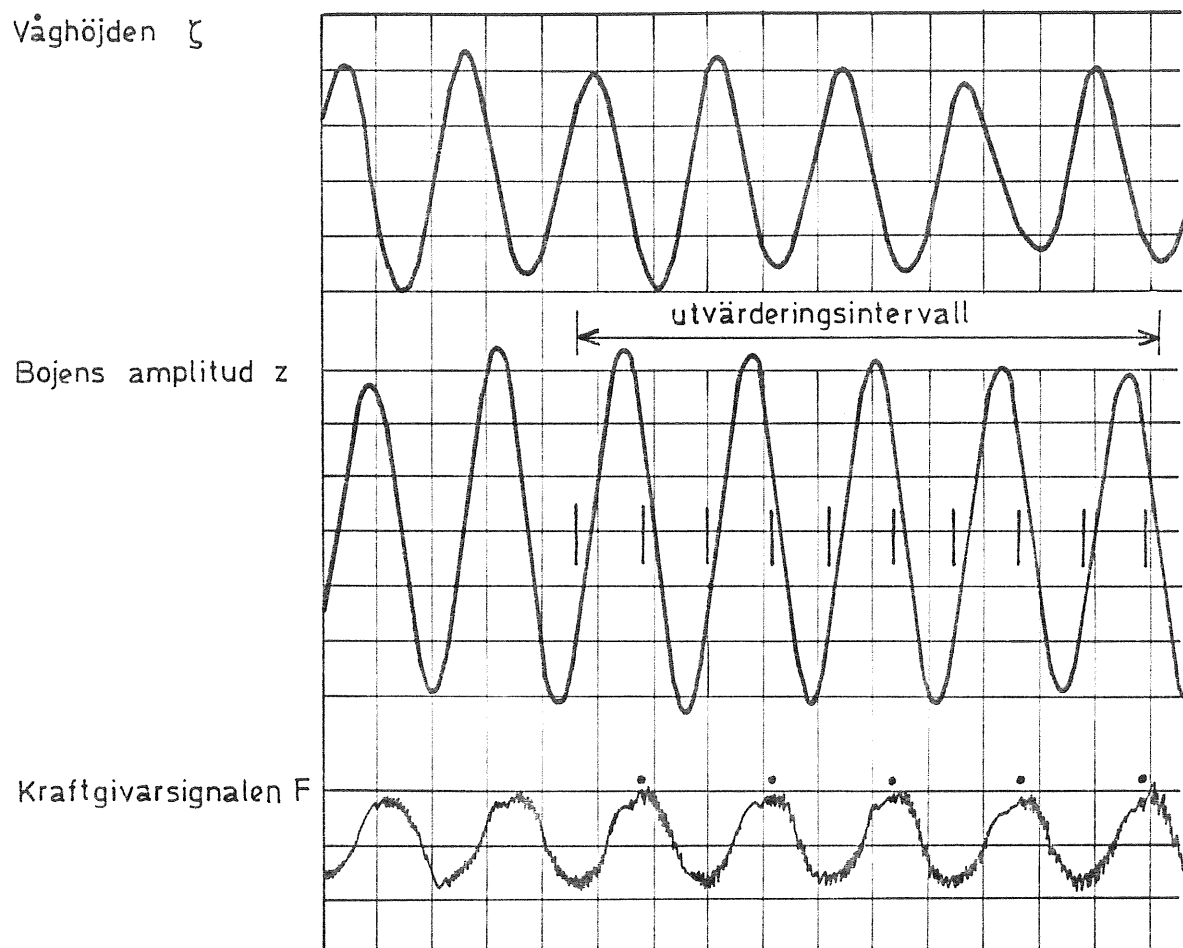
### Försök med energiupptagning

Försök med energiupptagning i regelbundna vågor har också utförts. Energiupptagningen från vågbojen har då simulerats med hjälp av en linjär asynkronmotor. Den linjära motorn har styrts med hjälp av ett reglersystem så att den bromsar bojens rörelse med en kraft proportionell mot bojens hastighet. Ur registreringen av kraften och läget har sedan bojens energiupptagning bedömts. Den infallande vågenergin har beräknats ur vågregistreringen. Ett exempel på registrering visas i figur 3.3.

### Rännor och bassänger

De första försöken med den större bojen har utförts i en 1.82 m bred ränna och försöken med den mindre bojen i en 1 m bred vågränna. De senaste försöken med den större bojen har utförts i en speciellt iordningsställd vågbassäng med måtten 9.3 x 18.3 m.

Vissa problem med reflexionen i rännorna har uppstått vilket diskuteras nedan.



Figur 3.3 Exempel på en körning som utvärderats.

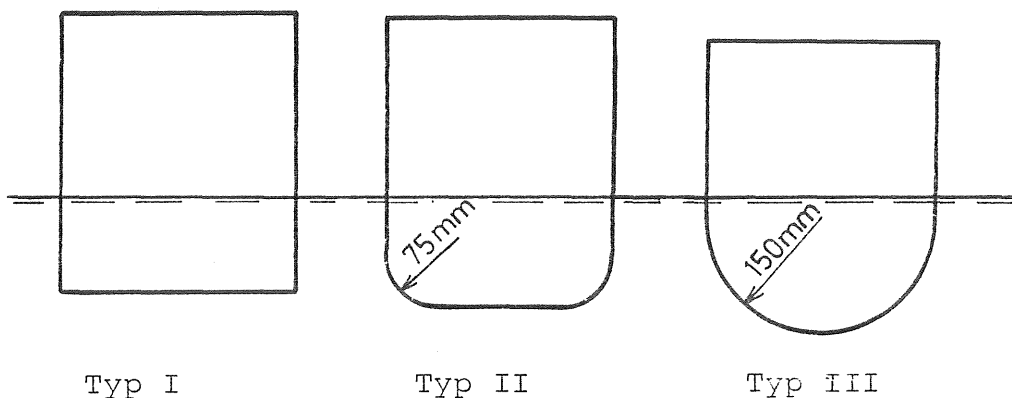
### Skalor

Försöken med odämpad boj i vågräna har genomförts i två skalor. Huvuddelen av försöken har utförts med en boj  $\varnothing$  300 mm i den 1.82 m breda rännan. Tre av dessa försök har sedan upprepats med en nedskalad boj  $\varnothing$  165 mm i en 1.0 m bred ränna. Den mindre bojen är således byggd i skala 1:1.82 av den större bojen. Vattendjupet i respektive ränna hölls till ca 0.77 och 0.42 m.

### Modeller

De provade vågbojarna har cirkulärt tvärsnitt i planet. I figur 3.4 visas bojarnas vertikalsnitt. Bojarna har dels utformats med diametern 300 mm och displacementsvikterna 5.5, 8.5 och 11.5 kg,

dels med diametern 165 mm och displacementsvikten 1.46 kg.



Figur 3.4 Vertikaltvårsnitt hos de provade cirkulära bojarna.

Tabell 3:1 Djupgåenden (mm) för de tre bojarna vid olika displacement.  $\varnothing$  300 m.

Massa m (kg)	5.50	8.50	11.50
Normerat displacement $\hat{V}$	0.78	1.20	1.63
Bojtyp I	78	120	163
II	96	138	181
III	128	170	213

Tabell 3:2 Sammanställning över utförda modellförsök.  
r betecknar att försöken utförts i ränna.  
b betecknar försök i bassäng.

Bojtyp (se figur 3.4)	I			II			III		
	0.78	1.20	1.63	0.78	1.20	1.63	0.78	1.20	1.63
Egensvängningsförsök $\varnothing$ 300 mm	rb	rb	rb	rb	rb	rb	rb	rb	rb
$\varnothing$ 165 mm		r			r			r	
Regelbundna vågor									
a) utan energiupptagning $\varnothing$ 300 mm	rb	rb	rb	rb	rb	rb	rb	rb	rb
$\varnothing$ 165 mm		r			r			r	
b) med energiupptagning $\varnothing$ 300 mm						r			

### Pågående modellförsök

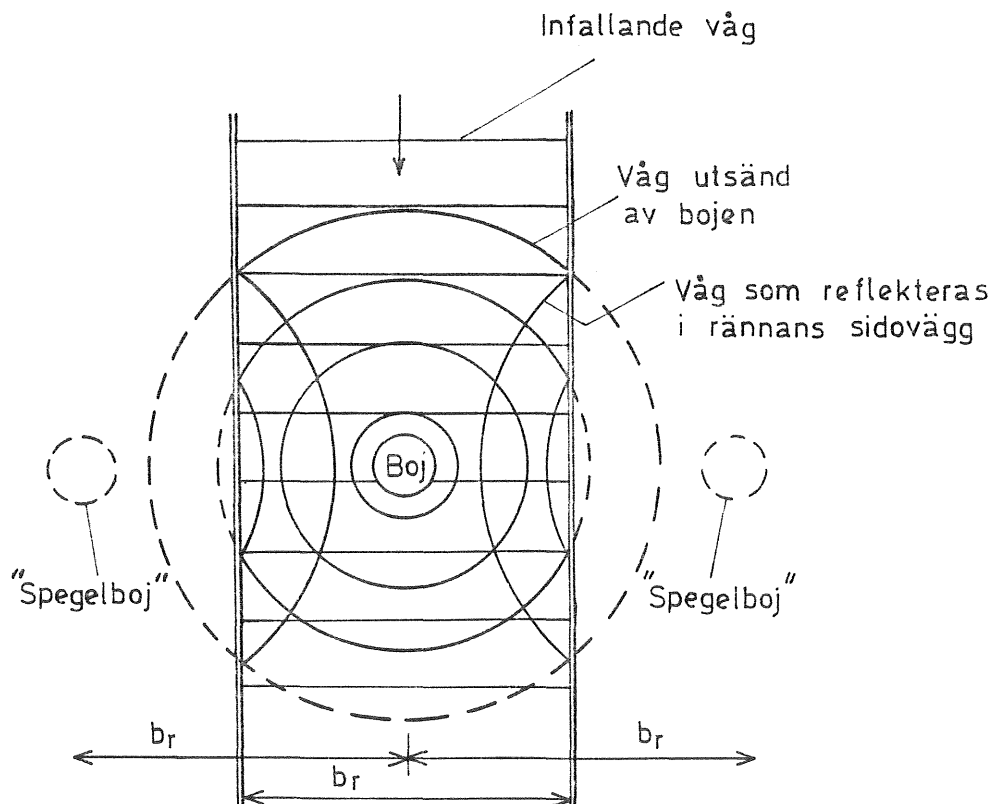
Försök med energiupptagning i regelbundna vågor i bassäng utförs. Därefter planeras försök med bojen i oregelbundna vågor med och utan energiupptagning. Försöken är för närvarande försenade på grund av oförutsedda igångkörningssvårigheter för en ny mät dator.

Förberedelser för de kommande försöken har genomförts. Datorprogram har gjorts för att direkt beräkna medelvärden av våghöjder, rörelseamplituder samt upptagen effekt vid försök i regelbundna vågor. Program för framställning av styrremor för våggenerator för oregelbundna vågor samt program för energiupptagning och frekvensanalys i dessa vågor har också utvecklats.

### 3.3 Rännbreddens betydelse för mätningarna.

När bojen svänger sänder den ut cirkulära vågor som överlagras på den infallande plana vågen. Dessa vågor reflekteras när de når rännans väggar och återkommer sedan till bojen där de alltså påverkar vågsituationen (se figur 3.5).

Mätningarna i rännorna och bassängen har utförts på ett sådant sätt att reflexionen i rännans längsled inte hinner fram till bojen innan varje mätning är slutförd. Däremot är rännornas bredd för liten för att man skall kunna undvika inverkan av reflexion i sidled vid försöken i regelbundna vågor. Genom att mäta tidigt i vågtågen har inverkan av reflexionerna undertryckts, dock utan att inverkan kunnat undvikas helt. I bassängen har mätningarna kunnat utföras utan någon inverkan av reflexion.

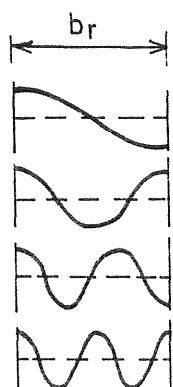


Figur 3.5 Schematisk bild som illustrerar de utsända vågornas reflexion i rännans sidor.

Vid egensvängningsförsöken har endast en och tre kvarts svängningsperiod utnyttjats vid utvärderingen. Vid varje mätningsslut har då endast en halv reflekterad våglängd passerat bojläget, och denna först anlända reflekterade våg har högst 15% av den utsända vågens amplitud.

Den största inverkan väntas uppträda då rännbredden är en multipel av en halv våglängd, dvs när stående vågor kan uppstå. Rännans bredd ( $b_r$ ) är 1.82 m och härur kan de kritiska frekvenserna beräknas, se tabell 3.3.

Tabell 3:3 Kritiska frekvenser för stående vågor i rännans tvärlängd. Rännbredd  $b_r = 1.82$  m.

	$\frac{b_r}{L}$	L	f
		(m)	(1/s)
	0.5	3.64	0.65
	1	1.82	0.93
	1.5	1.21	1.13
	2	0.91	1.31

Om man betraktar figur 3.5 inser man att reflexionerna i rännans sidled får samma inverkan som ett antal bojar i rad på öppet vatten om vågorna är tillräckligt långkammiga. Dessa "spegelbojar" ligger på en rännbredds avstånd från varandra.

### 3.4 Resultat

Modellförsöken har bekräftat att den teori för vågkraftbojen, som beskrivs i kapitel 2 kan användas för uppskattningen av bojens rörelser och energiupptagning i regelbundna vågor med tillfredsställande precision under förutsättning att de vid försöken erhållna koefficienterna för hydrodynamisk massa och dämpning används. Skall en boj användas som har en form eller ett normerat displacement avsevärt avvikande från de vid modellförsöken provade bojarnas bör nya modellförsök genomföras.

Det finns anledning att förmoda att den tillämpade linjära teorin även kommer att fungera väl i oregelbundna vågor eftersom olika branthet hos vågorna givit små skillnader i mätresultaten.

#### Hydrodynamisk massa och dämpning

Den hydrodynamiska massan och dämpningen har bestämts dels ur egensvängningsförsöken i ränna och bassäng, dels genom att välja värden på  $\mu$  och  $\epsilon$  så att de beräknade amplitudresponskurvorna ansluter sig väl till de uppmätta. En sådan anpassning är ganska lätt att utföra, eftersom  $\mu$  främst påverkar resonanstoppens läge

i sidled (resonansfrekvensen), och  $\epsilon$  främst påverkar höjden av resonansstoppen. Resultaten redovisas i tabell 3:4 och 3:5. Skillnaden är liten mellan de två metoderna.

I figur 3.6 redovisas en kurvanpassning för ett försök i bassäng utfört med en boj  $\varnothing$  300 mm med avrundade hörn och massan 11.5 kg. (boj typ II  $\hat{V} = 1,63$ ).

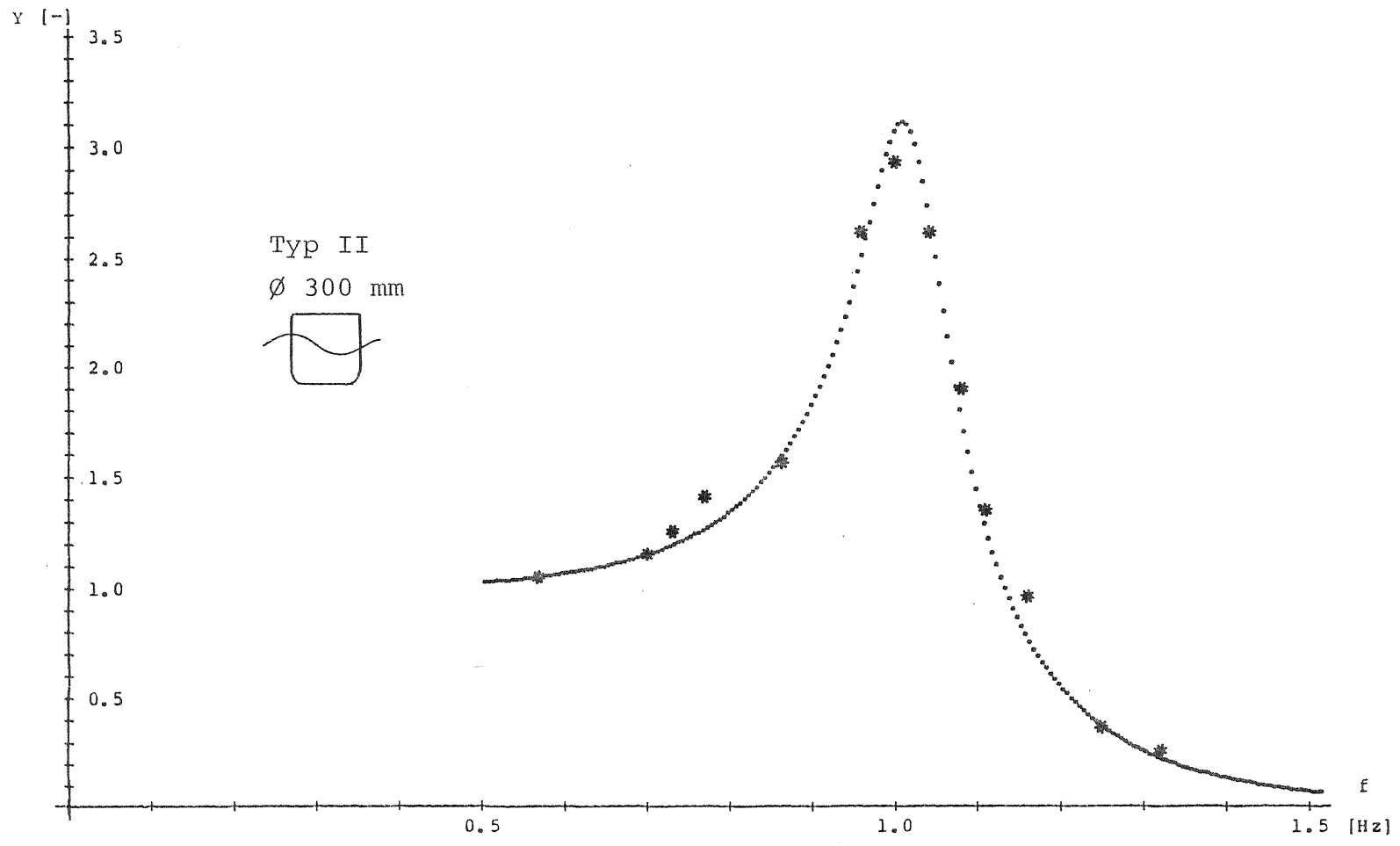
Tabell 3:4. Masskoefficienten  $\mu$  och dämpkoefficienten  $\epsilon$  vid resonans för olika försök utan dämpning.

Bojtyp	I			II			III		
Normerat displacement $\hat{V}$	0.78	1.20	1.63	0.78	1.20	1.63	0.78	1.20	1.63
Egensvängningsförsök ränna, bassäng $\varnothing$ 300 mm	$\mu$ 1.12	0.73	0.59	0.78	0.54	0.42	0.65	0.42	0.36
	$\epsilon$ 0.67	0.34	0.25	0.51	0.26	0.19	0.54	0.27	0.20
Anpassning till amplitud-responskurva bassängförsök $\varnothing$ 300 mm	$\mu$ 1.10	0.68	0.52	0.80	0.65	0.47	0.65	0.39	0.42
	$\epsilon$ 0.43	0.32	0.23	0.42	0.22	0.17	0.52	0.24	0.16
Egensvängningsförsök ränna $\varnothing$ 165mm	$\mu$	0.55			0.34			0.26	
	$\epsilon$	0.38			0.26			0.27	

Tabell 3:5 Uppmätt resonansfrekvens  $f_0 = \omega_0 / 2\pi$  (Hz) för de provade bojarna.

Bojtyp	I			II			III		
Normerat displacement $\hat{V}$	0.78	1.20	1.63	0.78	1.20	1.63	0.78	1.20	1.63
$\varnothing$ 300 mm mätt ränna och bassäng	1.22	1.08	0.98	1.34	1.15	1.04	1.40	1.21	1.06
$\varnothing$ 165 mm mätt ränna uppskalad till $\varnothing$ 300 mm		1.48			1.59			1.64	
		1.10			1.18			1.22	





Figur 3.6 Amplitudförhållande vid försök utan energiupptagning i bassäng

$\mu = 0.47$

$c = 692 \text{ N/m}$

$D = 0.181 \text{ m}$

$\varepsilon = 0.17$

$m = 11.5 \text{ kg}$

$b_1 = 0 \text{ Ns/m}$

En jämförelse mellan värdena på  $\mu$  och  $\varepsilon$  enligt tabell 3:4 och värdena enligt Havelock figur 2.3 ger vid handen att överensstämmelsen är dålig. En närmare diskussion över detta finns i Grupprapport 11.

De i tabell 3:4 angivna medelvärdena på  $\mu$  och  $\varepsilon$  har anpassats till funktioner av det dimensionslösa displacementet  $\hat{V} = V/(r^3\pi^2/3)$ . Funktionerna är av typen  $y = ax^b$ . Ett program för linjär regression har använts, i vilket funktionen först omvandlats till  $\ln y = \ln a + b \cdot \ln x$ . Funktionerna av typen  $y = a x^b$  visade sig ge bäst anpassning av de funktioner som undersökts i de tidigare utförda försöken i rännor och bassäng. I tabellerna 3:6 och 3:7 nedan ges konstanterna och korrelationskoefficienten för de anpassade ekvationerna för masskoefficienten respektive den dimensionslösa dämpkoefficienten.

Tabell 3:6 Konstanterna  $c_1$  och  $c_2$  samt korrelationskoefficienten  $r$  för funktionen  $\mu = c_1 \hat{V}^{c_2}$  för försök i bassäng med boj  $\emptyset$  300 mm.

Bojtyp	I	II	III
$c_1$	0.86	0.66	0.52
$c_2$	-1.01	-0.77	-0.72
$r$	-0.996	-0.961	-0.917

Tabell 3:7 Konstanterna  $c_3$  och  $c_4$  samt korrelationskoefficienten  $r$  för funktionen  $\varepsilon = c_3 \hat{V}^{c_4}$  för försök i bassäng med boj  $\emptyset$  300 mm.

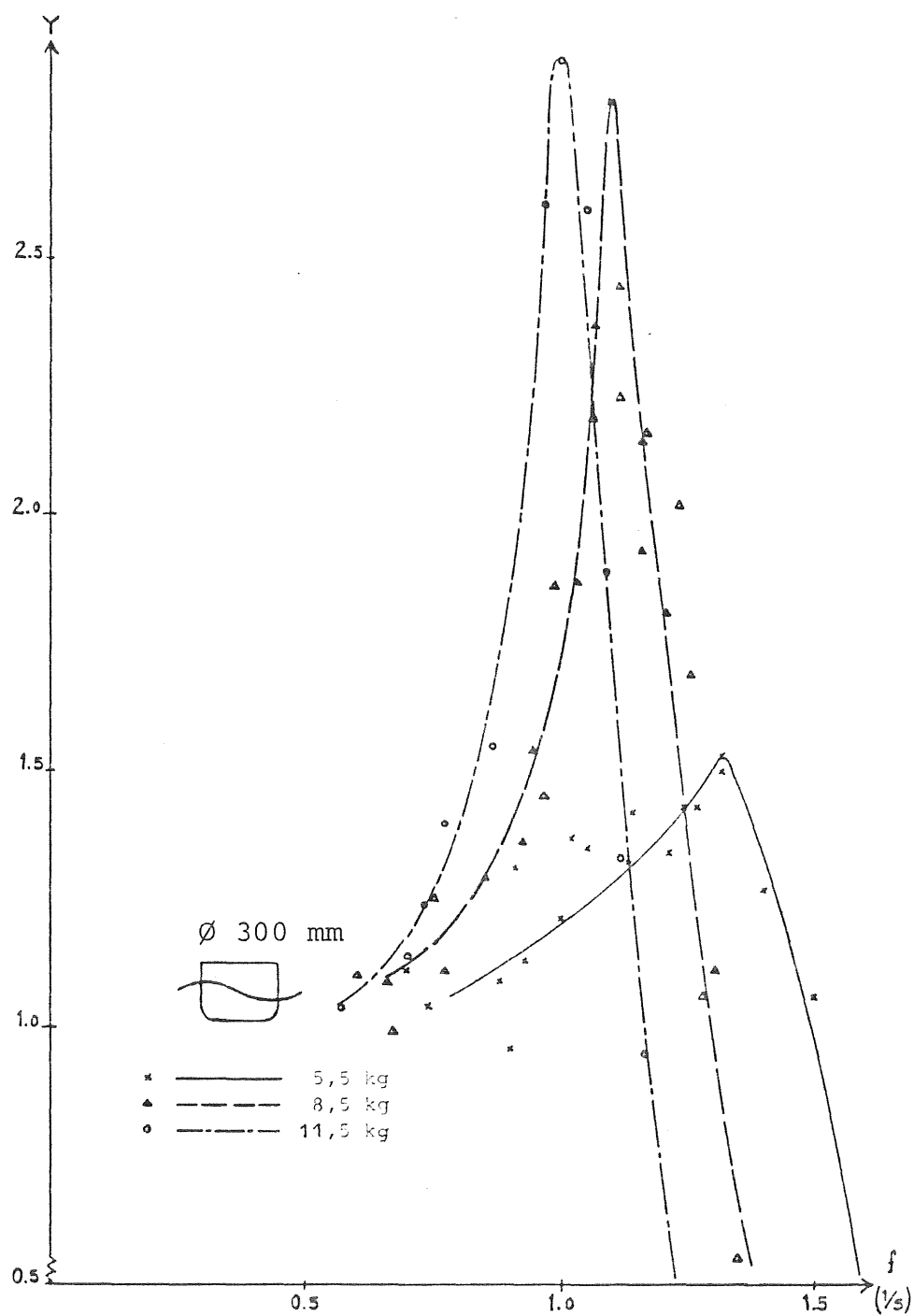
Bojtyp	I	II	III
$c_3$	0.41	0.33	0.36
$c_4$	-1.10	-1.30	-1.49
$r$	-0.929	-0.972	-0.982

### Skaleffekt

Som synes i tabell 3:4 kan man notera en viss inverkan av skalan för masskoefficienten  $\mu$ . För dämpkoefficienten  $\varepsilon$  har däremot ingen skaleffekt uppmätts. Trots olikheten i masskoefficienten har en god överensstämmelse för egenfrekvensen erhållits för de skalade frekvensvärdena enligt tabell 3:5.

### Amplitudresponsfunktionen

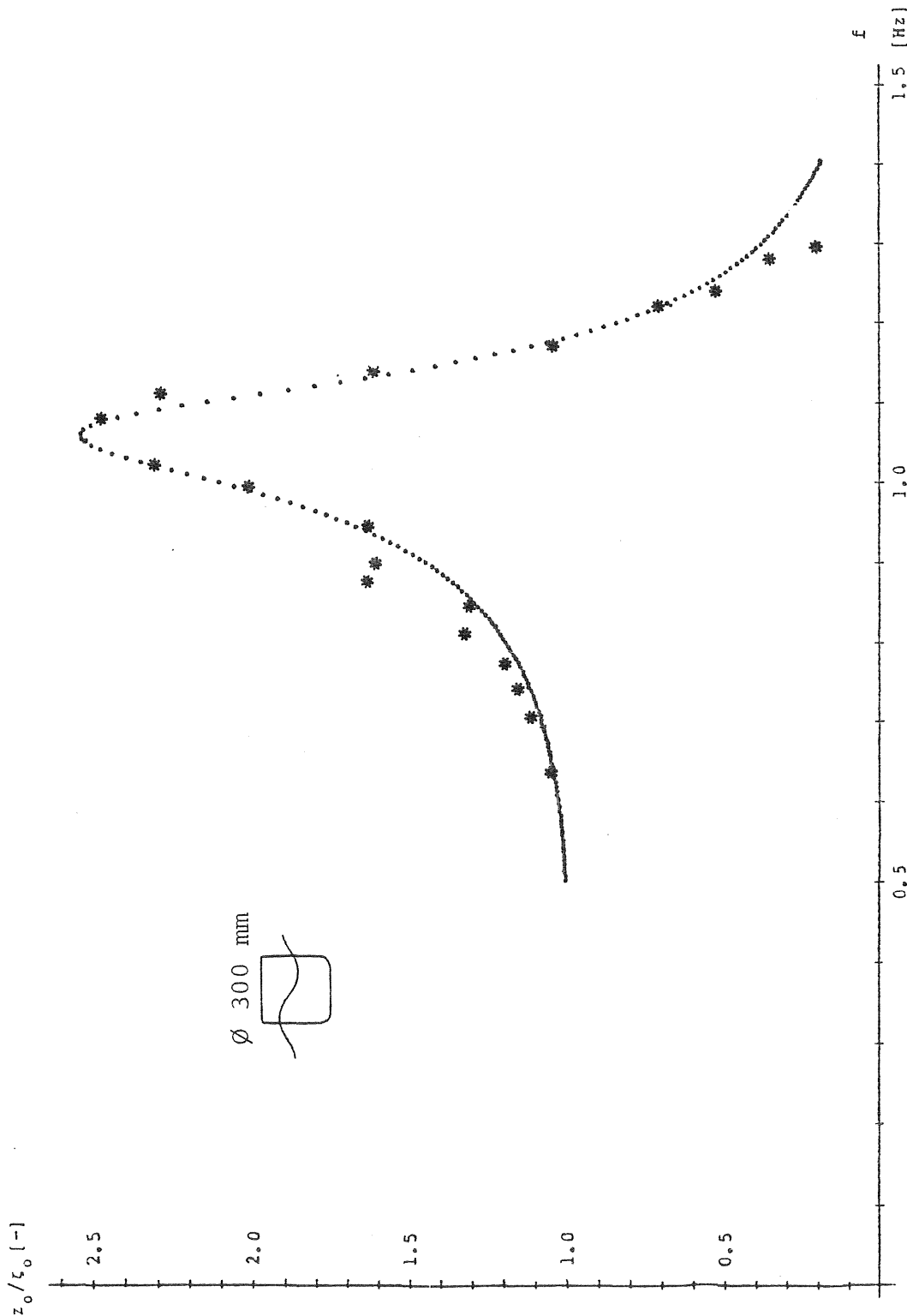
Exempel på uppmätta amplitudresponser visas i figur 3.7. Försöken är utförda i bassäng och kurvorna inpassade med ögonmått. Försöket med  $m=11.5$  kg är samma försök som redovisas i figur 3.6.



Figur 3.7 Uppmätt amplitudrespons  $Y$  som funktion av vågfrekvensen  $f$  för boj typ II med tre olika massor. Inprickade försöksvärden och kurvor inpassade för hand. Försök i bassäng.

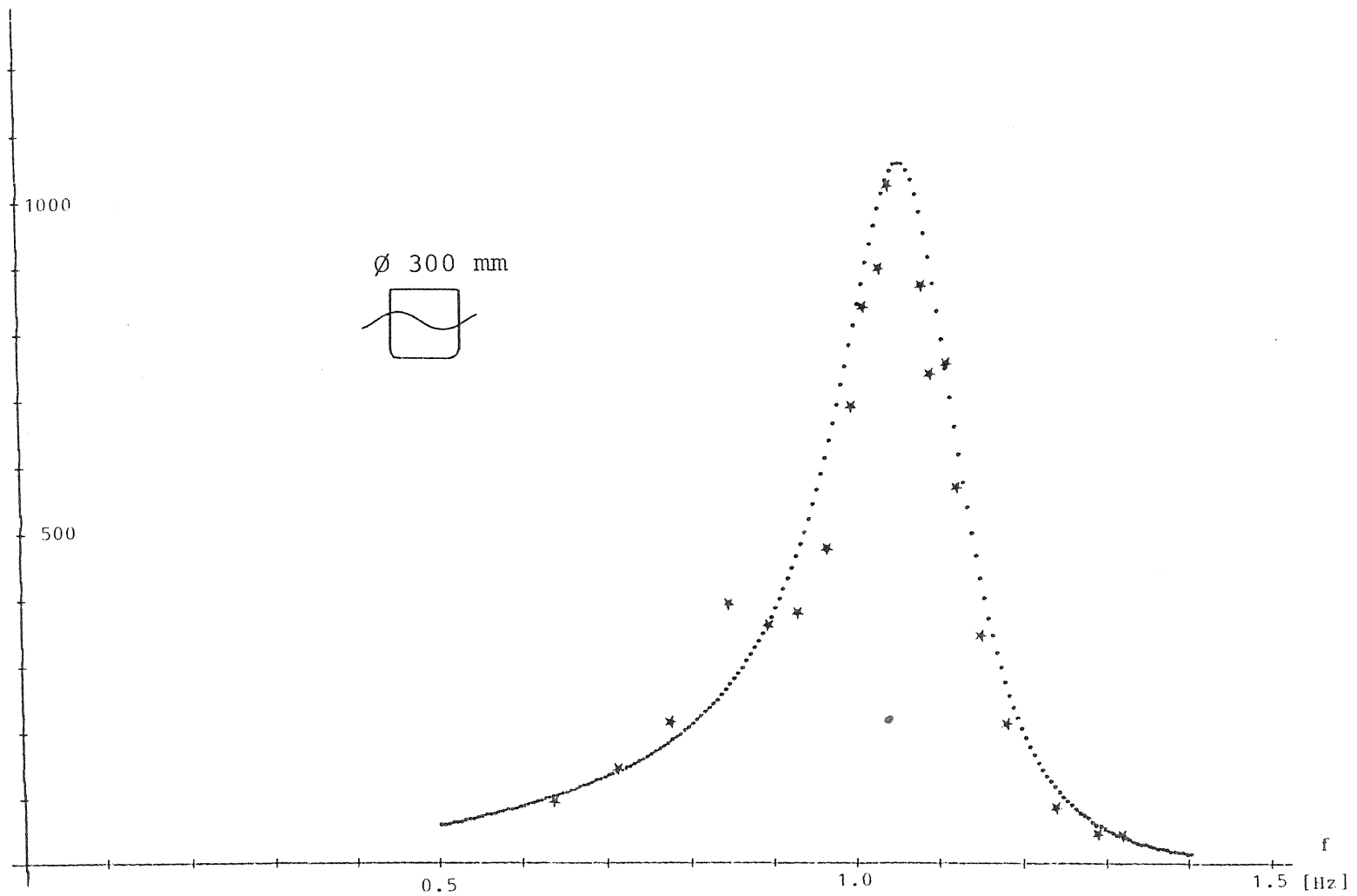
Energiupptagning

I följande figurer visas exempel på resultat för amplitudrespons (figur 3.8), normerad medeleffekt (figur 3.9) och hydrodynamisk verkningsgrad (figur 3.10) vid försök med den elektriska dämp-  
utrustningen i funktion. Försöken är utförda i en ränna med bredden 1.82 m och med bojtyp II,  $\varnothing$  300 mm. Övriga parametrar framgår av figurtexten.



Figur 3.8 Amplitudförhållande för mätserie 1  
( $b_1$  medel = 8.23). Försök i ränna.  
Teoretisk kurva (prickad) med följande värden på konstanterna:  
 $\mu = 0.33$        $c = 692$  N/m       $D = 0.181$  m  
 $\epsilon = 0.07$        $m = 11.5$  kg       $b_1 = 8.23$  Ns/m

$P_{med}/\zeta_0^2$  [W/m<sup>2</sup>]



Figur 3.9 Normerad medeleffekt för mätserie 1 ( $b_{1medel} = 12.10$ ). Försök i ränna.

Teoretisk kurva (prickad) med följande värden på konstanterna:

$\mu = 0.33$

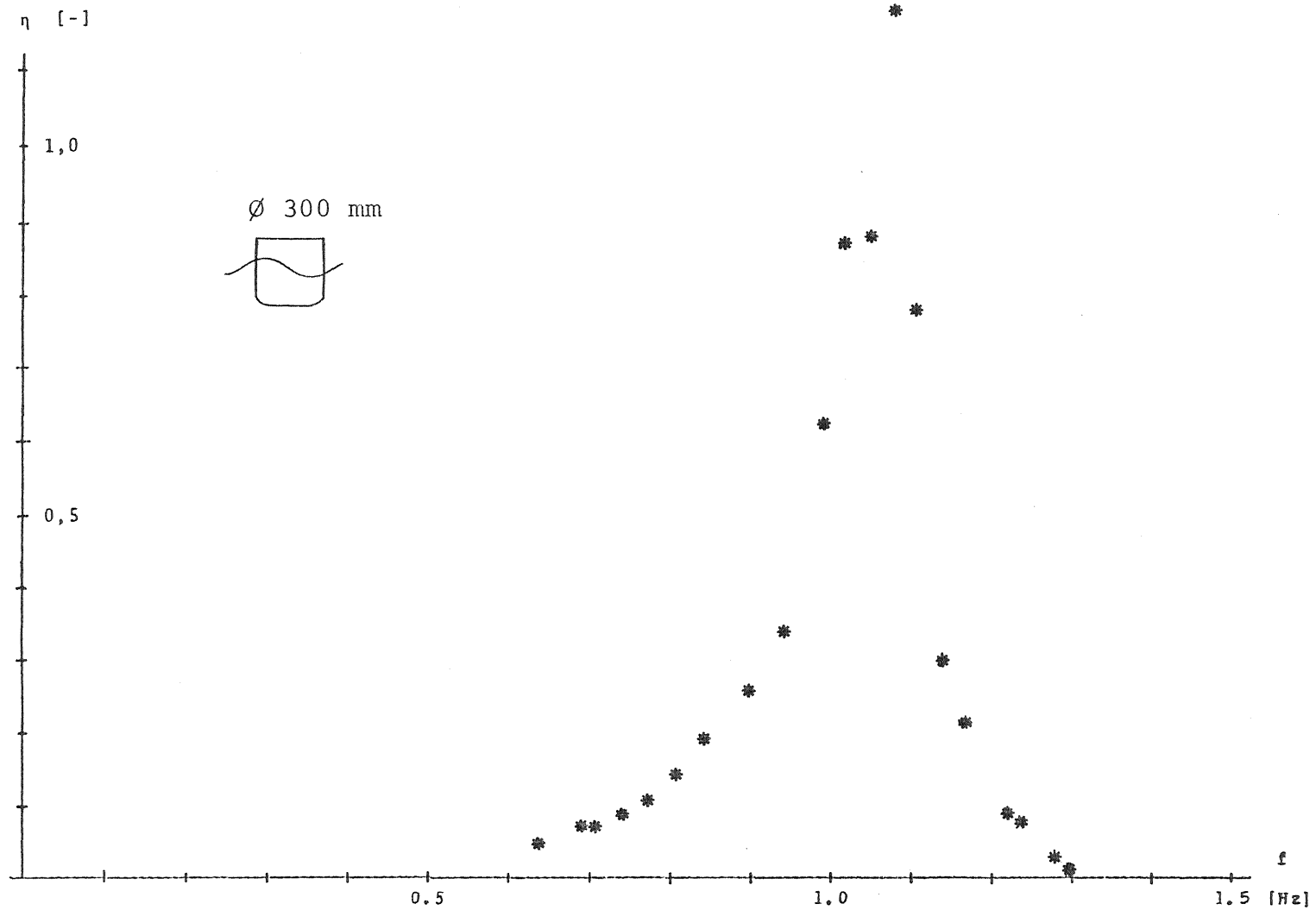
$c = 692$  N/m

$D = 0.181$  m

$\epsilon = 0.07$

$m = 11.5$  kg

$b_1 = 12.1$  Ns/m



Figur 3.10 Uppmätt verkningsgrad definierad enligt ekvation (3.17)  
 för mätserie 1 ( $b_{1\text{medel}} = 8.23$ ). Försök i ränna  
 $\mu = 0.33$   $c = 692$  N/m  $D = 0.181$  m  
 $\varepsilon = 0.07$   $m = 11.5$  kg  $b_1 = 8.23$  Ns/m

Observera de från tabell 3:4 avvikande värdena på  $\mu$  och  $\epsilon$ . Skillnaderna beror troligen främst på reflexioner i rännans sidor. En annan effekt av reflexionerna torde vara att verkningsgraden enligt figur 5.10 är över 100%. Detta kan endast inträffa för en rad av bojor eller bojor med artificiellt förskjutet resonansfrekvens enligt Budal och Falnes (1978).

En ordentlig verifikation på energiupptagning hos en enstaka boj på öppet vatten kan enklast erhållas med liknande modellförsök i den breda bassängen.

### Uppmätt interferens mellan bojarna

Den tidigare diskuterade interferensen mellan bojarna har tydligt kunnat iakttagas vid försöken i rännorna både med och utan energiupptagaren i funktion. I figur 3.11 redovisas försök från rännan där försöken drivits så länge att reflexion inträffat upprepade gånger mot rännans väggar och fortvarighetstillstånd uppnått. Av figuren framgår tydligt inverkan vid  $f = 0.93$  Hz som förutspåtts. I figur 3.12 visas ett motsvarande försök med energiupptagning, där inverkan också är tydligt märkbar. Vid detta försök har dock utvärderingen skett tidigare i vågtåget så att inverkan blivit måttligare. Reflexionerna har antagligen påverkat värdena för bojens energiupptagande förmåga.

### 3.5 Beräknade verkningsgrader

De vid försöken utan energiupptagning i bassäng uppmätta koefficienterna har nedan utnyttjats för att beräkna "verkningsgraden" hos några energiomvandlare av samma typ som de i försöken provade bojarna. Ekvation (2.27) har därvid använts.

I figurerna nedan visas exempel på verkningsgrader hos de använda bojarna. I figur 3.13 har verkningsgraden uppritats som funktion av den yttre dämpningen  $b_1$ . För varje bojtyp och vikt har den frekvens för vilken  $Y = Y_{\max}$  använts. Man kan lägga märke till att  $\eta_{\max}$  inträffar för  $b_1^{\max}$  och att verkningsgraden är måttligt känslig för variationer i  $b_1$ , om inte denna väljes för låg eller mycket för stor.

I figur 3.14 har verkningsgraden som funktion av frekvensen uppritats för modellvikten 5.5 kg ( $\hat{V}=0.78$ ) och alla tre bojtyperna. Dessa verkningsgradskurvor kan uppfattas som en transferfunktion mellan vågeffekten inom varje frekvensband och upptagen effekt, dvs

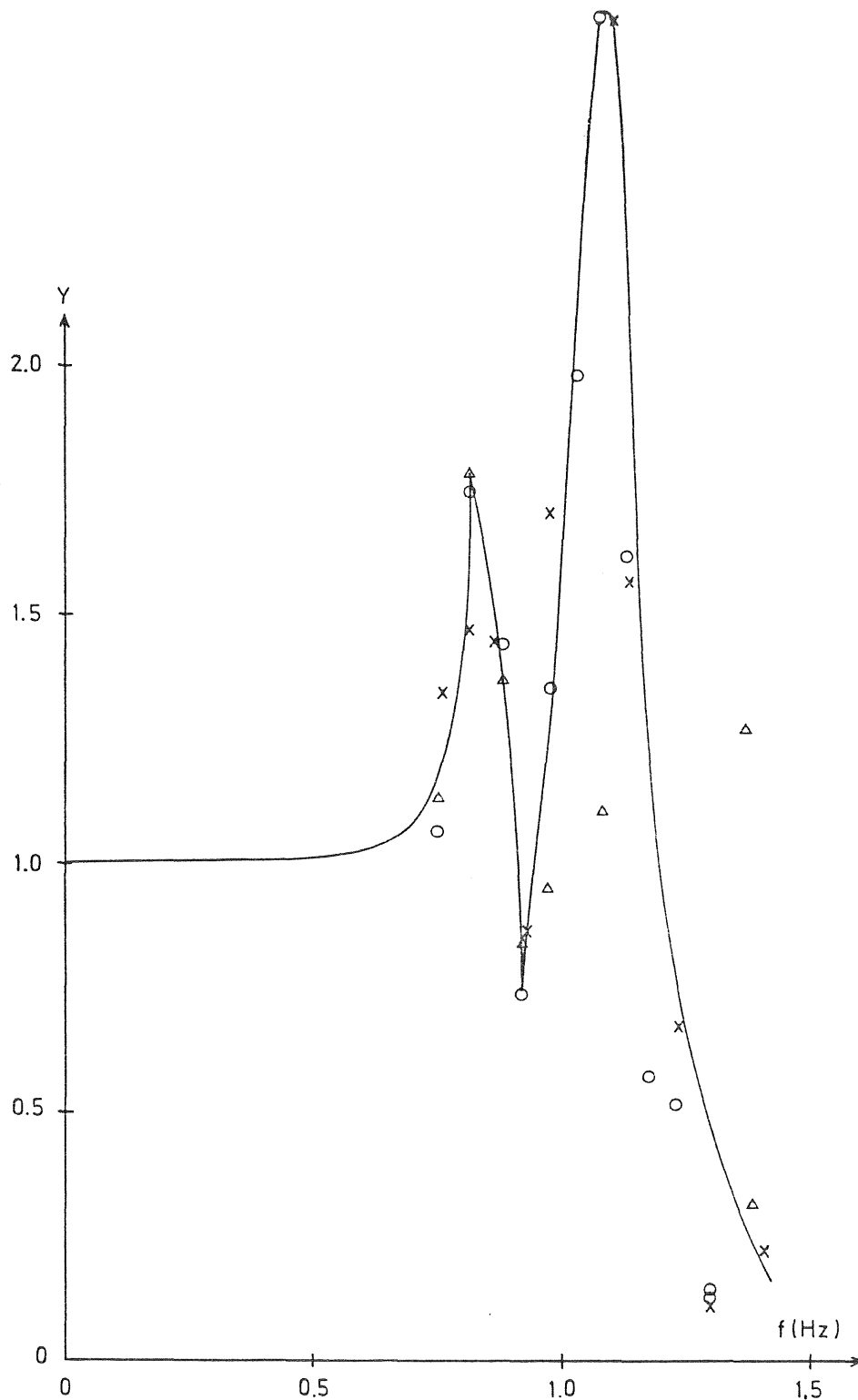
$$P_{\text{med}} = \int_0^{\infty} p_{\text{med}}(f) df = \int_0^{\infty} 2r \eta(f) p(f) df \quad \dots \quad (3.1)$$

Av figur 3.14 framgår att verkningsgraden för bojor med konstant yttre dämpning  $b_1$  är mycket känslig för frekvensändringar. Genom att reglera massan på något sätt för olika vågförhållanden skulle denna nackdel kunna kompenseras något.

En annan slutsats som kan dras ur figuren är att bojens kanter bör utföras avrundade. Skillnaden mellan bojtyp II och III är dock i detta avseende obetydliga. Om den direkt uppmätta amplitudresponser  $Y$  användes i ekvation (3.1) i stället

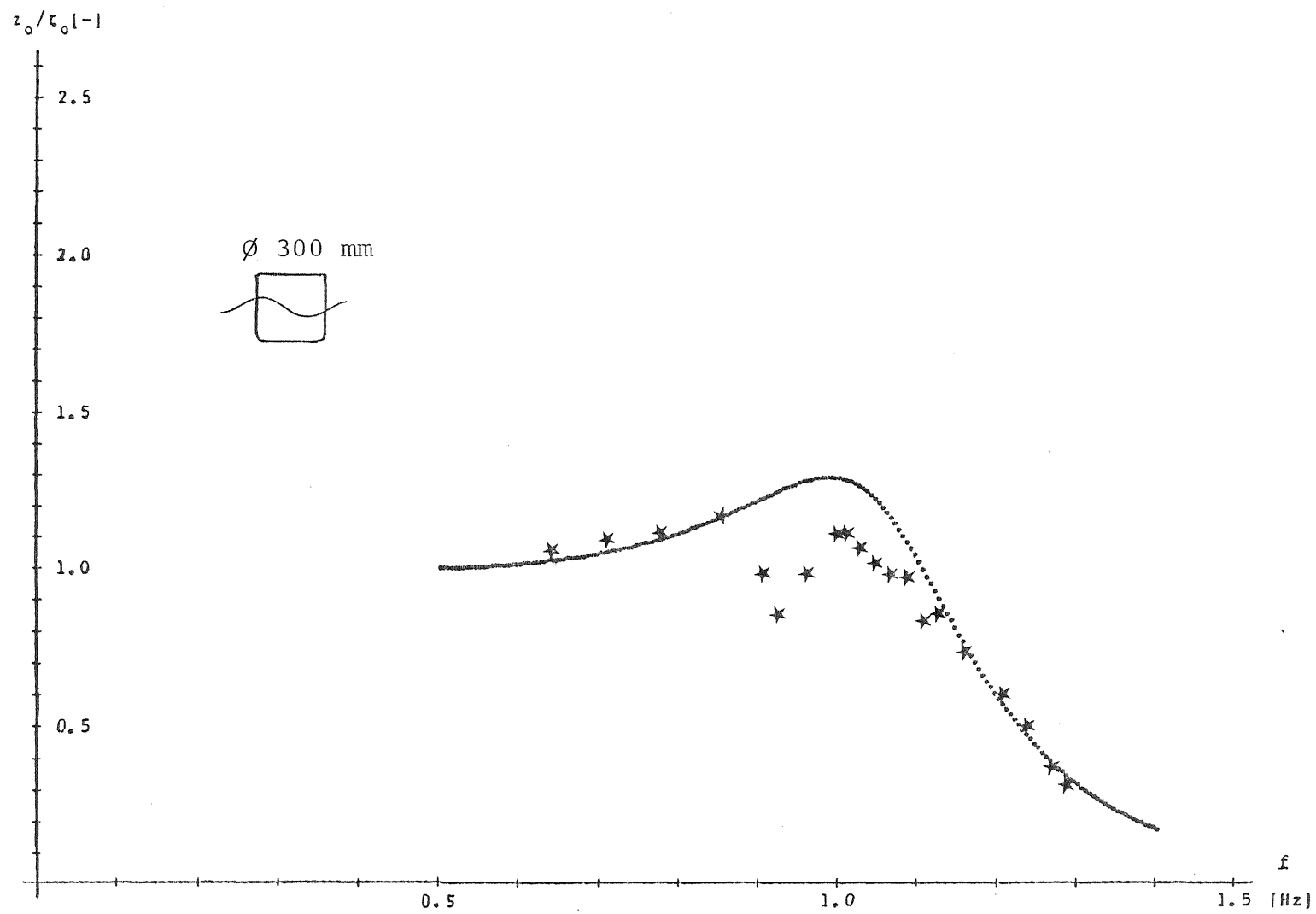
för den ur egensvängningsförsöken beräknade skulle skillnaden vara mindre.

För en noggrannare uppskattning bör försöken med energiupptagning i bassängen genomföras.



Figur 3.11 Uppmätt amplitudrespons  $Y$  som funktion av vågfrekvensen för en boj  $\varnothing$  300 mm i rännan där reflexionerna i sidled hunnit utbildas fullt.





Figur 3.12 Amplitudförhållande för mätserie 4 ( $b_{1\text{medel}} = 24.2$ ). Försök i ränna.

Teoretisk kurva (prickad) med följande värden på konstanterna:

$$\mu = 0.33$$

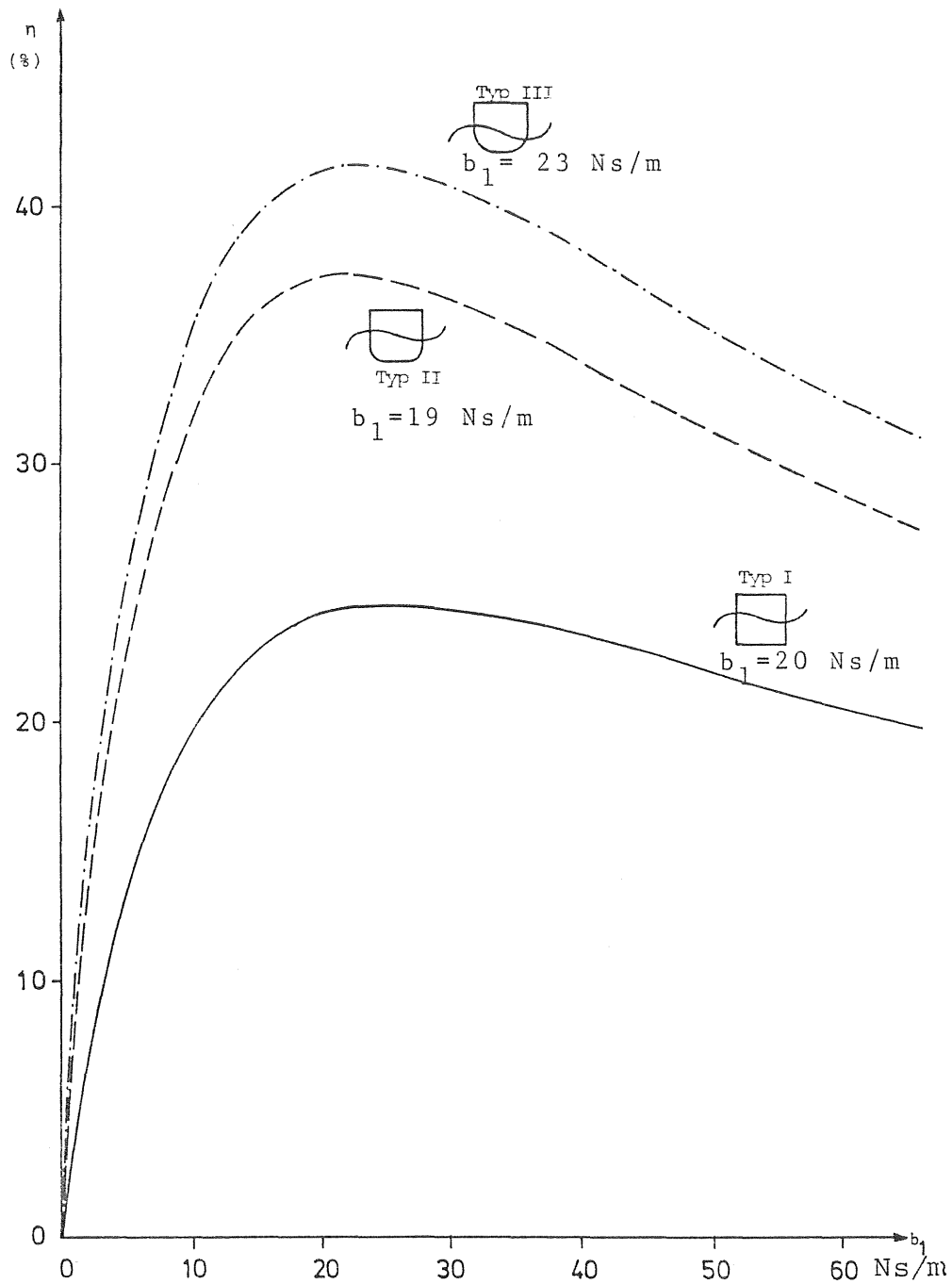
$$c = 692 \text{ N/m}$$

$$D = 0.181 \text{ m}$$

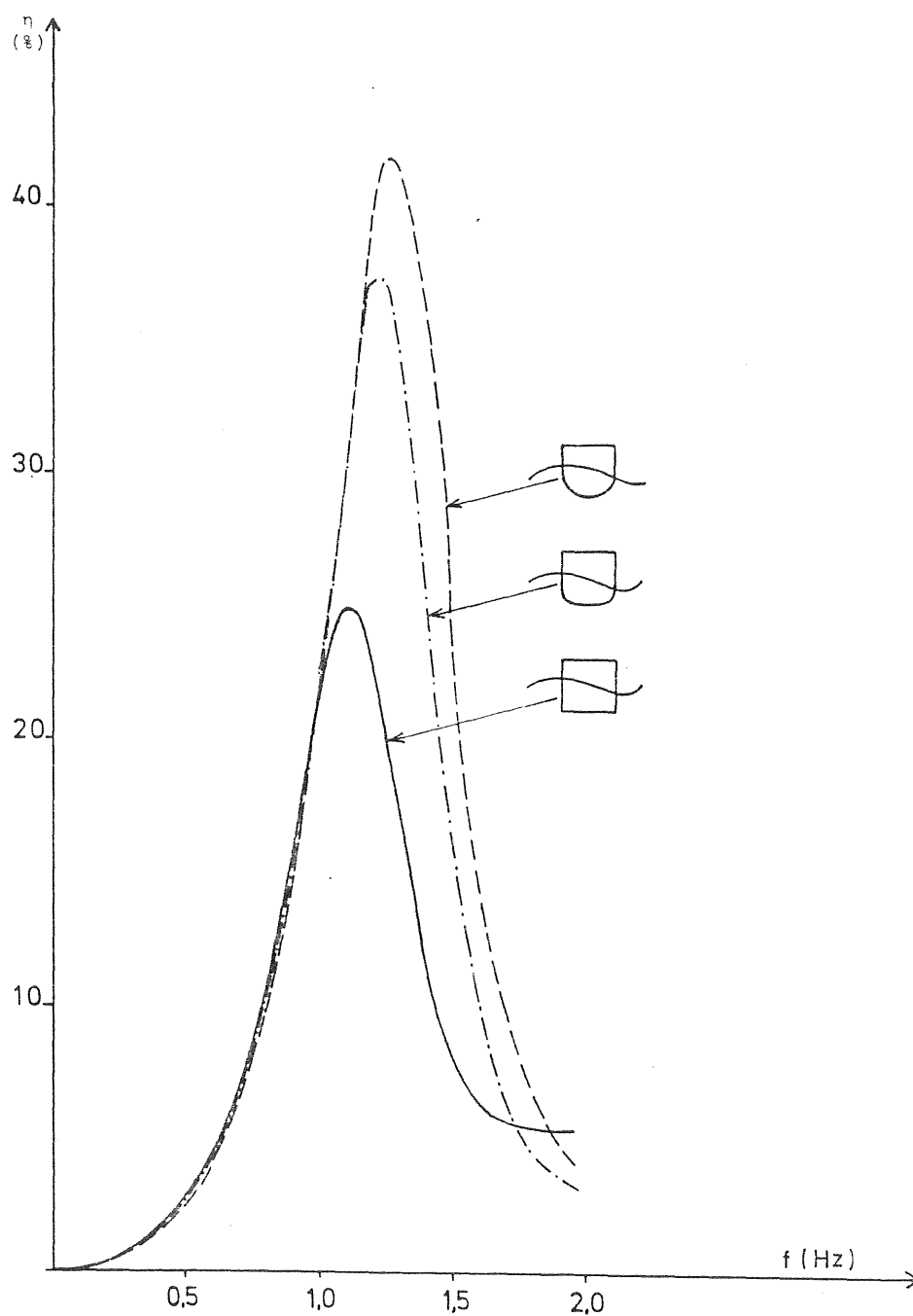
$$\epsilon = 0.07$$

$$m = 11.5 \text{ kg}$$

$$b_1 = 24.2 \text{ Ns/m}$$



Figur 3.13 Beräknad "verkningsgrad" som funktion av elektrisk dämpning för bojar med deplacementsvikten 5.50 kg och av olika typ vid respektive resonansfrekvens.  $\varnothing$  300 mm.



Figur 3.14

Beräknad "verkningsgrad" som funktion av frekvensen för deplacementsvikten 5.5 kg och olika bojtyper med yttre dämpning konstant lika med den vid resonansfrekvensen optimala:  $b_1 = b_0 = \epsilon \omega_0 m$ ,  $\varnothing$  300 mm.

4. MODELLFÖRSÖK I NATURLIGA VINDVÅGOR I SJÖN LYGNERN  
SAMT FUNKTIONSPROV I LABORATORIUM

#### 4. MODELLFÖRSÖK I NATURLIGA VINDVÅGOR I SJÖN LYGNERN SAMT FUNKTIONSPROV I LABORATORIUM

##### 4.1 Modellförsök i naturliga vindvågor i sjön Lygnern

###### Allmänt

Under sommaren och hösten 1978 genomfördes en rad försök med en modell av en vågkraftboj i sjön Lygnern. Syftet var att undersöka hur en vågboj med genomgående vertikal stång skall utformas för att överleva hårt väder.

Olika förankringssystem provades med bottenfast stång. Påkänningarna blev dock för stora i stången. Försöken ledde fram till ett arrangemang enligt figur 4.1. I stället för att ha stången bottenfast sattes en horisontell skiva i stången nedre ända. Skivans medsvängande vattenmassa gör att stången obetydligt svänger i vertikalled vid de aktuella frekvenserna i vågorna. Förankringen kan vid detta arrangemang fästas direkt i bojen, eventuellt via en förankringsboj.

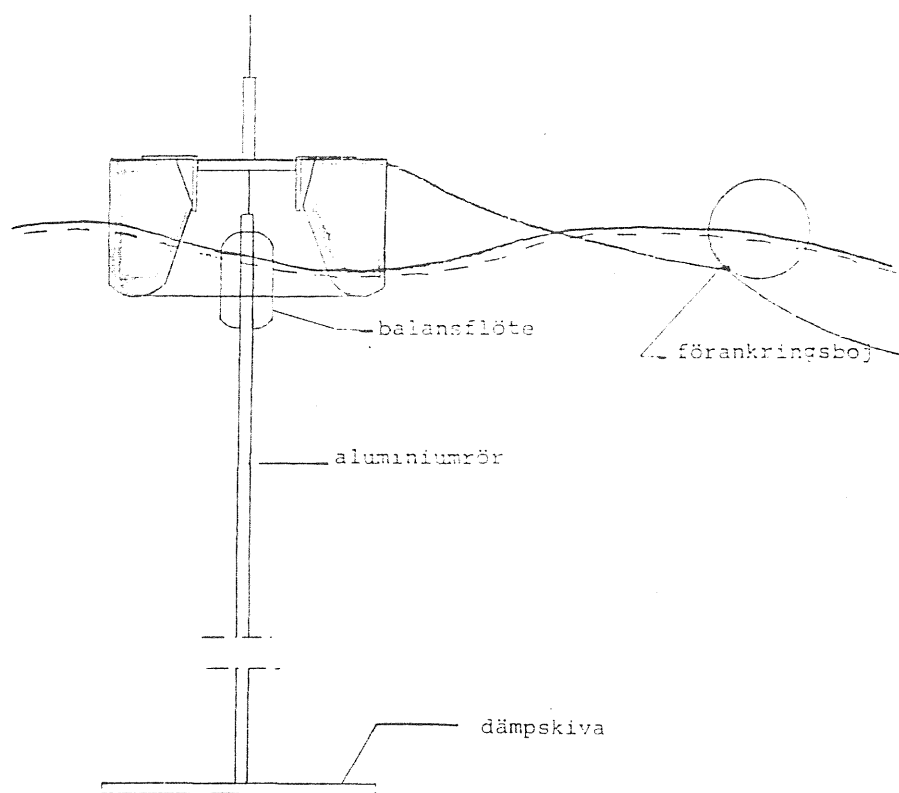


Fig 4.1

### Försöksplatsen

Sjön Lygnern valdes som försöksplats. Sjön är ca 20 km lång, 2-3 km bred (se figur 4.2) och ligger i riktning WSW-ENE, som även är förhärskande vindriktning. På grund av att sjön är lång och smal utan öar eller utskjutande uddar blir vågorna relativt ostörda. Dessutom kan man genom att flytta försöksplatsen i sjöns längdriktning erhålla olika vågförhållanden. Ett område med vattendjup kring 10 m, beläget på sjöns norra sida ungefär på mitten, valdes till försöksplats.

För att kunna sjösätta modeller och arbeta med dem i vatten byggdes en speciellt utformad flotte. Dessutom ställdes två mindre öppna båtar till förfogande. Båtarna användes i huvudsak till att lägga ut och ta in vågmätningstrustning. Under hösten placerades en barack vid stranden för mätutrustningen.

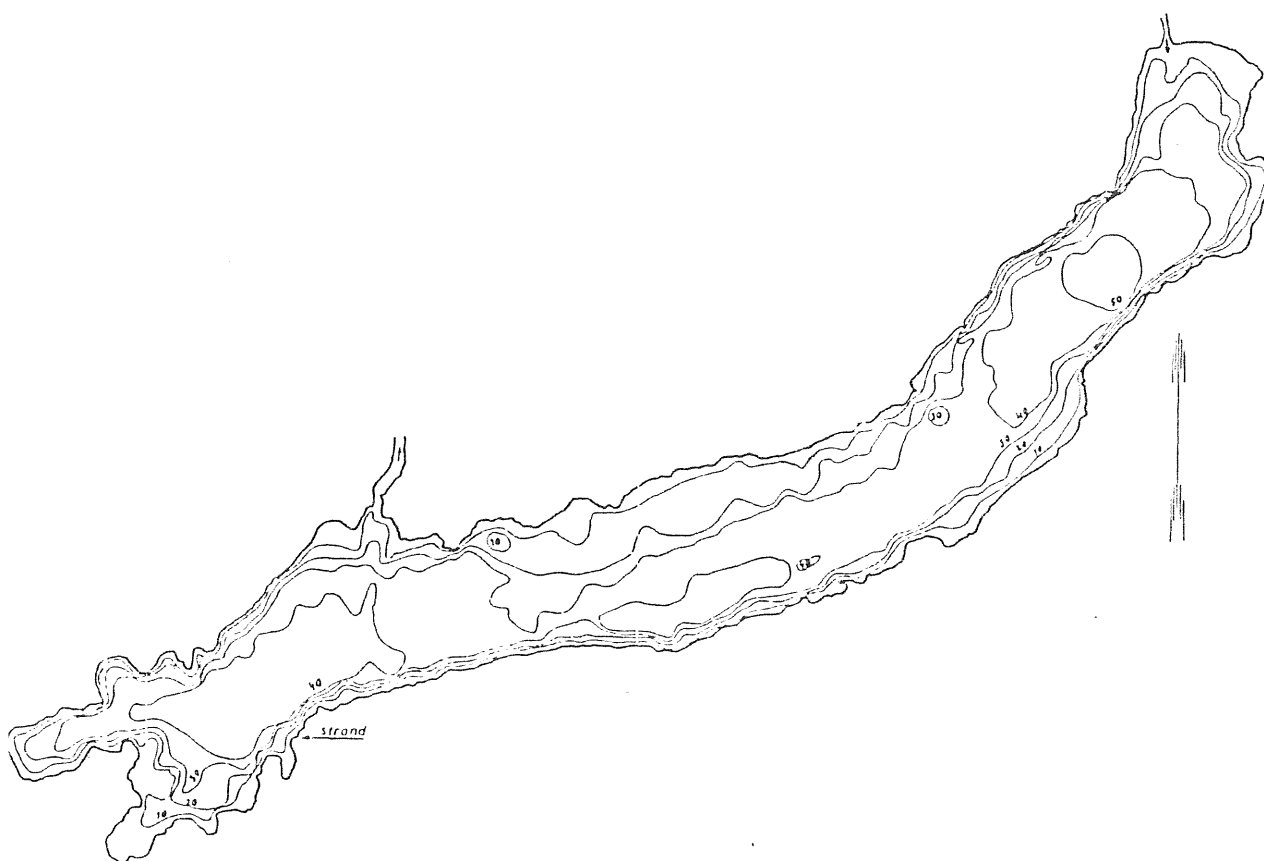


Fig 4.2 Karta över Lygnern med nivålinjer för vattendjup.

### Beskrivning av modellen

Idén bakom denna typ av kraftverk är att erhålla en relativrörelse mellan flytkropp och stång och med någon typ av energiomvandlare dämpa relativrörelsen.

I figur 4.3 visas den använda modellen. Flytkroppen är uppbyggd av bonocell och överdragen med glasfiberarmerad plast. I bojen finns åtta hål för barlastning med blyvikter. Som energiupptagande dämpanordning valdes en hydraulcylinder med strypbara bypassledningar, se figur 4.3. Hydraulcylinderns slaglängd är 600 mm och diametern är 40 mm. Hydraulcylindern är fäst vid flytkroppen via en kardansk upphängning, som tillåter stampning och rullning utan dämpning. I kolvstångens nederände skruvades ett rör fast via en kraftgivare. Avsikten var från början att mäta såväl kraft som hastighet hos kolven, men försöken övergick till att bli överlevnadsförsök. Olika arrangemang och förtöjningsätt provades.

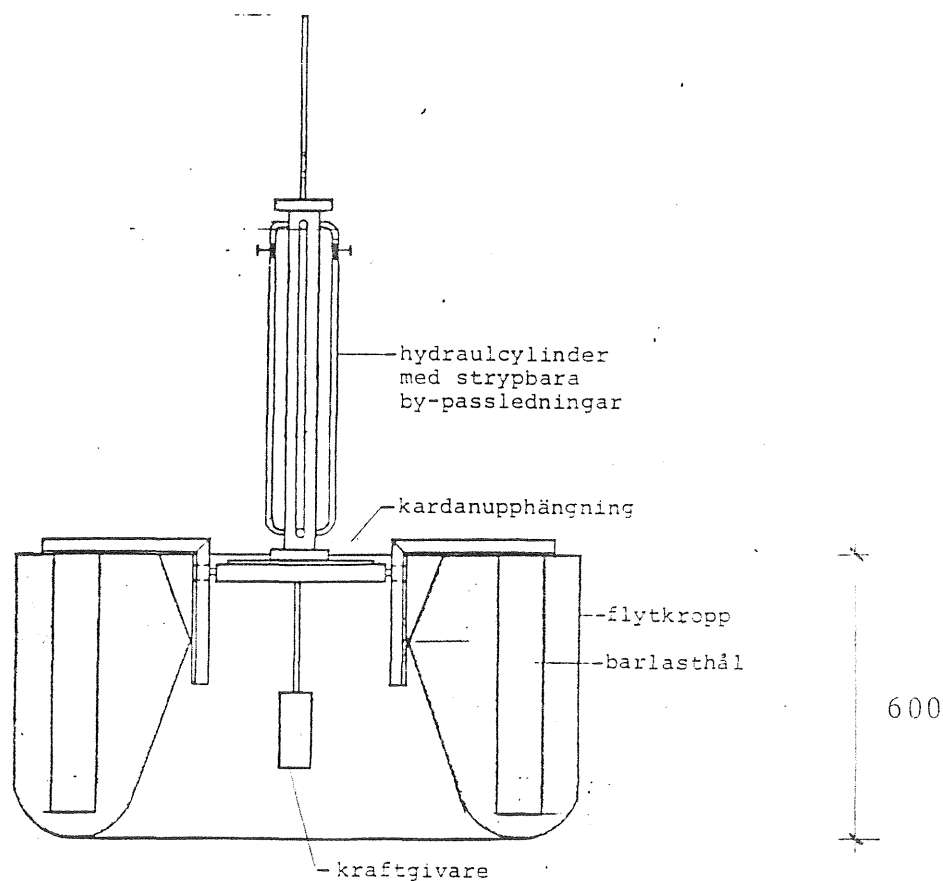


Fig 4.3

Sjöförsöksmodell

Diameter 1000 mm

Vikt under försöken 60 kg

### Provade arrangemang

I det första arrangemanget fästes kolvstången till ett bottenförankrat teleskoprör, (vilket utgjorde bojens enda förankring). Avsikten var att det övre röret skulle tvingas röra sig med lång egensvängningsperiod ( $\gg$ vågperioden) i det nedre röret.

Det övre röret försågs med ett balansflöte för att hållas i ett nolläge. På grund av bojens avdrift vid hård vind slogs balansflötet sönder på insidan bojen.

För att motverka avdriften förankrades det övre röret horisontellt i tre riktningar strax under balansflötet. I och med denna förankring uppstår stora böjmoment i infästningen till kolvstången vid hård vind.

För att komma bort från problemen vid bottenförankring övergick vi till ett "svävande" system enligt figur 4.1.

### Resultat

Modellen låg ute under fyra dygn och blev utsatt för en ordentlig SW-kuling. Inga mätningar gjordes på modellen, däremot filmades den i hård vind. Vågmätningarna visade att  $H_s \approx 0.4$  m och  $T_z \approx 2$  sekunder. Rör/skivasystemet svängde vertikalt med vågfrekvensen och med en amplitud på 5-10 cm. Genom att öka skivans yta bör man kunna minska denna svängning markant. Systemet i övrigt fungerade tillfredsställande.

Denna utformning av systemet detaljstuderades under vintern 1978-79 i en djup laboratoriebasäng.

En fördel ur överlevnadssynpunkt erhålles med detta arrangemang. Eftersom vågrörelsen avtar med djupet för att bli obetydlig vid ett djup lika med halva våglängden, kommer rörlängden att bestämma hur stor relativrörelsen mellan flytkropp och skiva blir för olika våglängder. I storm är såväl våghöjd som våglängd stora, varigenom vågrörelsen ovan skivan påverkar denna. Relativrörelsen blir dock mindre än våghöjden.



## 4.2 Funktionsprov i laboratorium

### Avsikt med försöken

Resultaten från försöken i sjön Lygnern redovisade i föregående kapitel har lett till en vidareutveckling av modellbojen. Försöken har avsett en optimering och funktionskontroll av systemet samt att få fram en verkningsgrad för maskineriet. Detta arbete har pågått under vintern 1978-79 i skeppshydromekaniklaboratoriets dyktank.

Med hjälp av den från dyktanksförsöken framräknade verkningsgraden för maskineriet kan man sedan beräkna bojens verkningsgrad (hydrodynamisk verkningsgrad).

$$\eta_{\text{boj}} = \frac{P_{\text{ut}}}{P_{\text{in}} \eta_{\text{mask}}}$$

$P_{\text{ut}}$  = uppmätt effekt från generator

$P_{\text{in}}$  = beräknad infallande vågeffekt

$\eta_{\text{mask}}$  = verkningsgrad hos maskineriet

### Modellboj med generator

Slutligt utseende se figur 4.5, sid 4:7.

För försöken utbyttes det dämpande hydraulsystemet mot en likströmgenerator med tachometer (varvtalsräknare). Härmed kan man direkt mäta utgående effekt samt variera den yttre dämpningen.

Centrumstången försågs med två linor löpande runt två motvända frihjul på generatorns axel, se figur 4.4, för att på så sätt erhålla en likriktad roterande rörelse.

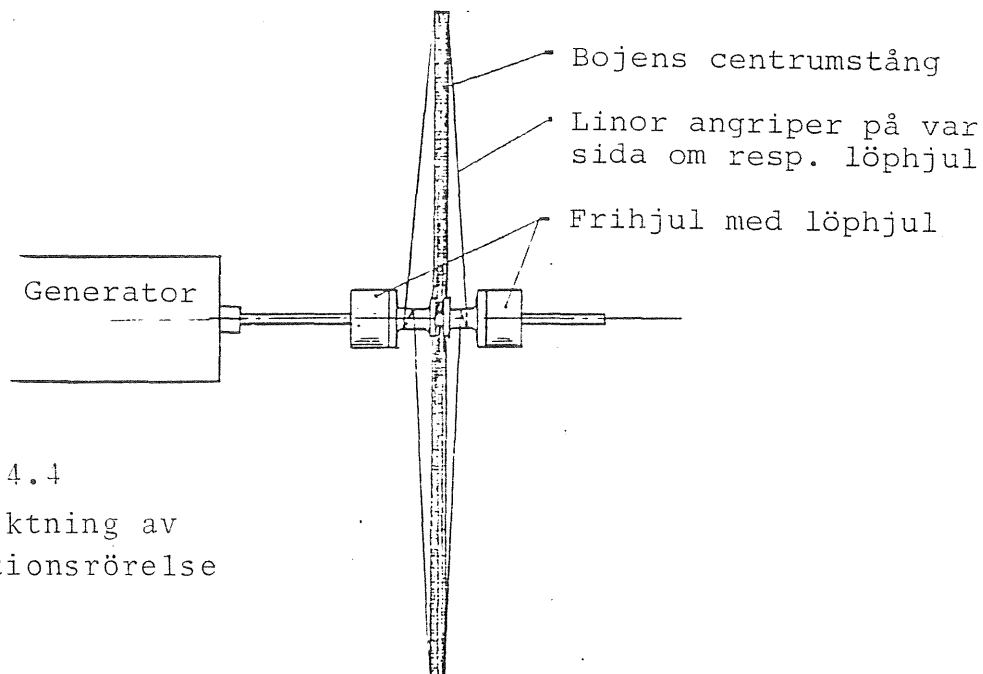


Fig 4.4

likriktning av  
rotationsrörelse

Systemet fungerade i princip men slitaget på löphjul och linor blev stort p g a att linan "klättrade" upp på sig själv på löphjulet. En plastad lina provades men resultatet blev detsamma efter några körningar.

Idén med den likriktade rörelsen frångicks, och systemet ersattes med ett enkelt remkugghjul och en kuggrem. Det visade sig senare, att likriktningen av rörelsen ej hade någon betydelse för bestämning av verkningsgraden.

För att undvika att remmen slirade på kugghjulet monterades ett stödhjul på utsidan kuggremmen, vilken enbart griper med en kugge åt gången.

Centrumstången  $\emptyset$  45 mm av aluminium försågs med ny dämpskiva av plast. Stången balanserades ut med hjälp av flytkroppar, som placerades en bit ned på stången.

Vid provkörning av systemet visade det sig att stången hade en tendens att "klättra" nedåt. Orsaken till detta var förmodligen, att friktionskrafterna var större då bojen rörde sig nedåt än då den rörde sig uppåt. Deplacementökningen som erhöles då stången sänktes var ej tillräcklig för att återföra den till jämviktsläge. Övre delen av stången ersattes då med ett grövre rör med  $\emptyset$  60 mm. Stången blev nu stabil i sitt jämviktsläge under körning. För försöket i Lygnern ökas diametern till 80 mm. Detta för att ytterligare säkerställa ett jämviktsläge.

Bojens deplacement var vid försöken 90 dm<sup>3</sup>.

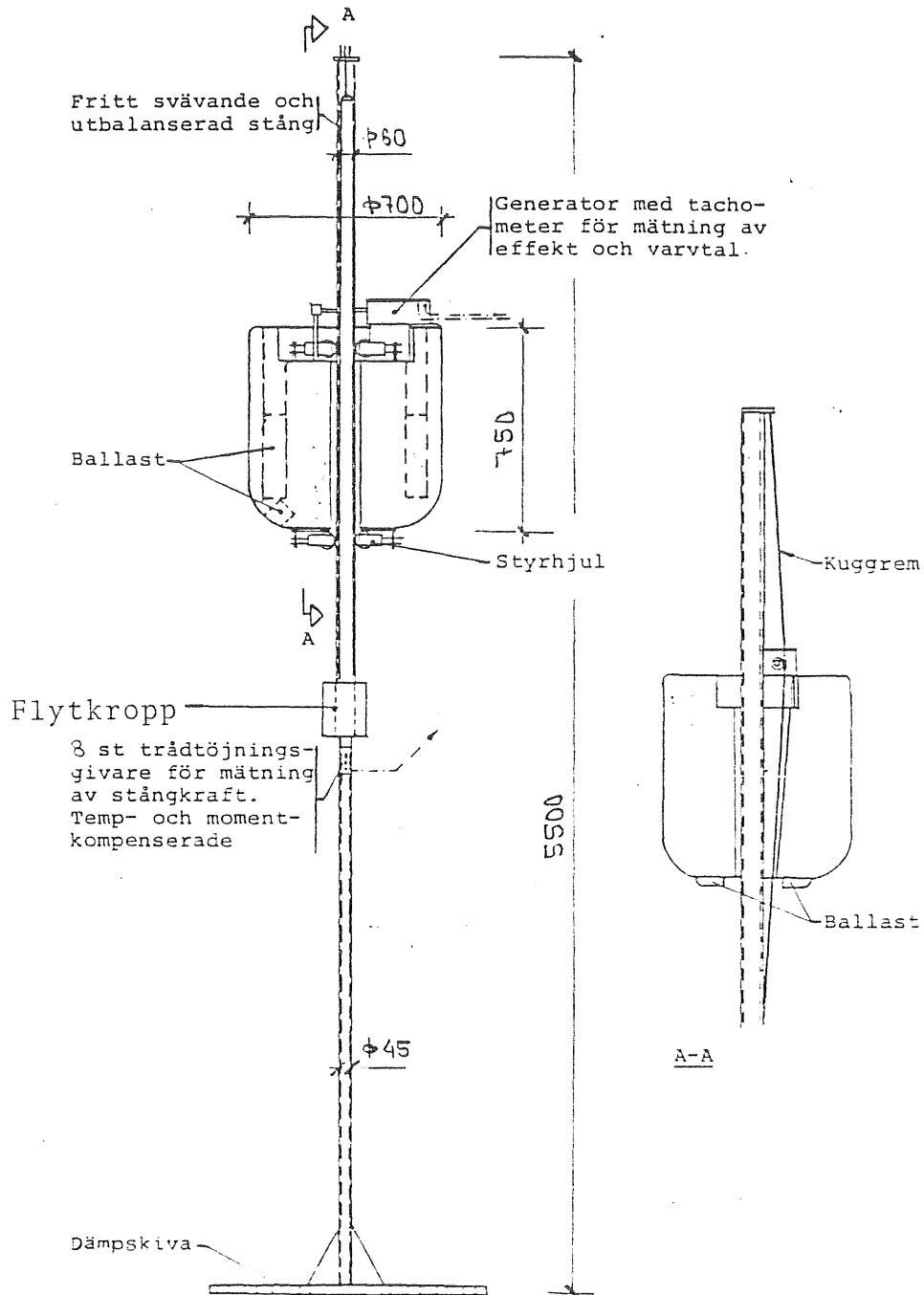


Fig 4.5

Slutligt utseende på modellboj

### Försöksuppställning

Eftersom några vågor ej kan göras i dyktanken försågs bojen med två hävarmar över en vagga till ett svänghjul och en motor, figur 4.6. Svänghjulet är försett med en löpskena, så att amplituden kan varieras. Med hjälp av en variator på motorn kan frekvensen varieras.

Rörelsen hos bojen blir ej sinusformad eftersom vevstaken har en begränsad längd och variatorn har ett glapp.

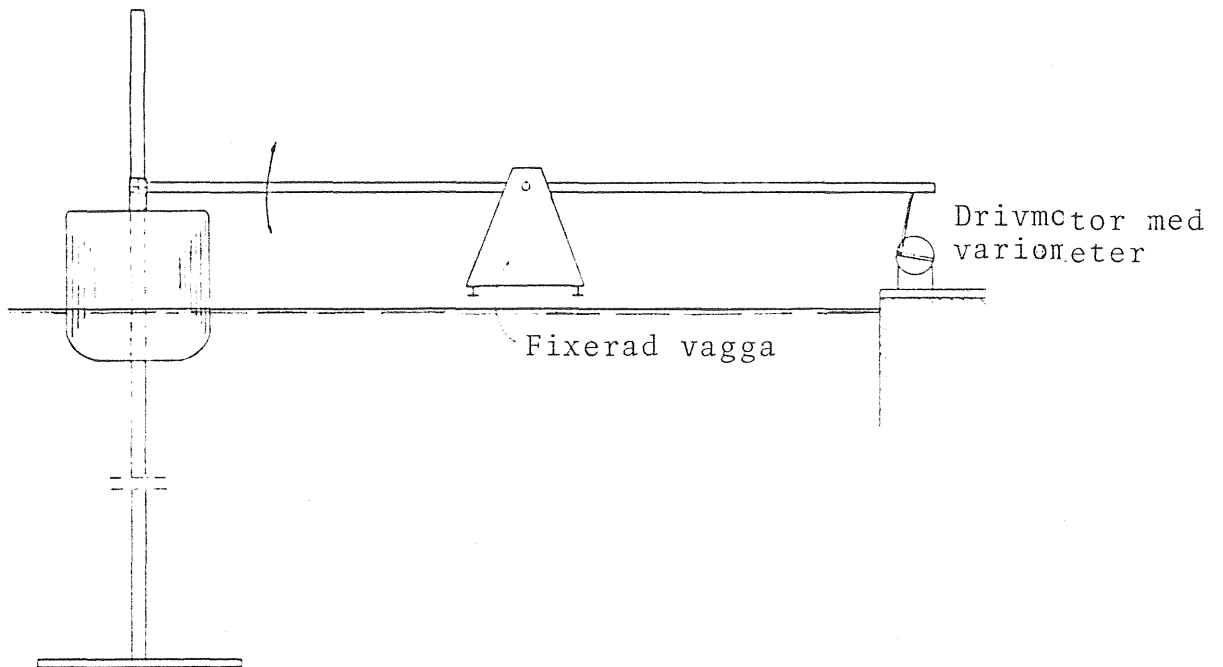


Fig 4.6 Försöksuppställning

#### Mätutrustning

Vid försöken mättes:

Spänningen och strömmen från generatorm (effekt)

Varvtal hos generatorm

Kraften i centrumstången

Spänningen och strömmen gav via en analog multiplikator det momentana effektuttaget.

Varvtalet mättes med en tachogenerator på generatoraxeln.  
(Varvtalet motsvarar relativhastigheten).

Kraften i stängen mättes med hjälp av trådtöjningsgivare.

De tre signalerna registrerades på en trekanalskrivare, se figur 4.8, och parallellt med denna gick signalerna till en förstärkare och frekvensomvandlare för vidare behandling, se figur 4.7.

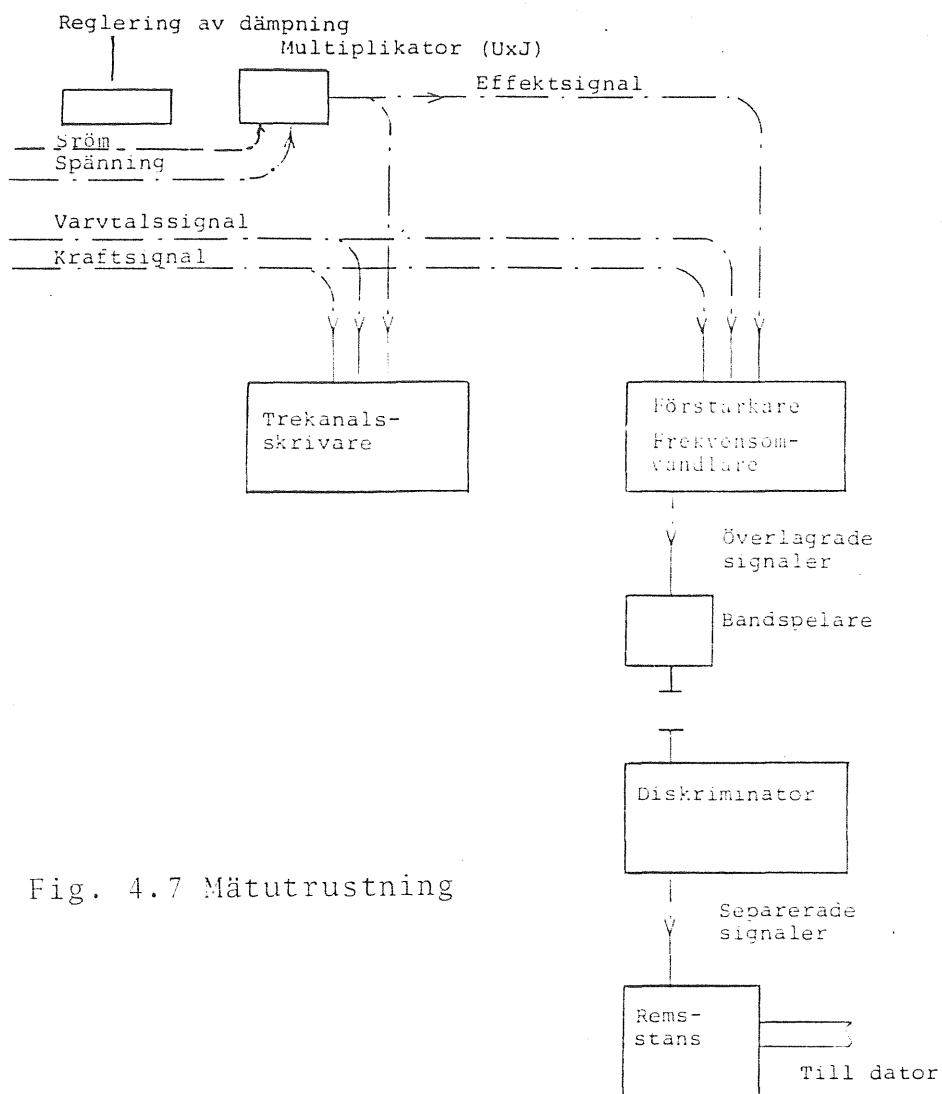


Fig. 4.7 Mätutrustning

### Försök och resultat

För att få ett så representativt resultat som möjligt genomfördes ett antal försöksserier med 3 olika amplituder (6-12 cm), 5 olika frekvenser samt 4 olika dämpningar.

Under försöken studerades plattans rörelser. Man kunde konstatera att plattans vertikala svängningsamplitud minskade vid högre frekvenser. Amplituden uppskattades i försöksserien till 0.3 av bojampplituden. Försöken har delvis filmats.

Avsikten från början var att utvärdera försöken med dator, men eftersom kraft, hastighet och effekt i stort sett var i samma fas, se fig 4.8, har utvärderingar gjorts för hand. Beräkningarna är baserade på samtida värden. Att använda toppvärden påverkar ej beräkningen av verkningsgraden.

Verkningsgraden för maskineriet är definierad som

$$\eta_{\text{mask}} = \frac{P_{\text{ut}}}{F_s \cdot v}$$

$P_{\text{ut}}$  = effekt från generatorm (W) exkl kabel-förluster

$F_s$  = Kraften i stången (N)

$v$  = Relativhastighet mellan stång och boj (m/s)

Dämpningen reglerades m h a ett variabelt motstånd.

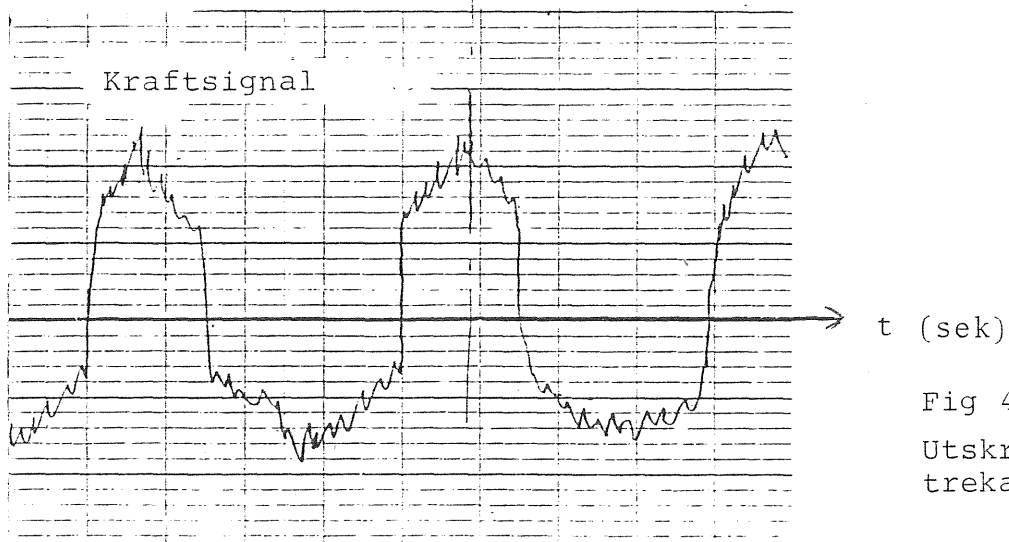
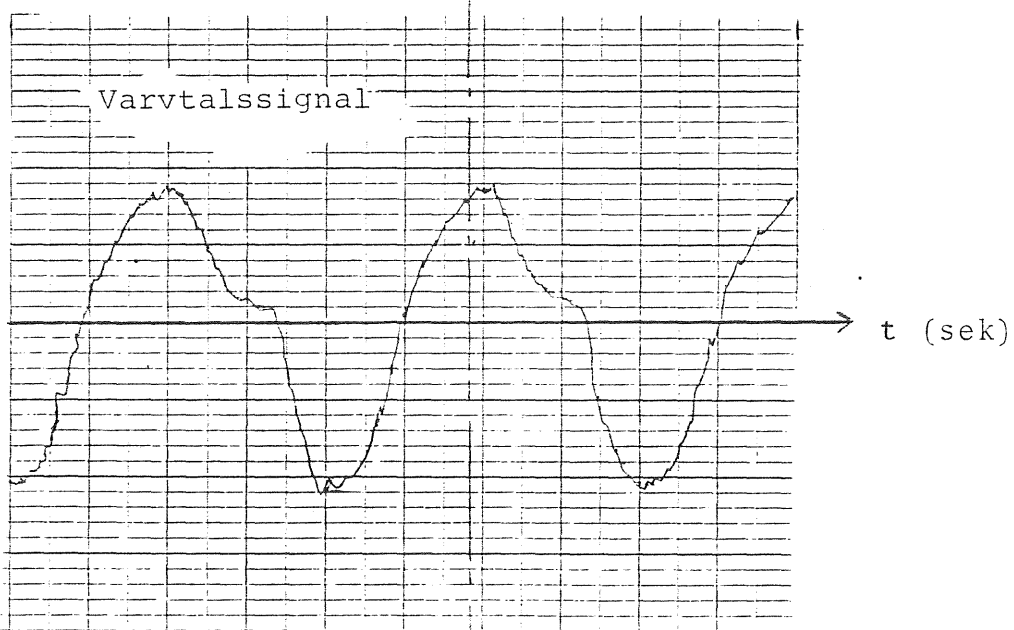
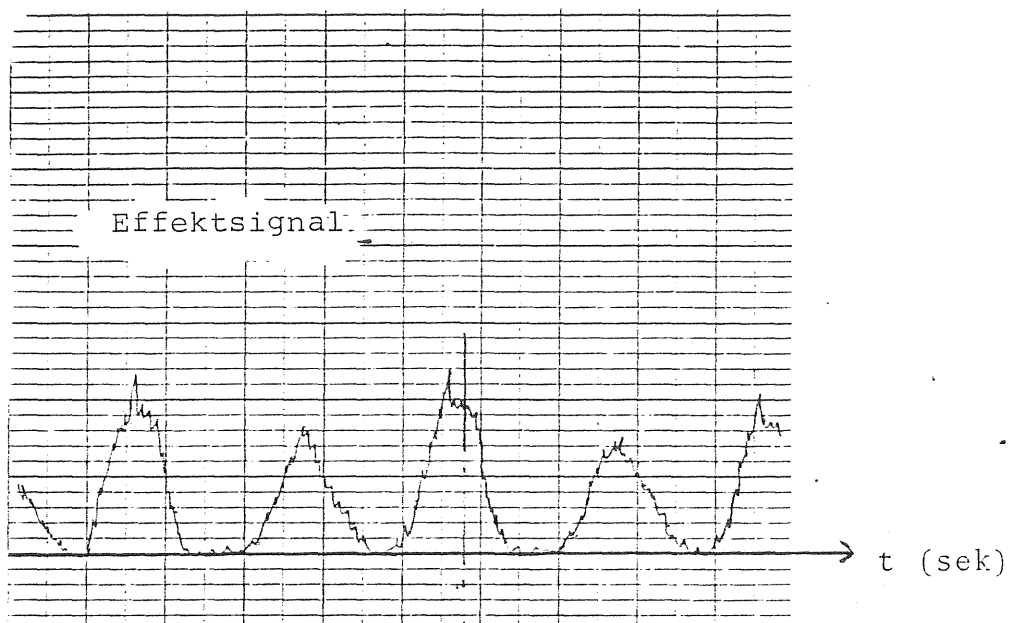


Fig 4.8  
Utskrift från  
trekanalsskrivare

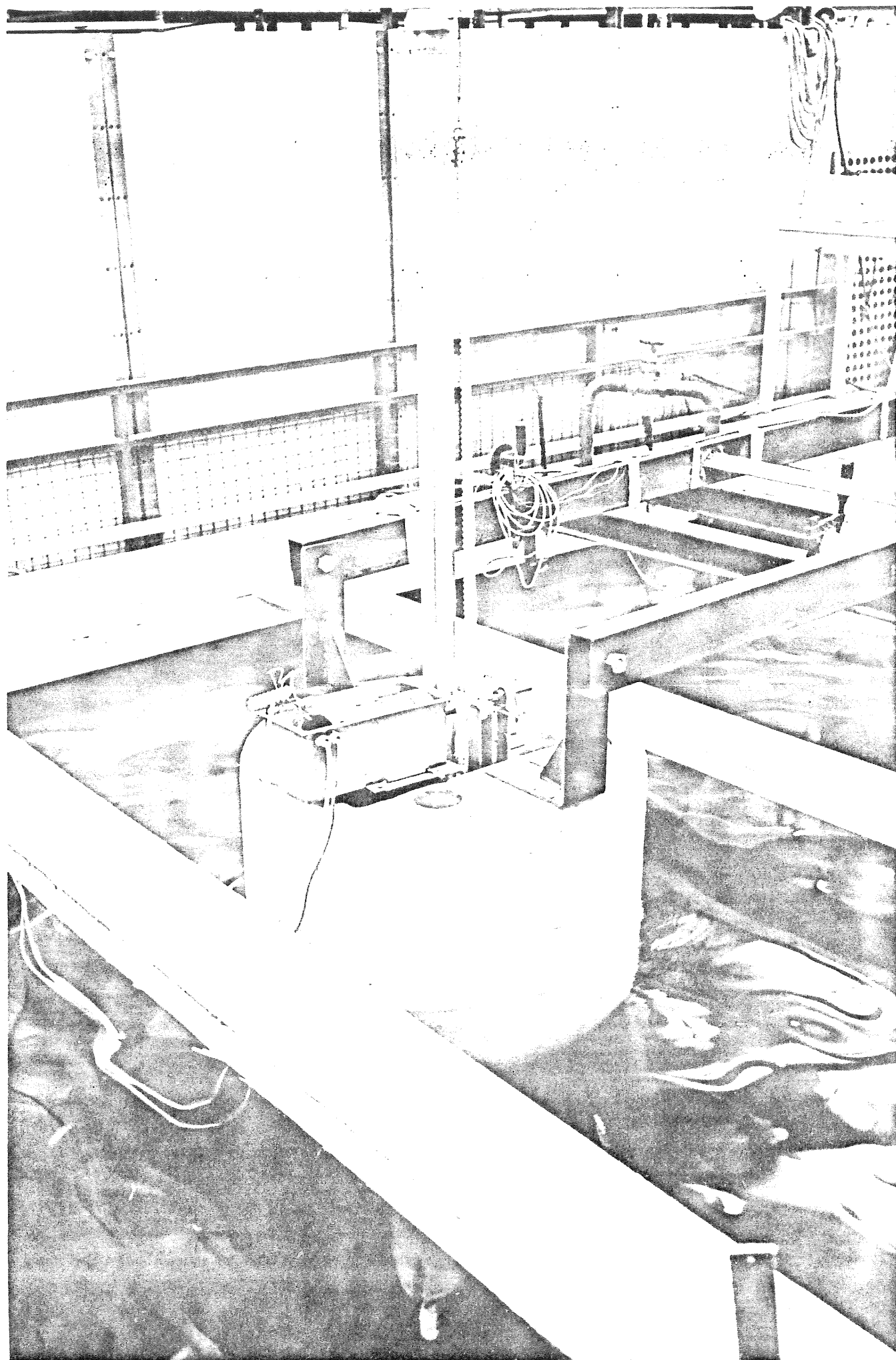
I tabell 4.9 framgår det att verkningsgraden var ungefär lika stor vid olika dämpningar.

Tabell 4.9

Försök nr	Dämpnings resistans ohm	$p_{ut}$ (W)	$F_s$ (N)	$v$ m/s	$\eta$	Anm
1	7,4	9,5	78,8	0,39	0,31	
2	7,4	10,6	120,5	0,43	0,21	
3	7,4	5,6	88,8	0,32	0,20	$\bar{\eta} = 0,23$
4	7,4	9,7	95,4	0,44	0,23	
5	7,4	2,2	52,0	0,22	0,19	
6	7,4	6,1	78,7	0,34	0,23	
7	1,82	7,0	100,9	0,37	0,19	
8	1,82	11,75	130,8	0,43	0,21	
9	1,82	12,6	144,2	0,42	0,21	$\bar{\eta} = 0,21$
10	1,82	11,7	105,7	0,42	0,26	
11	1,82	4,2	83,6	0,25	0,20	
12	1,82	8,7	109,7	0,39	0,20	
13	3,68	8,5	105,7	0,37	0,22	
14	5,52	8,4	91,1	0,38	0,24	

Den relativt låga verkningsgraden ( $\bar{\eta}_{tot} = 0,23$ ) får dock anses vara tillfredställande med beaktande av maskineriets grova utformning.





Modellbåt under körning

### 4.3 Vågmätning i sjön Lygnern

#### Beskrivning av mätutrustningen

I samband med modellförsöken i Lygnern under sommaren och hösten 1978 provades en vågmätningssutrustning, som tagits fram inom Gruppen.

I figur 4.10 visas hur mätarrangemanget är uppbyggt.

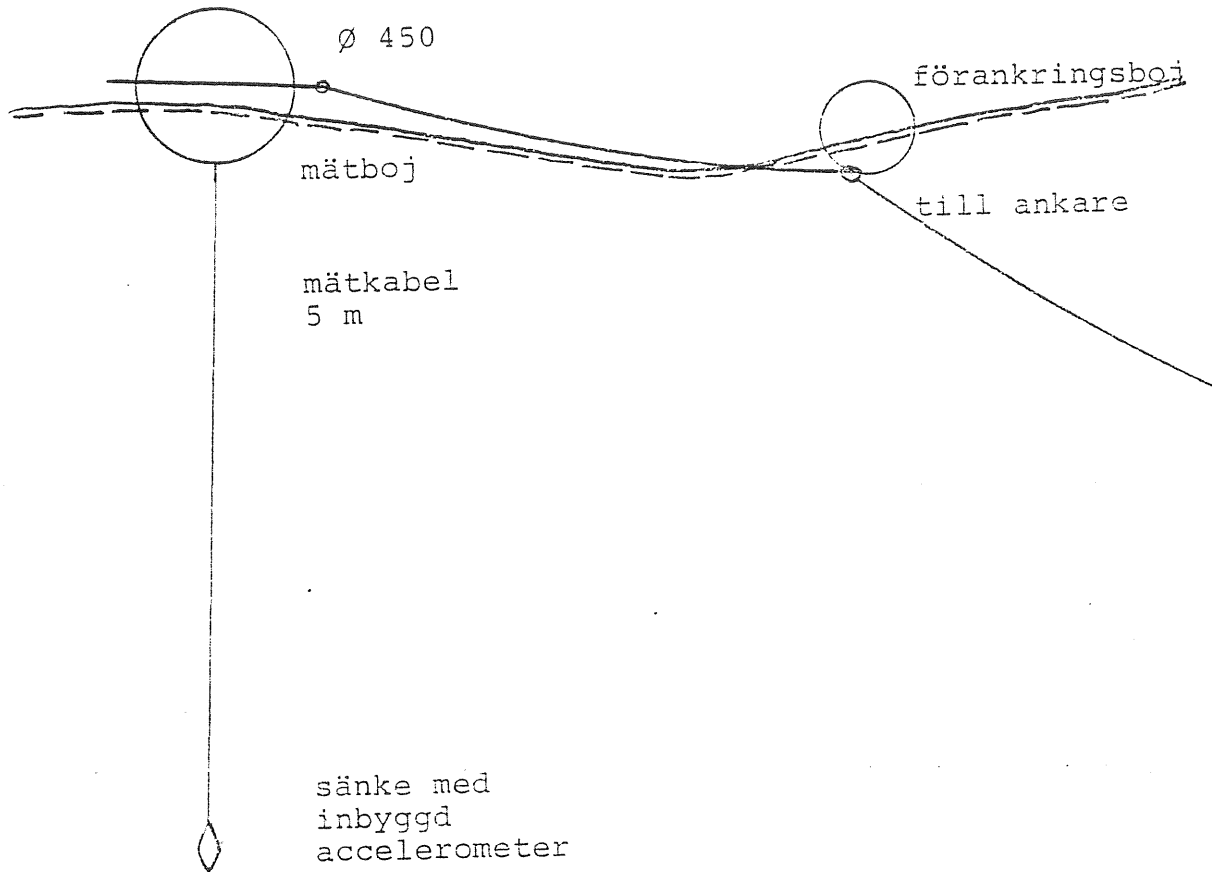


Fig 4.10

Vågaccelerationen mäts med en accelerometer, som är inbyggd i ett strömlinjeformat sänke. Sänket hänger i sin kabel i mätbojen. När mätbojen rör sig i vågorna, följer sänket med i rörelsen, och genom att sänket hela tiden hänger vertikalt mäts på detta sätt vågaccelerationen. Visserligen följer mätbojen partikelrörelsen i vågorna och rör sig således ej enbart i vertikalled. Genom att ha lång kabel mellan accelerometersänket och mätbojen blir inverkan av denna horisontalrörelse försumbar. För att kontrollera att sänket inte pendlar eller svänger i sidled har dykare observerat systemet under mätning. Det visade sig att sänket rör sig

längs en vertikal linje utan någon pendling.

Mätbojen innehåller mätelektronik, kassetbandspelare och batteri. Med mätelektroniken kan följande inställningar göras: inspelningsintervall från 7 min till 96 timmar i elva steg, mättid 2, 5, 10 eller 15 min samt signalförstärkning så att fullt utslag fås för 0.5 g resp 1.0 g. I mätelektroniken omvandlas accelerometersignalen till en analog frekvenssignal, som kan spelas in på vanlig kassetbandspelare. Kassetbandspelaren styrs av mätelektronikens klocka. Batteriets kapacitet räcker för ca 1 veckas mätning.

### Resultat

Forskningsgruppen förfogar över apparatur för omvandling av mätsignal på band till diskreta värden på hållremsa för inmatning på dator. Mätsignalen kan även ritas ut på pappersskrivare, se figur 4.11. Som resultat från körning på dator fås ett s k vågspektrum, se figur 4.12.

Under sommaren 1978 provades funktionen hos mätsystemet, och en del mindre modifieringar gjordes. Bl a undersöktes olika utformning av sänket. Vid dessa försök gjordes observationer av dykare. Försöken ledde fram till det mätarrangemang som visas i figur 4.10.

Under hösten gjordes mätningar framför allt i hårt väder för att undersöka vilka vågsituationer man kan få i Lygnern. Det lyckades inte att få någon mätning i storm p g a passningssvårigheter, men 780825 erhöles mätresultat från ca 12 m/sek i vindhastighet och riktning SW. I figur 4.11 visas accelerationsregistreringen från denna mätning, och i figur 4.12 resultatet från utvärderingen i dator. Signifikanta våghöjden,  $H_s$ , är i detta fall 0,40 m, och nollkryssningsperioden,  $T_z$ , är 2.0 sekunder. Vill man ha större vågor kan man antingen flytta sig närmare läänden av sjön eller vänta på högre vindhastighet.

Vid de vågmätningar och modellförsök som gjorts i Lygnern har vågorna observerats ingående. Det förefaller som om vågorna är relativt långkammiga, speciellt när vinden blåser i sjöns längdriktning.

Framtida vågmätningar i Lygnern

Problemet med den här beskrivna vågmätningssutrustningen är att den totala mättiden begränsas av kassetbandets längd. För att komma ifrån detta planeras utläggning av mätkabel i sjön så att vågmätningen kan skötas helt från den mätbarack som finns vid mätplatsen.

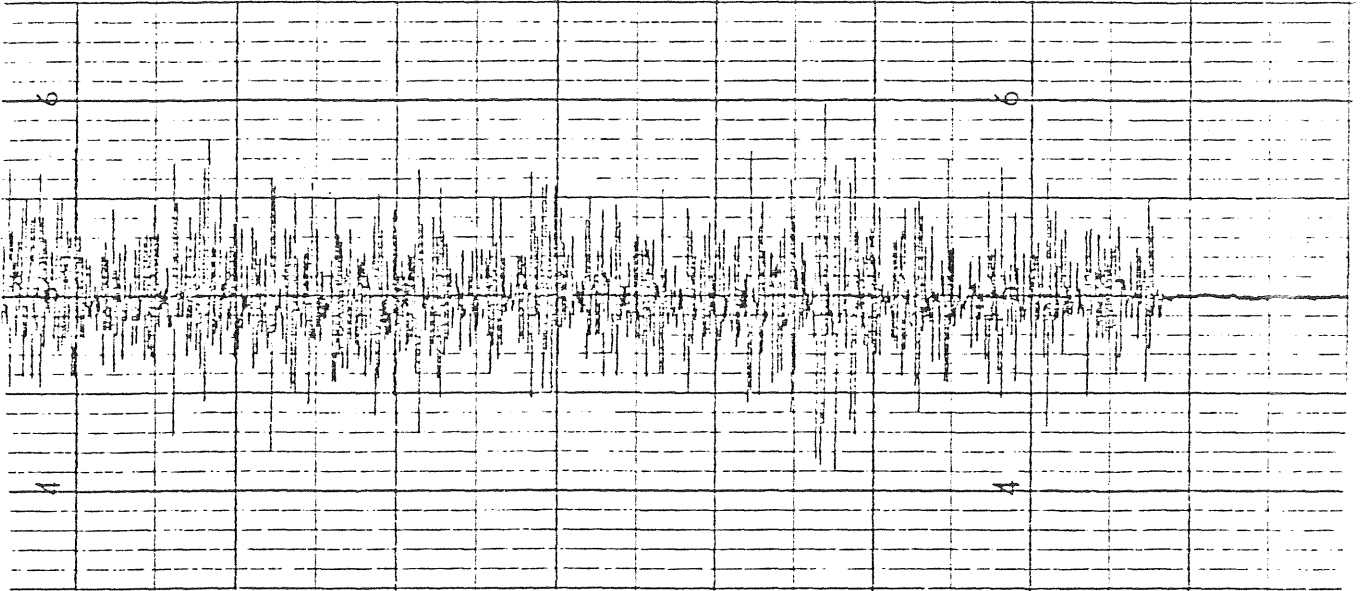


Fig. 4:11 Vågaccelerationsregistrering från Lygnern 780825

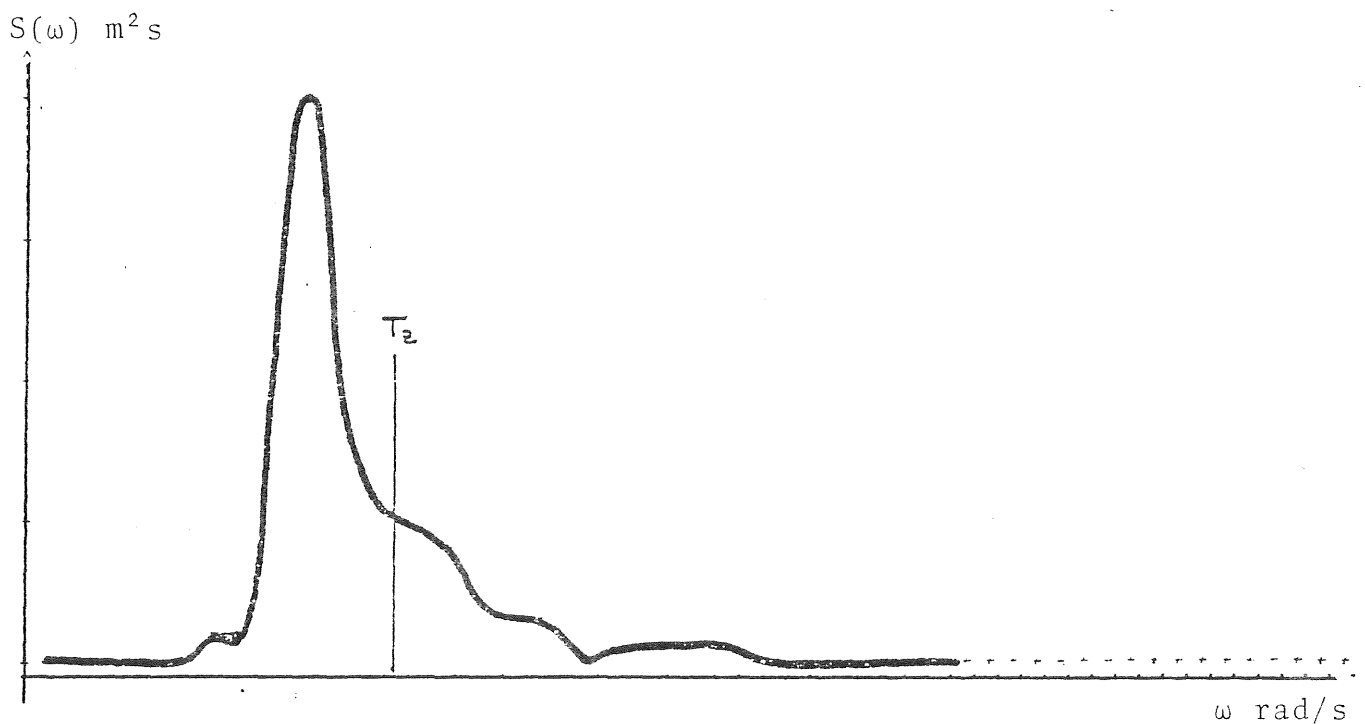


Fig. 4.12 Resultat av utvärdering i dator

5. ELEKTRISKA GENERATORER FÖR VÅGBOJAR

## 5. ELEKTRISKA GENERATORER FÖR VÅGBOJAR

### 5.1 Elektriska generatorer för vågbojar

#### Allmänt

Omvandling av vågenergi till elektrisk energi kan ske direkt med en elektrisk generator. Omvandlingen kan även tänkas ske indirekt, med ett system bestående av ett överföringsorgan av mekanisk, hydraulisk eller pneumatisk art och en elektrisk generator. Den direkta omvandlingen kan ske i en linjär generator som är gjord för en fram och återgående rörelse.

Vid direkt energiomvandling är slitaget i enheten minimalt. Slitaget består enbart av lagerslitage i generatorn och detta slitage reduceras avsevärt genom den långsamma rörelsen. Man kan därför förutsätta, att den direkta energiomvandlingen kräver ett minimum av tillsyn och service. Den långsamma rörelsen innebär dock även, att generatorn kräver mera aktivt material än en snabbloppande generator för samma effekt.

Vid indirekt energiomvandling strävar man att använda en snabbloppande generator. Överföringsorganet kan utgöras av en mekanisk växel av något slag, en hydraulisk eller pneumatisk turbin eller kolvmaskin m.m. Vid indirekt energiomvandling är kostnaden för generatorn låg, men kostnaden för överföringsorganet kan vara av betydelse. Överföringsorganet medför ökat slitage samt ökat behov av underhåll och service.

Valet mellan direkt eller indirekt energiomvandling beror i hög grad av vågenergiomvandlarens principiella uppbyggnad. I föreliggande undersökning har arbetet huvudsakligen koncentrerats på direkt energiomvandling med en linjär generator. Detta val innebär icke ett slutgiltigt ställningstagande för en direkt energiomvandling. Avsikten är att i en följande etapp av arbetet även ingående studera indirekta energiomvandlare.

### 5.2 Linjära generatorer

Linjära generatorer kan utföras som synkrona eller asynkrona generatorer. Asynkrona generatorer är normalt billigare än synkrongeneratorer eftersom de saknar fältlindning och släp-ringar. En asynkrongenerator som icke är direktansluten till ett elektriskt nät kräver för sin funktion ett kondensatorbatteri

Detta producerar den reaktiva effekt som behövs för dess magnetisering. I det föreslagna systemet skall effektvariationerna utjämnas genom sammankoppling av ett flertal generatorer. Växelspänningen från varje generator måste därför likriktas, innan de kan serie- eller parallellkopplas. Likströmmen växelriktas i land och inmatas i kraftnätet via transformatorer. Detta likströmsmellanled omöjliggör reaktiv effektmatning till en asynkrongenerator.

En synkrongenerator har en fältlindning som matas med likström, varför magnetiseringen kan tas från likströmsmellanledet. Denna skillnad gör att den synkrona generatoren bedömts vara lämpligare att i första hand studera. I det kommande arbetet bör även asynkrongeneratoren studeras.

### 5.3 Metod för bestämning av producerad elektrisk energi utgående från vågdata

Denna metod att bestämma elenergiproduktionen från en boj förutsätter:

- 1) Kännedom om signifikant våghöjd  $H_s$  och medelperiodtid  $T_z$ , lämpligen i form av ett scatterdiagram enligt diagram 5.1.
- 2) Kännedom om bojens hydrodynamiska parametrar.
- 3) Bojens energiomväandlare skall dämpa med en kraft proportionell mot bojens hastighet.

Metoden går ut på att beräkna bojens kvadratiska medelhastighet eftersom

$$P_{in} = b_d \cdot (v^2)_{med} \quad (5.1)$$

$P_{in}$  den elektriskt upptagna effekten från vågorna

$b_{d2}$  generatorns dämpkonstant  
 $(v^2)_{med}$  bojens kvadratiske medelhastighet

För att beräkna  $(v^2)_{med}$  används följande ekvationer och samband.

Vågornas effektspektrum  $S(\omega)$  enligt Pierson-Moskowitz:

$$S(\omega) = 0,11 \cdot H_S^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{T_z}\right)^4 \cdot \frac{1}{\omega^5} \cdot e^{-0,44 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{T_z \cdot \omega}\right)^4} \quad (5.2)$$

$\omega$  vågornas vinkelfrekvens

Bojens amplitudresponnsfunktion  $Y(\omega)$  enligt ekvation 2.13  
 (Se sid. 2:7).

Bojhastighetens effektspektrum  $S_V(\omega)$ :

$$S_V(\omega) = S(\omega) \cdot Y^2(\omega) \cdot \omega^2 \quad (5.3)$$

Variansen för bojastigheten  $\sigma_V^2$ :

$$\sigma_V^2 = \int_0^{\infty} S_V(\omega) \cdot d\omega \quad (5.4)$$

$\sigma_V$  standardavvikelsen för hastigheten

Bojhastighetens frekvensfunktion  $f_V(v)$ :

$$f_V(v) = \frac{1}{\sigma_V \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\left(\frac{v^2}{2 \cdot \sigma_V^2}\right)} \quad (5.5)$$

Ekvation 5.5 bygger på att vattenytans hastighet är normalfördelad varför även bojastigheten blir det eftersom amplitudresponnsfunktionen är en linjär transformation av vattenytans hastighet.

Bojhastighetens fördelningsfunktion  $F_V(v)$ :

$$F_V(v) = \int_0^v f_V(v) \cdot dv \quad (5.6)$$



Medelvärde av den upptagna effekten blir

$$P_{in} = \frac{\left( b_d \int_{v_{min}}^{v_{max}} 2 \cdot v^2 \cdot f_v \cdot dv + \int_{v_{max}}^{\infty} 2 \cdot P_{max} \cdot f_v \cdot dv \right)}{(1 - F_v(v_{min}))} \quad (5.7)$$

$v_{min}$  minsta hastighet vid vilken generatoren är inkopplad  
 $v_{max}$  maximal hastighet för linjär dämpning

I ekvation 5.7 beräknas väntevärdet av den Chi-2 fördelade kvadratiske bojhastigheten för en begränsad del av utfallsrummet. Genom att dividera med detta utfallsrums sannolikhet erhålls medelvärde för de hastigheter som utfaller i detta rum. Begränsningen  $v_{min}$  motiveras av att för låga hastigheter medför att generatorns effektbehov (för sin magnetisering) blir större än dess effektproduktion, varför magnetiseringen, och därmed generatorns effektproduktion, stängs av. Begränsningen  $v_{max}$  är den hastighet varvid generatoren ger maximal effekt. När hastigheten överstiger  $v_{max}$  minskas magnetiseringen så att effekten hålls konstant lika med  $P_{max}$ . (I ekvation 5.7 har en variabelsubstitution utförts från  $v^2$  till  $v$ .)

Lösningen av ovanstående integraler kan ske numeriskt. Detta har gjorts i nedanstående exempel som ligger till grund för kostnadsberäkningen i kapitel 7.

### Exempel

På intuitiv grund valdes att beräkna energiproduktionen för en boj med resonans för vågor med periodtiden 4,25 sekunder, försedd med en generator dimensionerad för maximalt 20,7 kW ineffekt, utgåendes från en modellboj med resonans vid 1,06 Hz och en elektrisk dämpkonstant på 12,1 Ns/m. Med hjälp av Froudes modellregler (se Gr:11) kan modellbojens hydrodynamiska egenskaper skalas upp så att ekvation 5.4 och därefter 5.7 kan lösas.

En generator dimensionerades för ovanstående värde på  $P_{\max}$  och det uppskalade värdet av modellbojens dämpkonstant. Generatoren fick följande data:

Tomgångsspänning:	300 V
Utspänning från likriktaren:	230 V
Märkström:	73 A
Statorns verkningsgrad:	0,8
Uteffekt:	14,4 kW
Magnetiseringseffekt:	2,2 kW
Kabelström:	62 A
Vikt:	1700 kg

Sedan den av generatoren upptagna effekten bestämts för de olika vågsituationer som, enligt diagram 5.1 förekom utanför Hoburgen 1976, beräknas energiproduktionen med hänsyn till förlusterna i statorn, fältkretsen (magnetiseringen) och kablarna till land. De senare förlusterna beräknas utifrån en tänkt kraftverksutformning, beskriven i kapitel 7. Generatorns energiproduktion  $W_g$  ges av summan

$$W_g = \sum_k (P_{in} \cdot \eta - P_m) \cdot t_k \quad (5.8)$$

k	index för de olika vågsituationerna, enligt diagram 5.1
$\eta$	statorverkningsgraden
$P_m$	magnetiseringseffekten
t	förekomsten i timmar av de olika vågsituationerna

Kabelförlusterna beräknas vid full effekt per boj och multipliceras med bojens utnyttjningsgrad enligt

$$W_{kab} = \eta_u \cdot 8760 \cdot P_{kab} \quad (5.9)$$

$W_{kab}$	kabelförlusterna
$\eta_u$	generatorns utnyttjningsgrad
$P_{kab}$	förlusteffekten i kablarna vid full effektöverföring

Generatorns utnyttjningsgrad beräknas som dess medeleffekt under året dividerat med dess topp effekt (14,4kW). I diagram 5.2 har nettoproduktionen till land  $W$  angivits som funktion av  $H_s$  och  $T_z$ . I nedanstående tabell ges några viktiga data för bojen.

Energiproduktion till land:	47,6 MWh
Magnetiseringsförluster:	12,4 MWh
Kabelförluster:	7,6 MWh
Utnyttjningsgrad:	44,3 %
Drifttid:	5645 h

Ovanstående resultat förutsätter en styrd hackare i fältkretsen för att begränsa effekten vid höga hastigheter, och avstängning vid för låga hastigheter. Kostnaden för en sådan krets torde vara marginell och har ej medräknats i kostnadsberäkningen i kapitel 7. Bojens energiproduktion kan höjas genom

- 1) reglering av dämpningen
- 2) optimering av boj-och generator-dimensioner

Med punkt ett avses att man kan, genom att dämpa hårdare vid stora vågor och mindre vid vågor nära resonansfrekvens, få ut mer energi. Att genomföra punkt två kräver omfattande räkningar som ej ännu gjorts. En enklare optimering kommer att göras i samband med att en modellboj med linjär synkrongenerator tillverkas för en effekt mellan 500 och 5kW ineffekt.

Denna energiberäknings noggrannhet begränsas av tillförlitligheten i vågdata, vågspektrat och den linjära rörelseekvation som ligger till grund för ekvation 2.13. I kapitel 7 görs även en uppskattning av ett helt kraftverks energiproduktion, varvid ingen hänsyn tas till interaktionen mellan kraftverkets bojar.

Diagram 5.1 Förekomst i timmar för vågor med olika höjd  $H_s$  och periodtid  $T_z$  utanför Hoburg 1976

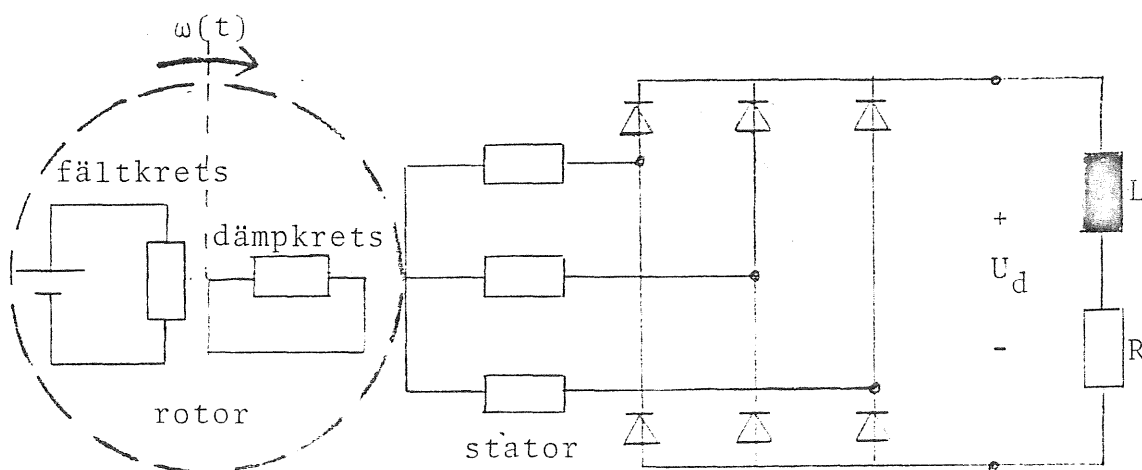
$H_s$ (m)													$T_z$ (s)					
4,125													-					
3,875													-	13	-			
3,625													-	24	18	-		
3,375													-	134	-	-		
3,125													-	18	110	-		
2,875													-	140	6	-		
2,625													-	24	228	-		
2,375													-	12	334	45	-	
2,125													12	133	246	-		
1,875													-	119	384	40	-	
1,625													-	13	383	505	-	
1,375													-	6,8	427	542	7	-
1,125													-	348	708	36	-	
0,875													-	348	687	110	-	
0,625	-	-	544	720	33	-												
0,375	287	846	259	-	-													
	2,25	2,75	3,25	3,75	4,25	4,75	5,25	5,75	6,25	6,75	7,25	7,75	8,25	$T_z$ (s)				

Diagram 5.2 Elektriskt upptagen energi i MWh som funktion av vågornas höjd och periodtid för en tänkt boj utanför Hoburg 1976.

$H_s$ (m)													$T_z$ (s)				
4,125													-				
3,875													-	1,165	-		
3,625													-	1,309	1,227	-	
3,375													-	1,69	-	-	
3,125													-	1,227	1,355	-	
2,875													-	1,72	1,072	-	
2,625													-	1,293	2,71	-	
2,375													-	1,146	3,94	1,514	
2,125													-	1,144	1,55	2,77	-
1,875													-	1,37	4,24	1,424	
1,625													-	1,145	4,12	3,14	-
1,375													-	1,072	4,39	5,32	1,065
1,125													-	3,30	6,42	1,308	-
0,875													-	2,78	5,37	1,810	-
0,625	-	2,73	4,00	1,178	-												
0,375	1,668	1,454	-	-													
	2,75	3,25	3,75	4,25	4,75	5,25	5,75	6,25	6,75	7,25	7,75	8,25	$T_z$ (s)				

#### 5.4 Likströmsmodellen

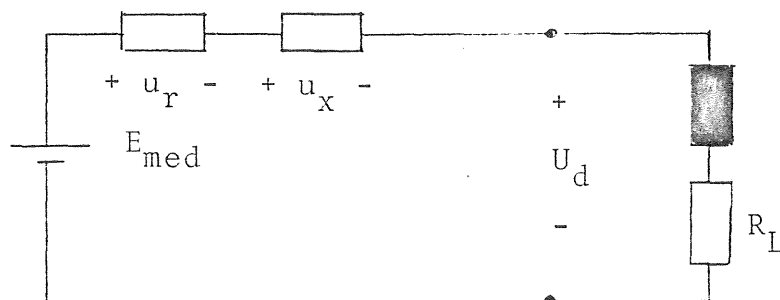
Den pendlande linjära synkrogeneratoren befinner sig alltid i transient tillstånd. En elektrisk-matematisk modell blir därför omfattande. Eftersom generatorns faser ansluts till en halvåslirikriktare, ett icke linjärt element, blir modellen ytterligare komplicerad. Är generatorn försedd med dämp-lindning krävs sex kopplade differentialekvationer för en entydig lösning.



Figur 5.1 Kretsschema för en generator med last

Ansluts ett större antal ( $s$ ) generatorer i serie, blir antalet ekvationer  $6 \cdot s$ . Alla ekvationer måste lösas samtidigt, vilket kräver stor datorkapacitet. Då många generatorer kopplas i serie, erhålls en utjämning av effektens korttidsvariation i vågorna. Detta betyder att man genom reglering kan åstadkomma en relativt konstant likström på diodbryggans likspänningssida.

Om generatoren går med konstant hastighet och likström flyter på likspänningssidan, kan man förenkla den elektriska modellen avsevärt utan att förlora för mycket information.



Figur 5.2 Likströmsmodell

- $u_r$  resistivt spänningsfall i generatoren
- $u_x$  induktivt spänningsfall i generatoren
- $E_{med}$  generatorns tomgångsspänning sedd från likriktar-  
sidan

Detta betyder att man med god noggrannhet kan bestämma en inre impedans hos generatoren utifrån dess konstruktion och varvtal. Härmed kan man bestämma effekten som utvecklas i en godtyckligt vald belastning  $R_L$ .

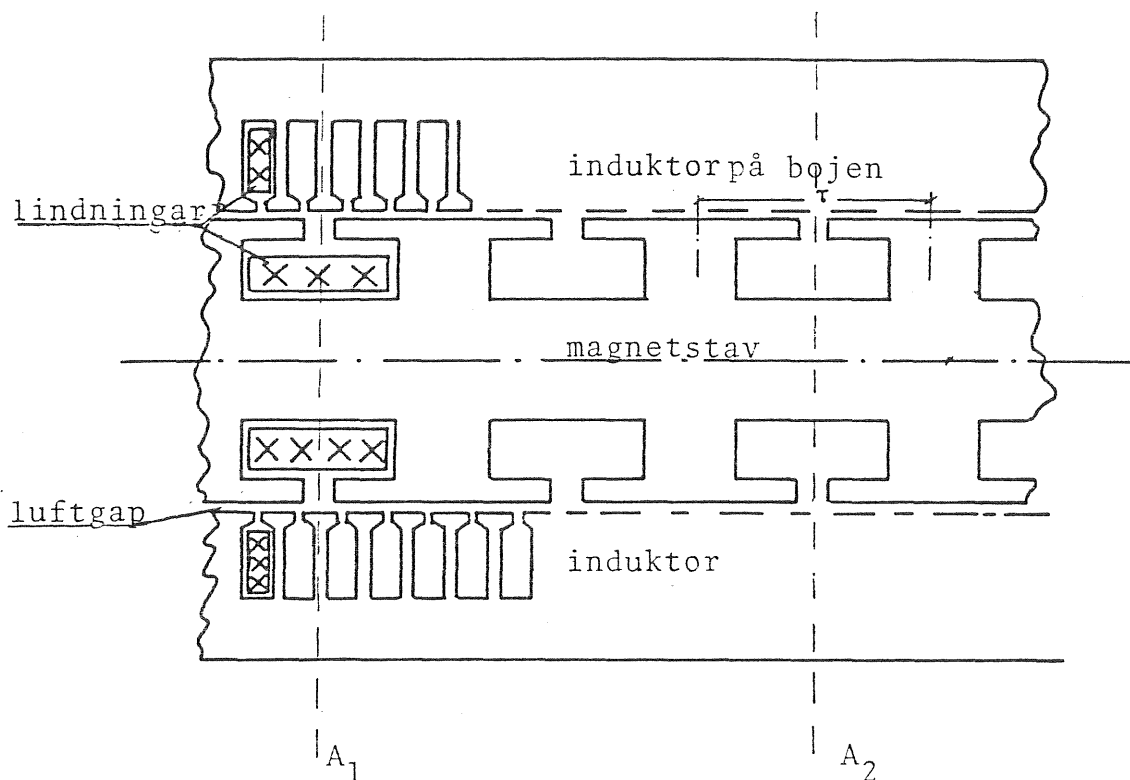
Den pendlande synkrogeneratoren kan förenklat beskrivas i en medelvärdesmodell. Man väljer det likriktade medelvärdet av den sinusformade hastigheten och återför resonemanget till fallet med konstant varvtal, med ekvivalent schema enligt fig. 5.2 ovan.

En matematisk modell av en 1.5 kW synkrogenerator ansluten till en 6-puls diodbrygga med resistans och induktans på likspänningssidan har framtagits. Teoretiskt beräknade strömmar har jämförts med de verkliga vid sinusformad rotationshastighet. Medelvärdesmodellen är inte helt färdigbehandlad, men arbetet hittills pekar på att metoden skulle vara användbar vid dimensionering av den linjära generatoren.

### 5.5 Beräkning och optimering av en linjär synkrongenerator

Optimeringen av en elektrisk maskin är krävande eftersom många storheter påverkar varandra.

En enkel optimeringslogik har gjorts som endast optimerar med avseende på några få maskinparametrar. Dessa är antalet dubbelsidiga polpar ( $I_p$ ) och antalet ledare per spår ( $N_s$ ).



Figur 5.3 Linjär generator. Ett dubbelsidigt polpar utgörs polerna mellan  $A_1$  och  $A_2$ .

Som kriterium på en optimal maskin används nettouteffekt (stators uteffekt minskad med magnetiseringseffekten) per prismässigt ekvivalent vikt koppar. Detta innebär att generatorns järnvikt divideras med 3.5 eftersom järnet är ungefär så mycket billigare än koppar.

Optimeringsprogrammet görs med följande bivillkor:

- ineffekten skall vara konstant (=den önskade)
- maskinens bredd (ryggglängden) skall överstiga 0.1 m
- strömtätheten skall vara så stor som möjligt men ej större än  $4 \text{ A/mm}^2$
- strömbeläggningen skall vara så stor som möjligt men ej över 40 kA/m
- antalet ledare i höjddled i spåren får ej överstiga 25

För varje körning med optimeringsprogrammet anges önskad ineffekt, önskad spänningsnivå (eller ström), antal ledare i bredd i spåret samt önskat begynnelsevärde på antalet dubbelsidiga polpar.

Maskinen beräknas sedan för 1-25 lager ledare i spåret för ökande antal H-sektioner (dubbelsidiga polpar) tills maskinen är så stor att magnetiseringseffekten överstiger statorns uteffekt. Hela tiden jämförs varje resultat med det dittills bästa och i slutet skrivs den optimala maskinens mått och egenskaper ut.

#### 5.6 Magnetfältsberäkning för kontroll av induktanserna

För att få en rimlighetskontroll av induktansernas värden gjordes en beräkning av magnetfältet runt en pol med finita elementmetoden.

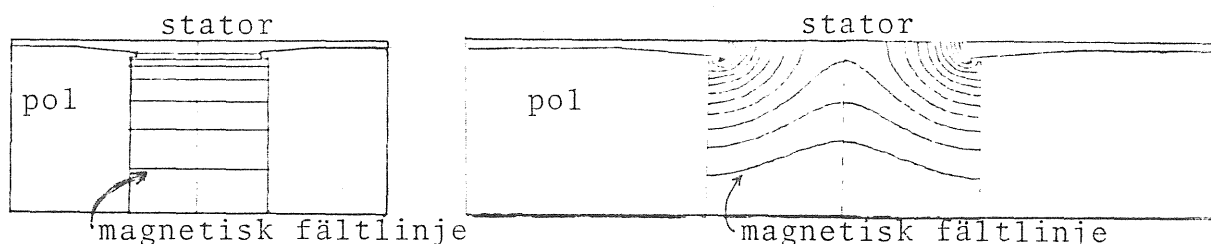
Denna gav överensstämmande resultat för huvudinduktanserna men avvikande för rotorns läckinduktans. Detta förklaras av att de formler som använts för beräkningen utgår från en annan fältbild än den som erhöles med finita elementmetoden. Att fältbilderna inte överensstämmer kan förklaras av att den linjära generatoren har mindre luftgap i förhållande till polluckan än vad synkrogeneratorer normalt har. Se fig. 5.4. Avvikelsen innebär att dimensioneringsprogrammet räknar med en läckinduktans i rotorn som är 3-5 gånger större än vad den borde vara enligt fältberäkningen. Dock är statorns läckinduktans betydligt större varför rotorns läckinduktans



återverkan på kommuteringsinduktansen blir betydligt mindre och eftersom denna i sin tur bara är en mindre del av maskinens inre förluster blir återverkan på maskinens verkningsgrad bara några procent.

Det har tyvärr också visat sig att formlerna i dimensioneringsprogrammet för rotorns läckinduktans ger negativa värden på denna vid stora dimensioner. Formlerna är hämtade ur Lagerqvists "Konstruktiv elektromaskinlära", och en tänkbar förklaring är att hans formler är empiriska då de tar hänsyn till rotorlindningens utseende och att de därför endast gäller för normala synkronmaskiner. En härledning av en analytisk formel som bara tar hänsyn till rotorns geometri har gjorts och den ger rimliga värden. Resultaten är av samma storleksordning som Lagerqvists formler ger vid små effekter. Om hänsyn tas till de olika fältbilderna kan man säga att dess resultat även stämmer överens med fältberäkningens.

Eftersom fältberäkning med finita elementmetoden är väl verifierad, måste den fältbild som metoden ger vara riktigare än den antagna fältbilden som ligger till grund för den analytiska formeln. Det vore önskvärt att ta fram en ny analytisk formel som tar hänsyn till fältbildens variation med maskinens dimensioner.



Figur 5.4 Fältbilden som ligger till grund för den analytiska induktansformeln är till vänster. Till höger den fältbild som erhöles med finita elementmetoden.

## 5.7 Permanent magnet

Gamla magnetmaterial, alnico legeringar och ferriter, kräver små luftgap och korta magnetflödesvägar i järnet för att ge högsta flödestäthet ( $\leq .6 \text{ Vs/m}^2$ ). Det har tagits fram nya magnetmaterial exempelvis med indium-samarium. Dessa klarar betydligt större luftgap men blir troligen mycket dyra. Vissa fabrikat är också svårarbetade.

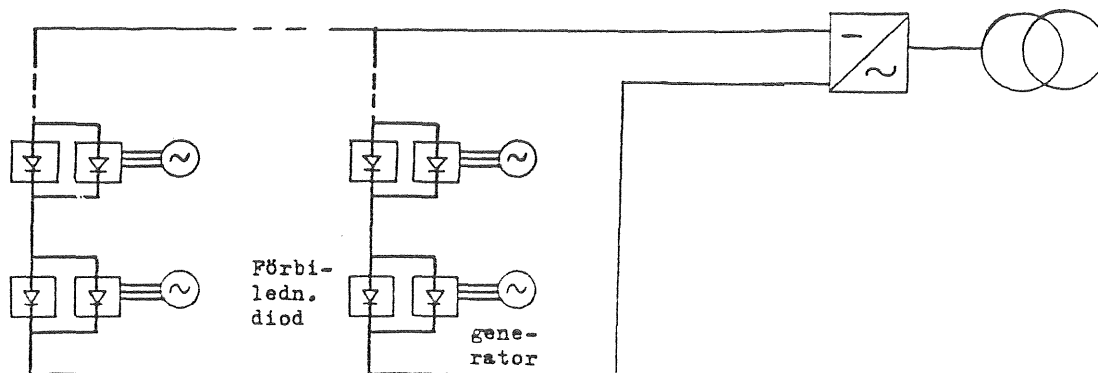
Vid små generatoreffekter,  $<15 \text{ kW}$ , är magnetiseringsförlusterna stora med elektromagneter. Generatorns verkningsgrad sjunker kanske med 20-40 %.

En kombination av permanent och elektrisk magnetisering borde vara fördelaktig, eftersom verkningsgraden i små vågor ökar och problemen vid start efter en lång stiltje blir mindre.

## 5.8 Det elektriska systemet

Flödande energikällor, som vågorna och vinden, ger en ständigt varierande effekt till en energiomvandlare. Från omvandlaren vill man få ut 50 Hz växelspanning. Ett system med växelspanningsgeneratorer och likspänningsmellanled blir attraktivt så snart det blir svårt att hålla en fast frekvens på generatorns utspänning.

Systemet består i detta fall av många enkla pendlande synkron-generatorer med trefasiga likriktarbryggor på utgången. För att utjämna effektpulsationerna från vågorna, innehåller systemet många serie- och parallellkopplade generatorer. Sammanlagringen ger en kraftig utjämning av effektens variation med bojens rörelse. Detta yttrar sig som en relativt konstant spänning i likspänningsmellanledet. Likspänningen kan sedan överföras till 50 Hz växelspanning i tyristorstyrda omriktare.



Figur 5.5 Elektriskt system

För att kunna dimensionera och styra omriktaren, måste man känna generatorernas inre impedanser och tomgångsspänningar. Vi har därför hittills prioriterat arbetet att bestämma och beskriva inre impedansen och tomgångsspänningen i de pendlade generatorerna. Detta är utfört i arbetet med likströmsmodellen.

Vidare är ett examensarbete igångsatt, att med dator försöka reglera maximalt effektuttag i "Lygnernbojen". Detta arbete kan ge oss kunskap om regleringsmöjligheterna och energiomvandlingen i oregelbundna vågor. För övrigt är bara översiktliga studier gjorda på omriktarområdet.

## 6. VÄGENERGI I SVENSKA VATTEN

## 6.1 Beräkning av vågenergi med hjälp av vinddata

### Allmänt

I planeringsrapport NE 1977:4 "Vågenergi i Sverige" finns en redovisning av tillgänglig vågenergi kring Sveriges kuster. De värden som angivits är i många fall osäkra och då speciellt det flertal som är baserade på enbart observationer utan någon som helst mätning för korrelation. De effekter som angivits för Bohusläns farvatten verkar låga med tanke på att man här har stora stryklängder vid vindriktningar kring sydväst. Vidare verkar det märkligt, att vågeffekten vid Hoburg skulle vara dubbelt så stor som den vid Ölands södra grund. Resultat från vågmätningar fanns från fyra platser, men deras läge är inte direkt intressant ur vågenergisynpunkt.

För att få en bättre bild av vågenergin i svenska vatten fick SMHI 1977 i uppdrag av NE att utföra vågmätningar på tre platser. I samråd med SSPA och Gruppen för Vågenergiforskning valdes Trubaduren, Ölands södra grund och Almagrundet. Mätningarna påbörjades hösten 1978. Då en lång mättid behövs för att ge tillförlitliga värden på medelvågeffekten, kan dessa värden ej presenteras förrän senhösten 1979. Inom Gruppen för Vågenergiforskning har därför ett datorprogram för sk hindcasting tagits fram, dvs vågorna beräknas från vinddata. Med detta datorprogram har sedan vågdata beräknats för Smögen, Hoburg och Svenska Högarna. Beräkningsresultaten har jämförts med de vågmätningar som utförts vid Ölands södra grund. Resultatet visar att medelvågeffekten från hindcastingberäkningarna för dessa platser är avsevärt högre än de som angivits i NE 1977:4. En viss osäkerhet finns i dessa beräknade effektvärden. Kontrollen mot mätta värden från Ölands södra grund är gjord för endast sex månader, vilket är för kort tid för att man skall kunna lita helt på programmet. Dessutom kan programmet stämma bra för vissa platser, medan

annan stryklängdsfördelning ger stora fel. För närvarande finns inga mätvärden från Bohuslän mot vilka kontroll har kunnat göras, men det verkar rimligt att man här skulle ha den högsta medeleffekten i svenska vatten.

I Norge har liknande hindcastingberäkningar gjorts med kontroll mot mätdata. Överensstämmelsen är god för medelvärden, medan den är mindre god för extremvärden och enstaka värden.

#### Kort\_beskrivning\_av\_datorprogrammet

Hindcastingprogrammet bygger på US Army Corps of Engineers, (1973), vad gäller samband mellan stryklängd och varaktighet. Vågdata beräknas med hjälp av ett Jonswap-spektrum, se Hasselman, (1973), som tar hänsyn till växande sjö. Endast rena vindvågor erhålls med programmet, således kommer eventuell dyning ej med i beräkningarna. Inverkan av begränsat vattendjup tas ej med.

Stryklängd för de olika platserna beräknas enligt US Army Corps of Engineers, (1973). Från stryklängd för var femte grads riktning erhålls stryklängder för sexton huvudriktningar: N, NNE, NE osv, som används som indata i programmet. Plats, tidsperiod, observationsintervall och antal vindobservationer anges också. Vinduppgifterna tas från SMHI:s månads-sammanställning av meteorologiska observationer. Vindriktningen (0-15) och vindhastigheten i m/s används som indata. Ingen hänsyn tas till den höjd på vilken vinden är mätt.

Som resultat erhålls ett antal olika utskrifter, varav några visas i figur 6.1a, 6.1b och 6.1c. I figur 6.1a visas energin för ett år fördelad på olika signifikanta våghöjder och nollgenomgångsperioder.

#### Utförda\_beräkningar

Beräkning med programmet har gjorts för Ölands södra grund för att få en jämförelse mellan beräknade värden och av SMHI mätta värden. Tidsperioden för vilken dessa beräkningar gjorts är 781019-790331. Detta torde vara en tillräckligt lång period för en bedömning av programmets godhet.

För Smögen har beräkning gjorts för perioden 780101-781231  
 " Hoburg " - 750101-771231  
 " Svenska Högarna " - 770101-771231

Tidsperioden har valts med hänsyn till tillgängliga vind-observationer var sjätte timme. Beräkningsresultaten för Hoburg visar att årsmedeleffekterna för de aktuella åren varierar ca  $\pm 5\%$  kring treårsmedelvärdet. Inget av åren 1975-77 var således extremt ur vindsynpunkt. För Smögen var 1978 i stort sett ett normalår ur vindsynpunkt.

### Resultat

I tabellen nedan visas jämförelsen mellan beräknade värden med hindcastingprogrammet och SMHI:s mätvärden för Ölands södra grund.

Tabell 6:1 Beräknade och mätta vågdata för Ölands södra grund

Månad	Beräknade värden			Mätta värden		
	$\bar{H}_s$ m	$\bar{T}_z$ sek	$\bar{p}$ kW/m	$\bar{H}_s$ m	$\bar{T}_z$ sek	$\bar{p}$ kW/m
7810	1.09	4.16	3.8	1.33	4.51	6.5
7711	1.52	4.88	9.6	1.69	4.59	12.2
7812	1.56	5.10	10.8	1.51	4.50	12.0
7901	1.13	4.46	4.6	1.30	4.25	5.3
7902	1.41	4.78	8.8	1.50	4.52	10.8
7903	1.59	4.42	10.3	1.37	5.17	8.2
Medel- värde	1.38	4.63	8.0	1.45	4.59	9.2

$\bar{H}_s$  = månadsmedelvärde av signifikanta våghöjder  
 $\bar{T}_z$  = " " nollgenomgångsperioder  
 $\bar{p}$  = " " effekt per breddenhet  
 som är den vågenergi som per tidsenhet passerar  
 en tänkt vertikal cylinder med diametern  
 en längdenhet genom hela vattenmassan.

Ur tabellen framgår att de beräknade månadsmedeleffekterna är lägre än de mätta för samtliga månader utom mars 1979. Totalt sett är överensstämmelsen god. Den mätta medel-

effekten är 15 % högre än den beräknade, och förklaringen till detta kan vara att det i verkligheten finns dynning, som inte det använda hindcastprogrammet tar hänsyn till. Överensstämmelsen mellan mätta och beräknade värden av  $H_S$  och  $T_z$  är också god. Om inverkan av begränsat vattendjup hade tagits med i beräkningarna skulle  $H_S$  ha ökat. Om detta leder till bättre överensstämmelse är osäkert.

De relativt höga värdena på medeleffekten beror på att de gäller för vinterhalvåret som normalt är betydligt blåsigare än sommarhalvåret.

I figur 6.2 visas en karta med resultatet från beräkningarna inlagt. Smögen ligger högst med 11.7 kW/m, Hoburg har 7.4 kW/m och Svenska Högarna 5.3 kW/m. Dessa värden är avsevärt högre än de som angivits i Planeringsrapport NE 1977:4, speciellt för Smögen. Värdet för Smögen överensstämmer väl med det som av norrmännen beräknats på liknande sätt för havet utanför Faerder ca 14 kW/m.

Medeleffekten för Hoburg är beräknad över tre år med respektive årsmedelvärden 7.70, 7.10 och 7.54 kW/m. Variansen för dessa är 0,31 kW/m, men om man skall få ett tillförlitligt värde bör beräkningar göras för betydligt flera år.

I figur 6.2 visas även medeleffekternas procentuella fördelning på olika riktningar för de tre platserna. Denna fördelning bygger dock på antagandet att vind- och vågriktning är lika. Av figurerna framgår att för Smögen ligger i stort sett hela vågeffekten inom en sektor SW-NW. Genomgående för de tre platserna är att riktningar kring SW är de effektrikaste.

Vinduppgifterna från Svenska Högarna och Hoburg härrör från mätningar, medan uppgifterna från Smögen utgörs av visuella observationer.



OBS. INTERVAL 6  
 ENHET (KWH\*X), X=?100

SMÖGEN 1978, ALLA RIKTNINGAR

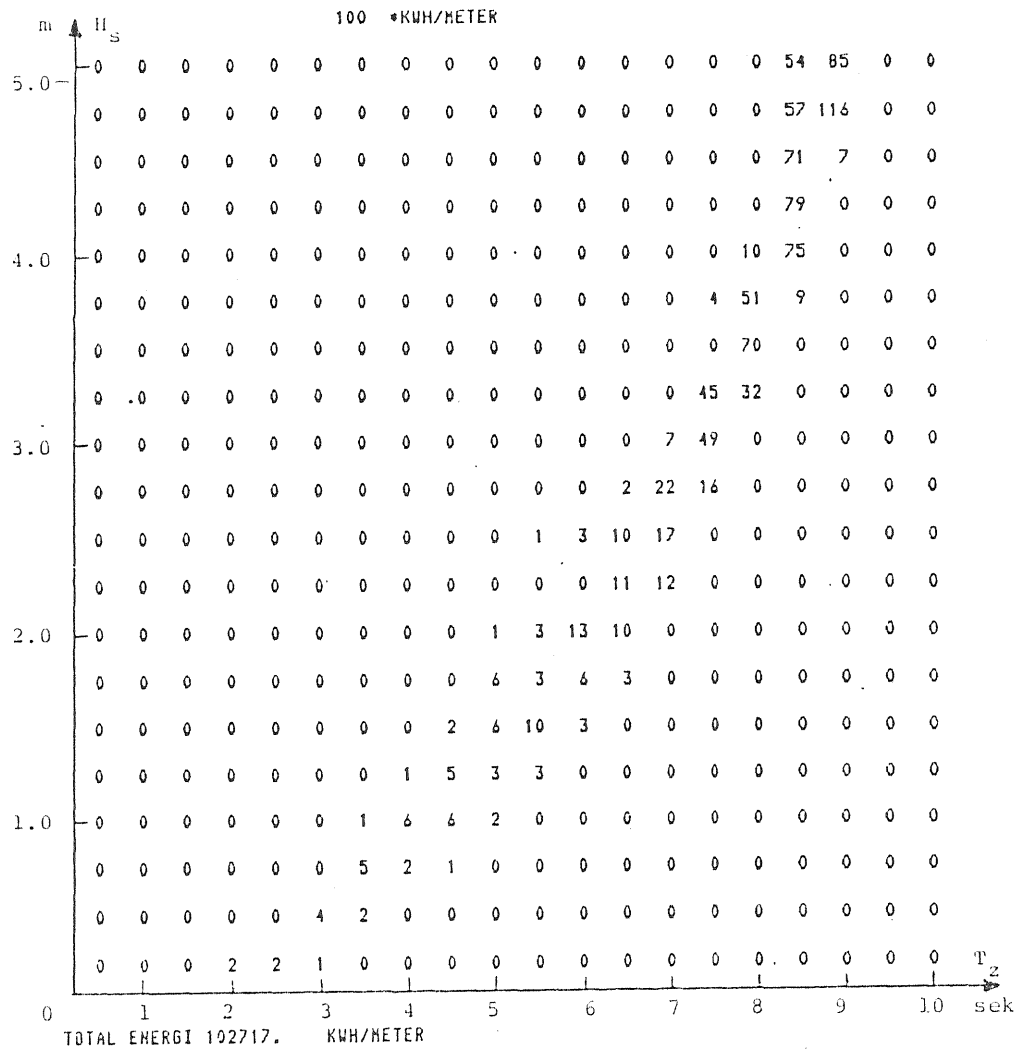


Fig 6.1a

Energins fördelning på våghöjden och vågperioder för alla riktningar

Smögen 1978

f	p(f)
Hz	(kW/m) . s
.08	336.691
.10	188.488
.12	80.545
.14	24.023
.16	14.213
.18	9.180
.20	5.972
.22	3.934
.24	2.676
.26	1.332
.28	1.021
.30	0.799
.32	0.612
.34	0.476
.36	0.375
.38	0.297
.40	0.233
.42	0.184
.44	0.148
.46	0.118
.48	0.095
.50	0.076
.52	0.051
.54	0.042
.56	0.000
.58	0.000
.60	0.000

Fig 6.1b

Vågeffektmedelspektrum för ett år.

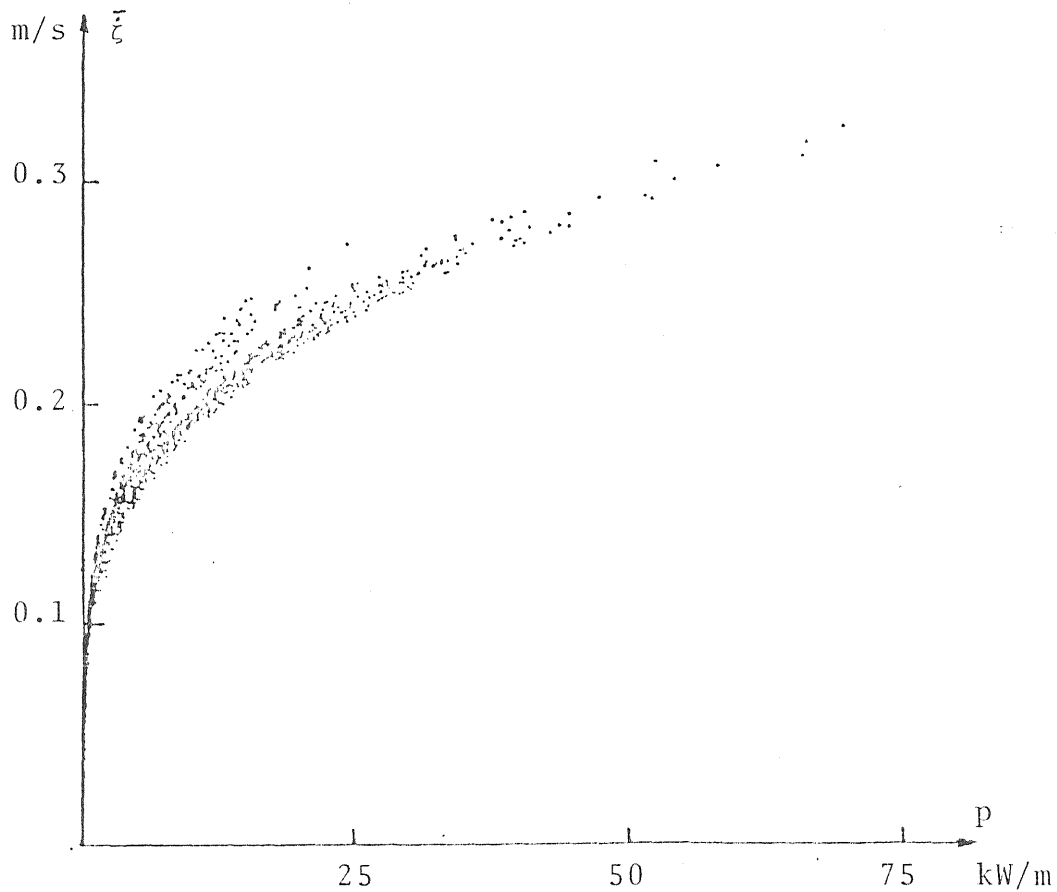


Fig 6.1c

Vattenytans medelhastighet i vertikalled som funktion av vågeffekten för varje observationstillfälle under en månad.

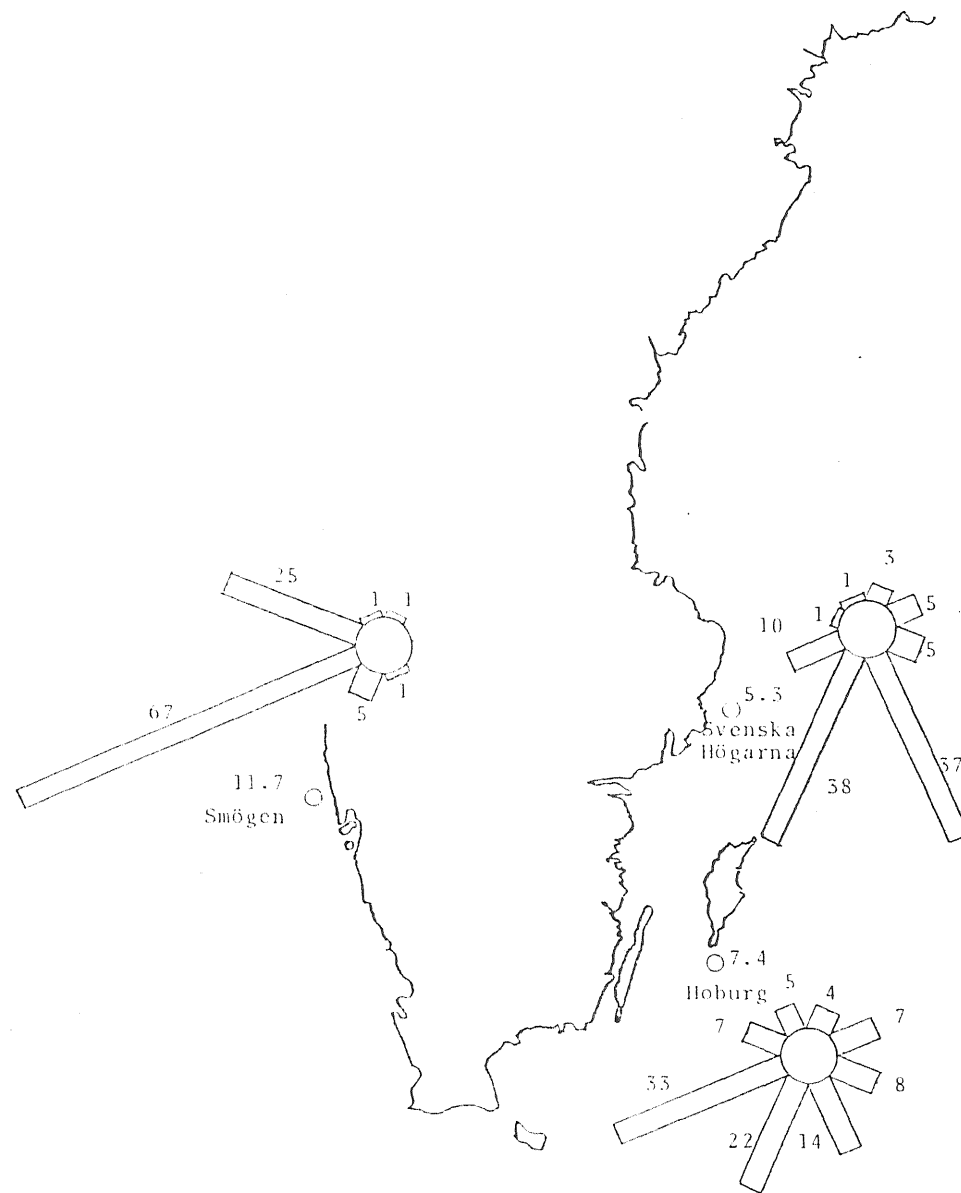


Fig 6.2

Medelvågeffekten för Smögen, Hoburg och Svenska Högarna i kW/m.

Medelvågeffektens procentuella fördelning på åtta huvudriktningar.

Resultat av SMHI:s vågmätningar

I oktober 1978 startade SMHI vågmätningar vid Trubaduren, Ölands södra grund och Almagrundet. Vågmätarapparaturen är inkopplad på de automatstationer, som finns på dessa platser. Härigenom fås vågdata in en gång i timmen. Mätsignalen behandlas i en mikrodator i automatstationen och resultatet - vågspektrum plus ett antal vågparametrar - sänds via teleförbindelse till SMHI. För varje månad görs sammanställning på huvuddatorn på SMHI. Medeleffekterna för oktober 1978 - mars 1979 visas i tabell 6.1b.

Tabell 6.1b. Månadsmedelvärden för vägeffekten enligt SMHI:s mätningar

Månad	$\bar{P}$ kW/m		
	Trubaduren	Ölands sö grund	Almagrundet
7810	3.45	6.45	1.38
7811	5.45	12.22	7.08
7812	0.79	11.97	4.30
7901	0.64	10.22	6.68
7902	0.64	10.77	0.82
7903	2.06	8.15	5.18
Totalt medelvärde	2.17	9.96	4.24

Man kan se att månadsmedelvärdena varierar kraftigt de olika platserna emellan. Detta förklaras av att största stryklängden ligger på olika riktningar för de tre platserna. Ölands södra grund har störst total stryklängd och där har man ju också det högsta effektmedelvärdet över den hittills redovisade tiden.

Skillnaden i mätt vägeffekt för Ölands södra grund 7901 i tabell 6.1a och tabell 6.1b beror på att vindmätaren var ur funktion ungefär halva månaden och att hindcastingkontrollen endast har gjorts för resten av månaden.

6.2 EnergipotentialMetod

Bruttoenergipotentialen för vågorna utmed svenska kusten har beräknats på nedan beskrivna sätt.

Vinduppgifter hämtade ur Taesler (1971) för ett antal platser längs kusten har använts för beräkning av vågdata med det i 6.1 nämnda hindcastingsprogrammet.

Resultaten bör vara riktiga när det gäller vågeffektens fördelning på olika riktningar. Däremot är de beräknade vågmedeleffekterna osäkra eftersom vindmätningstationens placering, vindmätarens höjd över omgivningen m m har stor betydelse.

I Taesler (1971) redovisas i tabellen fördelningen av vindobservationerna, dels på 8 huvudriktningar, dels på olika vindhastighetsintervall. Se tabell 6.2. Intervallen har en klassbredd på 3 m/s. Vid beräkningarna har för stationer till havs (Svenska Högarna, Utklippan) den lägre intervallgränsen valts, för stationer nära kusten (Halmstad, Ystad) det mellersta värdet. För stationer en bit in på land har det högre värdet valts (Västervik, Söderhamn, Nordmaling, Luleå).

Tabell 6.2

Vindriktning	0-3	3-6	6-9	9-12	12-15	15-18	18-21	21-24	24-27	27-30	30-33	33-36	36-39	39-42	42-45	45-48	48-51	51-54	54-57	57-60
0-3	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3-6	22	19	24	26	22	21	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
6-9	3	3	4	4	4	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
9-12	38	27	37	59	70	39	30	38	338	338	338	338	338	338	338	338	338	338	338	338
12-15	3	3	6	5	5	2	2	2	27	272	272	272	272	272	272	272	272	272	272	272
15-18	27	19	28	39	60	34	29	35	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
18-21	2	2	4	5	3	1	1	3	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
21-24	15	10	15	20	27	14	18	23	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144
24-27	4	2	2	1	1	0	1	2	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
27-30	1	1	2	2	1	0	1	2	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
30-33	5	4	7	8	7	4	7	10	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54
33-36	2	1	1	1	0	0	1	1	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
36-39	1	0	0	1	0	0	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
39-42	2	1	2	2	2	1	3	4	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
42-45	1	1	1	0	0	0	0	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
45-48	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
48-51	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
51-54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54-57	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
57-60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Summa	3	109	81	114	155	188	119	109	130	1000										

## Svenska Högarna

Tabell b1 Relativa frekvenser,  $0_{\infty}$ , av samtida värden på vindriktning och vindhastighet samt av regn och snöfall för respektive vindklass

övre värdet  $\bar{x}_3$  medelfrekvens av regn  
 mellersta värdet  $\bar{p}(x_1, x_2)$  medelfrekvens av samtida värden på vindriktning och vindhastighet  
 undre värdet  $\bar{x}_4$  medelfrekvens av snöfall

Inverkan av vindhastighetsnivån har stor betydelse eftersom vågenergin påverkas av vindhastigheten i femte dignitet. Dock ger medelvärde och riktningsfördelning för Svenska Högarna god överensstämmelse med de resultat som redovisas i fig 6.2.

För de åtta nämnda platserna samt för Smögen och Hoburg har inverkan av riktningsfördelning beaktats. Ett tänkt linjekraftverk med 100 % energiupptagningsförmåga för vågor som kommer in rakt mot kraftverket har placerats vid varje plats. Kraftverket har därvid orienterats på gynnsammaste sätt. Snett inkommande energiflöde har uppdelats i komponenter varav en faller in  $\perp$  mot kraftverket och en stryker // med kraftverket.

Genom diffraktion tas även en del av den parallella komponenten upp. Resonemanget åskådliggöres i fig 6.3.

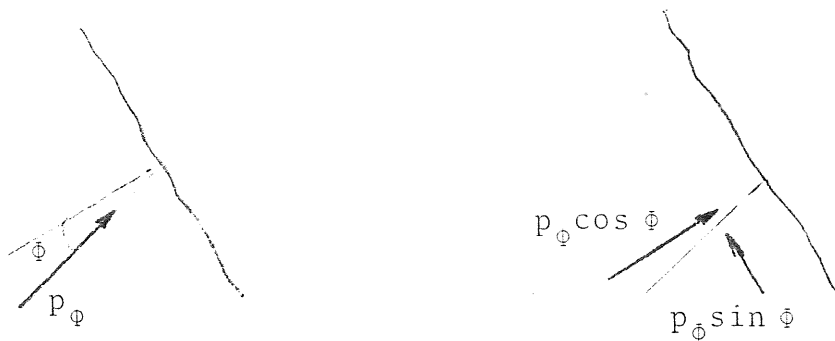


Fig 6.3

$\beta$  har i den följande beräkningen valts till 0,2.

$$P_{in} = p_{\phi} \cdot \cos \phi + \beta p_{\phi} \cdot \sin \phi \quad \dots 6.1$$

där  $P_{in}$  är av kraftverket upptagen effekt när vågeffekten  $p_{\phi}$  faller in i vinkeln  $\phi$  mot normalen till kraftverket.

Förhållandet  $\frac{P_{in}}{p_{\phi}}$  som funktion av  $\phi$  för  $\beta=0.2$  framgår av tabell 6.3.

Tabell 6.3  $P_{in}/p_{\phi}$  som funktion av  $\phi$  för  $\beta=0.2$

$\phi$	0	45	90
$P_{in}/p_{\phi}$	1.000	0.849	0.200

En reduktionsfaktor  $\kappa$  har definierats som förhållandet mellan den med hänsyn till vågriktningen upptagna effekten och den totala effekten

$$\kappa = \frac{\Sigma p_{\phi}}{\Sigma p_{in}} \quad \dots 6.2$$

De beräknade värdena på den punktvisa medeleffekten och inverkan av vågriktningen har sedan tillsammans med tidigare utförda mer säkra beräkningar samt gamla uppgifter från mätningar och observationer av vågor använts för uppskattning av vågenergin inom olika kuststräckor.

### Bruttoenergipotential

I tabell 6.4 ges exempel på beräkning av  $\kappa$  för Svenska Högarna

Tabell 6.4 Beräkning av  $\kappa$ , Svenska Högarna

Total energi 46,4 MWh/m, år	Riktning	Andel %	$E_{in}$ KWh/m, år	$p_{\phi}/p_{in}$	$E_{\phi}$ KWh/m, år
	NE	5	1392	0.849	1392
	E	5	2520	0.200	1970
	SE	37	2320	0.849	464
	S	38	17168	1.000	14575
	Sv	1	4640	0.200	3939
	NV	1	464	0.849	93
	N	3	464	1.000	394

$$\Sigma E_{\phi} = 40459$$

$$\kappa = \Sigma E_{\phi} / \Sigma E_{in} = 0.87$$

I tabell 6.5 redovisas för de olika platserna total årsmedeleffekt, procentuell fördelning på olika vindriktningar,  $\kappa$  samt årsmedeleffekt med hänsyn till vindriktningen.

Tabell 6.5 Storlek och fördelning av årsmedeleffekt

Plats	Årsmedel- effekt kW/m	Procentuell fördelning på riktningar								κ	Årsmedel- effekt · κ kW/m
		NE	E	SE	S	SV	V	NV	N		
Smögen	11.7	0	0	1	5	67	25	1	1	0.94	11.0
Halmstad	2.9	1	2	1	2	29	45	19	1	0.90	2.6
Ystad	1.9	1	20	11	8	36	19	5	0	0.80	1.5
Utklippan	4.0	10	38	11	9	17	14	0	1	0.86	3.4
Hoburg	7.4	9	6	13	24	34	6	5	3	0.81	6.0
Västervik	1.2	67	6	3	14	1	2	1	6	0.93	1.1
Svenska Högarna	5.3	5	5	37	38	10	1	1	3	0.87	4.6
Söderhamn	1.2	26	24	37	5	2	1	1	4	0.72	0.9
Nordmaling	0.5	31	4	15	19	26	2	1	2	0.83	0.4
Luleå	1.2	5	14	16	61	2	1	1	0	0.84	1.0

I figur 6.4 sammanfattas tidigare framtagna uppgifter om årsmedelseffekter (NE 1977:4) och de i tabell 6.5 redovisade värdena.

De beräknade värdena får ses som mycket grova uppskattningar av vågenergin, eftersom vinduppgifterna i Taesler 1971 använts utan tillräcklig hänsyn till själva mätstationens läge - någon korrigering för dess höjd har t ex ej gjorts. Dessutom framgår inte vindens varaktighet - den har här förutsatts till 24 tim, vilket medför att stryklängden varit begränsande.

I figuren anges för vissa platser  
beräknad årsmedeleffekt i kW/m.

- Beräkningar med vågdata enligt  
SSPA som underlag
  - Beräkningar med vågdata enligt  
MVC som underlag
  - △ Hindcastberäkningar
  - ▲ Hindcastuppskattningar
- } NE 1977:4

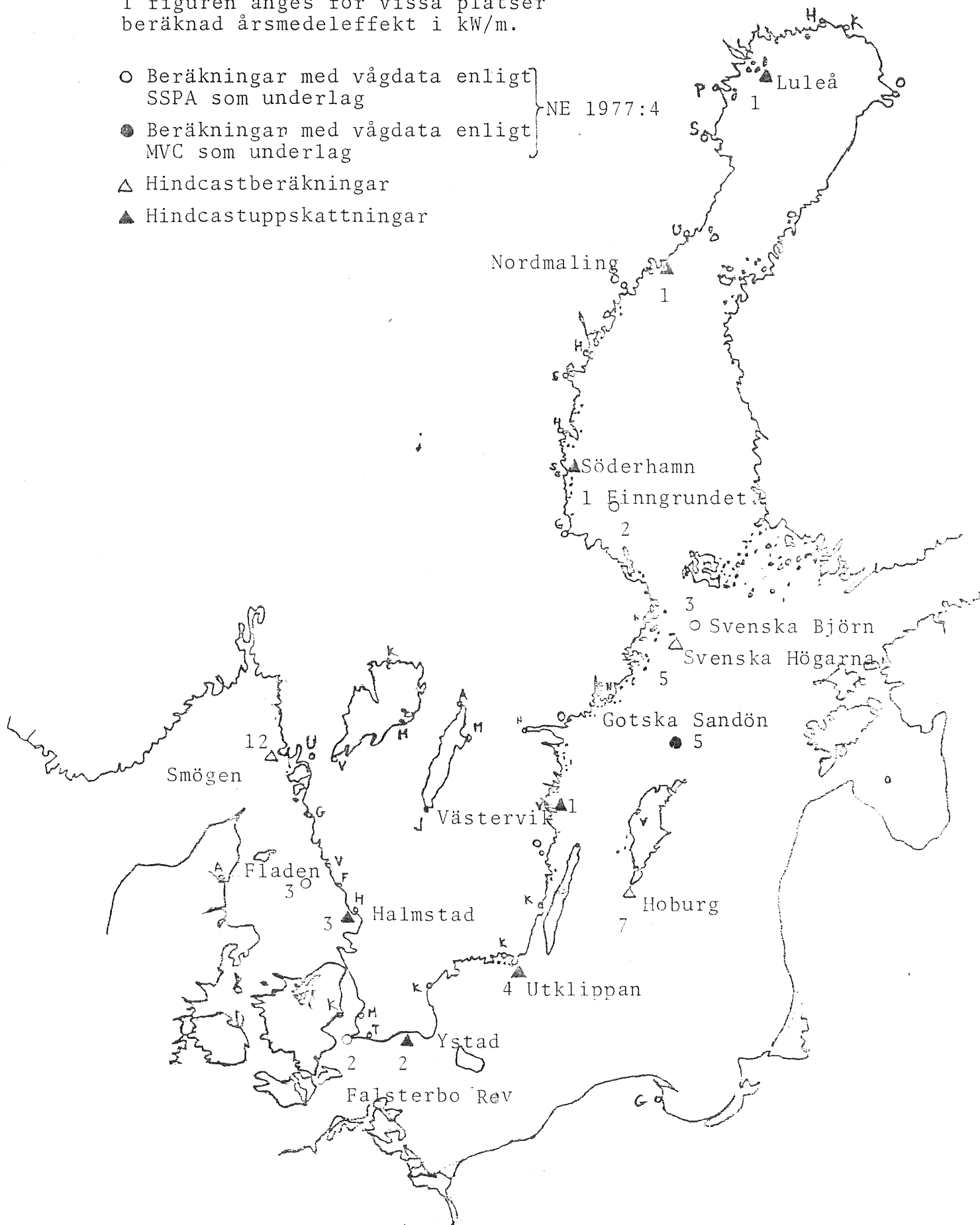


Fig 6.4



I tabell 6.6 beräknas bruttoenergipotentialen för hela kusten. Denna har indelats i delsträckor enligt fig 6.5. I tabellen anges kuststräckans längd, årsmedel-effekt, reduktionsfaktorn  $\kappa$ , antal månader då kuststräckan är istäckt (L=lindrig vinter, N=normal vinter, S=svår vinter), den isfria tiden beräknad som medelvärde över 17 år, se Sjöfartsverkets meddelande nr 4 (1977) sid 60, där andelen L, N och S kan beräknas till 41 %, 37 % resp 22 %. I sista kolumnen anges totala energiinnehållet på varje delsträcka beräknad som  $E = L \cdot p \cdot \kappa \cdot t_{\text{isfria}}$

Summering göres för varje havsområde. Indelningen i havsområden framgår av fig 6.5.



Fig 6.5

Tabell 6.6 Beräkning av bruttoenergipotential

Delsträcka nr	L km	p kW/m	$\kappa$	isvintrar mån			isfri tid tim/år	Brutto- energi TWh
				L	N	S		
Skagerrak								
1	150	10	0.95			1	8600	<u>12.3</u>
								12.3
Kattegatt								
2	150	3	0.90			2	8440	3.4
3	41	3	0.90			2	8440	<u>0.9</u>
								4.3
Sö Östersjön								
4	89	2	0.80			1	8600	1.2
5	77	3	0.80				8760	1.6
6	120	4	0.85				8760	<u>3.5</u>
								6.3
Ostkusten								
7	150	5	0.85				8760	5.5
8	30	1	0.90		2	2	7900	0.2
9	110	1	0.95	1	2	2	7600	0.8
10	89	2	0.90	1	2	2	7600	1.2
11	110	4	0.85	1	2	2	7600	<u>2.8</u>
								10.5
Bottenhavet								
12	71	2	0.80	2	2	3	7140	0.8
13	59	2	0.75	2	2	3	7140	0.6
14	65	1	0.70	2	2	3	7140	0.3
15	120	1	0.70	2	3	4	6710	0.6
16	110	1	0.85	3	4	5	5980	0.6
17	83	1	0.85	3	4	5	5980	<u>0.4</u>
								3.3
Bottenviken								
18	71	1	0.85	4	5	6	5250	0.3
19	65	1	0.85	4	5	6	5250	0.3
20	59	1	0.85	5	6	7	4520	0.2
21	53	1	0.85	7	8	9	3060	<u>0.1</u>
								0.9
Gotland								
22	71	5	0.75			2	8440	2.2
23	89	4	0.75			2	8440	2.3
24	100	6	0.80				8760	4.2
25	110	6	0.80				8760	4.6
26	47	2	0.75				8760	0.6
27	59	3	0.75			1	8600	<u>1.1</u>
								15.0

De sammanfattade summorna är redovisade i fig 6.6.

Tillgänglig bruttoenergipotential

I praktiken är det ej möjligt att tillgodogöra sig hela bruttoenergipotentialen. Stora områden måste undantas från exploatering p g a framför allt ishinder och fiskeverksamhet.

De olika områdena antas kunna utnyttjas enligt dels ett lågalternativ dels ett högalternativ. Utnyttjandegraden anges i procent av tillgänglig vågenergi och innebär med den använda beräkningsmetoden hur lång total sträcka som utnyttjas jämfört med hela sträckan. Vid bedömningen tas hänsyn till fiskeverksamhetens intensitet, vågeffektens storlek (ett område med hög vågeffekt är intressantare att utnyttja) samt ishinder m m.

Tillgänglig nettoenergipotential

Detta kan exemplifieras med kraftverk av den typ (NEL-OWC) som beskrivs i kap 7.3. Med den föreslagna ganska glesa strukturen fås en kraftverkslinje en längd  $L = (n \cdot 1.0 + 0.4) \text{ km}$ , där  $n$  är antalet kraftverksgrupper om sex enheter med en sammanlagd medeleffekt på 800 kW/st. Med en infallande vågeffekt på 10 kW/m kan verkningsgraden tecknas som

$$\eta = \frac{8}{100 + \frac{40}{n}}$$

$$\eta_{\max} < 8 \%, \text{ för } n = 1 \text{ erhålles } \eta = 5.7 \%$$

Härav följer att kraftverken kan läggas i flera parallella linjer och fortfarande leverera nästan full effekt.

I tabell 6.7 visas vilken medeleffekt varje linje i ett kraftverk bestående av 5 enheter levererar.

Totala kraftverkslängden blir 5.4 km.

Infallande effekten är 54 MW och verkningsgraden hos en rad är

$$\eta = 7.4 \%$$

Tabell 6.7 Exempel på effektupptagning hos kraftverksrader

Rad nr	Erhålles MW	Utnyttjas MW	Lämnas MW
1	54.0	4.0	50.0
2	50.0	3.7	46.3
3	46.3	3.4	42.9
4	42.9	3.2	39.7
5	39.7	2.9	36.8

1-5                      54                      17.2                      36.8

Totalverkningsgraden blir  $17.2/54=0.32$

Exemplet ovan visar att ett rimligt antagande om totalverkningsgraden bör ligga mellan 30% och 60% beroende på hur kompakt kraftverket är och på hur effektiva de enskilda omvandlarna är.

I tabell 6.8 anges för varje havsområde den beräknade bruttoenergipotentialen, en uppskattning av sammanlagda bruttoenergipotentialen hos de avsnitt som bör kunna utnyttjas, samt motsvarande nettoenergipotential, som beräknats genom multiplikation med en vald totalverkningsgrad. Dessutom noteras i en kolumn de väsentligaste hindren för utnyttjande av vågenergi inom området.

Om kraftverk placeras även långt ute till havs (>50 km från land) ökas potentialen avsevärt. Någon beräkning av denna potential har ej gjorts men den bör vara av samma storleksordning som den för kustområdena beräknade. Kostnaden för utnyttjande blir dock större.

### Sammanfattning

Den tillgängliga nettoenergin i svenska kustvatten bedöms vara mellan 3 och 15 TWh per år och sannolikt lika mycket till om havsområden långt från land utnyttjas. En eventuell utbyggnad måste ske succesivt och det skulle ta lång tid att nå det högre värdet.

Tabell 6.8 Energipotential

Område	Längd km	Bruttoenergi TWh	Tillg. bruttoenergi				Nettoenergi				Huvudsaklig begränsning
			Lågalt. %	Högalt. %	Lågalt. TWh	Högalt. TWh	Lågalt. TWh	Högalt. TWh			
Skagerrak	150	12.1	30	50	3.6	6.1	30	60	1.1	3.7	fiske
Kattegatt	191	4.4	0	20	0	0.9	0	60	0	0.5	fiske, lite energi
Sö Östersjön	286	6.4	20	60	1.3	3.8	30	60	0.4	2.3	
Ostkusten	489	10.7	20	40	2.1	4.3	30	60	0.6	2.6	
Gotland	476	15.0	30	60	4.5	9.0	30	60	1.4	5.4	
Bottenhavet	508	3.3	0	30	0	1.0	0	60	0	0.6	is
Bottenviken	248	1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	is, lite energi
	2348	52.9			11.5	25.1			3.5	15.1	

2.6 kW/m år

I figuren anges för varje havsområde dels bruttoenergin i TWh (överst), dels lågalternativ resp högalternativ för nettoenergin (underst).

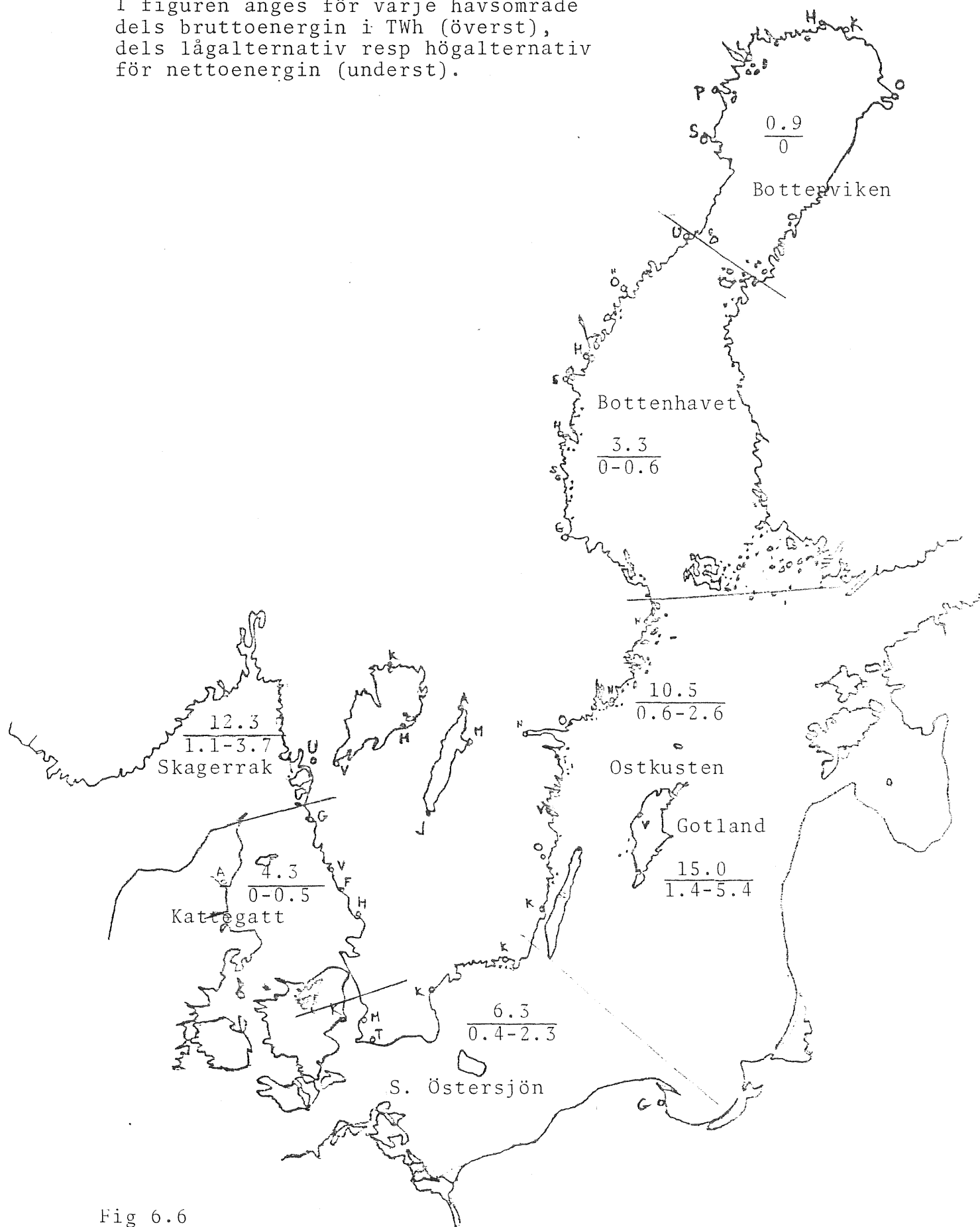


Fig 6.6

## Kusttäckning

Med utgångspunkt från tabell 6.6 har diagrammet i figur 6.9 upprättats. Diagrammet visar hur lång kuststräcka som vid ett visst utnyttjande motsvarar en viss energipotential. Utnyttjandegraden beror dels på vilken kusttäckning som en utbyggnad med vågkraftverk skulle medföra dels på vilken verkningsgrad kraftverken har. Verkningsgraden som i sin tur beror dels på de enskilda omvandlarnas effektupptagningsförmåga dels på hur många rader av omvandlare som placeras inom samma kuststräcka.

Begreppet kusttäckning illustreras av figur 6.7, som visar att 100% kusttäckning inte nödvändigtvis innebär total avstängning.

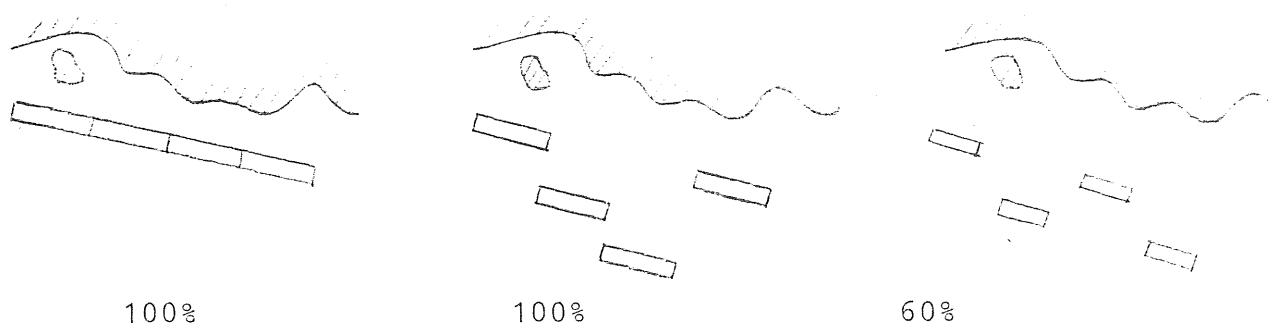


Fig 6.7 Exempel på olika grader av kusttäckning

I diagrammet fig 6.8 visas några olika alternativ. Vattenområden långt från land ( $>50$  km) är ej medräknade. Alternativen har följande innebörd.

Stor kusttäckning	20-60% av kustlinjen tas i anspråk
Liten kusttäckning	0-30% av kustlinjen tas i anspråk
	Bottenviken är ej i något fall medtaget.
Hög verkningsgrad	60% totalt
Låg verkningsgrad	30% totalt

I diagrammet är successivt allt vågenergifattigare havsområden tagna i anspråk. Detta innebär att havsområden utanför Bohuslän och Gotland ligger till vänster i diagrammet medan Bottenviken som ju inte ger något nettobidrag, ligger till höger.

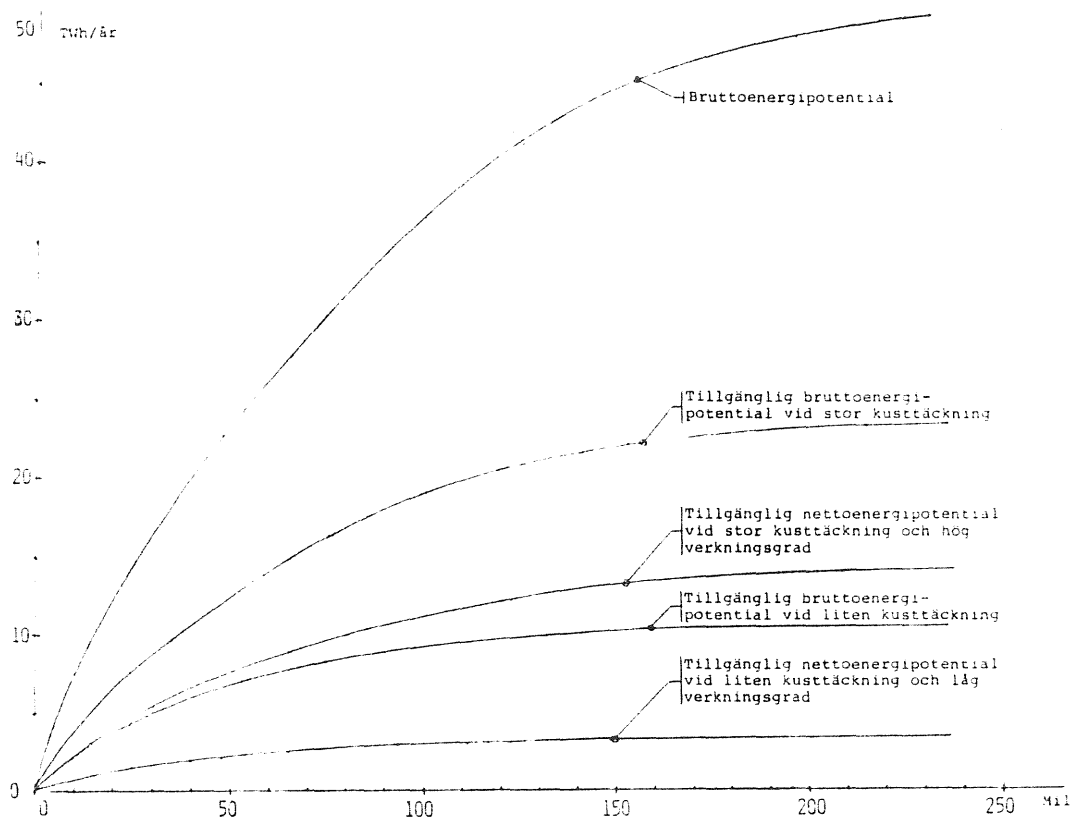


Fig 6:8

Vågenergipotential som funktion av ianspråktagen kuststräcka.



7 BERÄKNAD ENERGIKOSTNAD M M FÖR TRE OLIKA VÄGKRAFTVERK

## 7 BERÄKNAD ENERGIKOSTNAD M M FÖR TRE OLIKA VÅGKRAFTVERK

7.1 Allmänt

I det följande har tre olika förslag till vågkraftverk kostnadsberäknats för svenska förhållanden:

- kraftverk bestående av ett elektriskt kopplat system av bojar i vilka vågenergin direkt omformas till elektrisk energi i linjära generatorer. Systemet är föremål för en ingående studie inom Gruppen för Vågenergiforskning.
- kraftverk bestående av stora enkelsymmetriska omvandlare där en oscillerande vattenpelare driver luft genom en turbin. Systemet studeras av National Engineering Laboratory (NEL) i Skottland.
- kraftverk bestående av ett hydrauliskt kopplat system av pumpar som drivs av bojar vilka följer vågorna. Systemet kommer att studeras av Gruppen för Vågenergiforskning.

Det första systemet har valts för att möjliggöra en kontroll av de preliminära resultat som redovisades i Planeringsrapport NE 1977:4.

Det andra systemet har valts eftersom det bedömts som det mest lovande av de fyra projekt som brittena började studera mer ingående.

Det tredje systemet har valts för att belysa problem och kostnader för ett hydrauliskt system.

Den hydrodynamiska omvandlingen av vågenergi är likartad för de tre omvandlarna medan den vidare energiomvandlingen samt förankrings- och kabelsystem är ganska olika.

Kostnadsberäkningar av detta slag är givetvis behäftade med osäkerheter. Man vet för lite om hur pålitliga olika delar av konstruktionen är i den verkliga miljön, varför angivna livslängder måste betraktas som antaganden.

Kostnaderna för underhåll är särskilt svåra att uppskatta.

En annan svårbedömbär faktor är inverkan av tillverkning i stora serier. Hänsyn till detta har tagits genom en reduktionsfaktor som beräknats enligt de principer som beskrivs i Grupprapport 4, (1977).

De valda systemen innebär inte att det fortsatta arbetet blir begränsat till dessa eller att de är de "bästa" systemen. Kostnadsberäkningarna måste i första hand ses som exempel som bör kompletteras med undersökningar av samma slag för ytterliggare kraftverkssystem.

## 7.2 Kostnadsuppskattning av ett bojkraftverk på 9 MW, med linjära generatorer

I kapitel 5.2 bestäms nettoenergiproduktionen vid Hoburg till 52,3 MWh per år och boj. Den linjära generatoren dimensioneras för 14,4 kW vid 230 V på generatorns likspänningssida.

Bojarna antas enpunktsförankrade i parallella rader. Varje bojrad fungerar som ett filter för bakomvarande bojar. Genom anpassning av bojarnas storlek, i kraftverkets djupled, är det möjligt att uppnå samma energiupptagningsförmåga hos alla bojar.

### Kraftverkets struktur

Kraftverket består av 720 bojar utlagda på 30 m djup, 5 km från land. Hälften, 360 bojar, utgör en enhet med omriktare och transformator på land.

En bojrad består av 10 seriekopplade generatorer. 36 sådana rader parallellkopplas till samma omriktare. En bojrad blir ungefär 300 m lång. avståndet mellan raderna är 30 m, varför varje enhet upptar ca 0,32 km<sup>2</sup>. Se fig 7.1

### Elektriskt system

Den linjära synkrogeneratoren ansluts till en 3-fas diodbrygga. Tio generatorer seriekopplas på diodbryggans likspänningssida. 36 serielänkar ansluts parallellt över en omriktare.

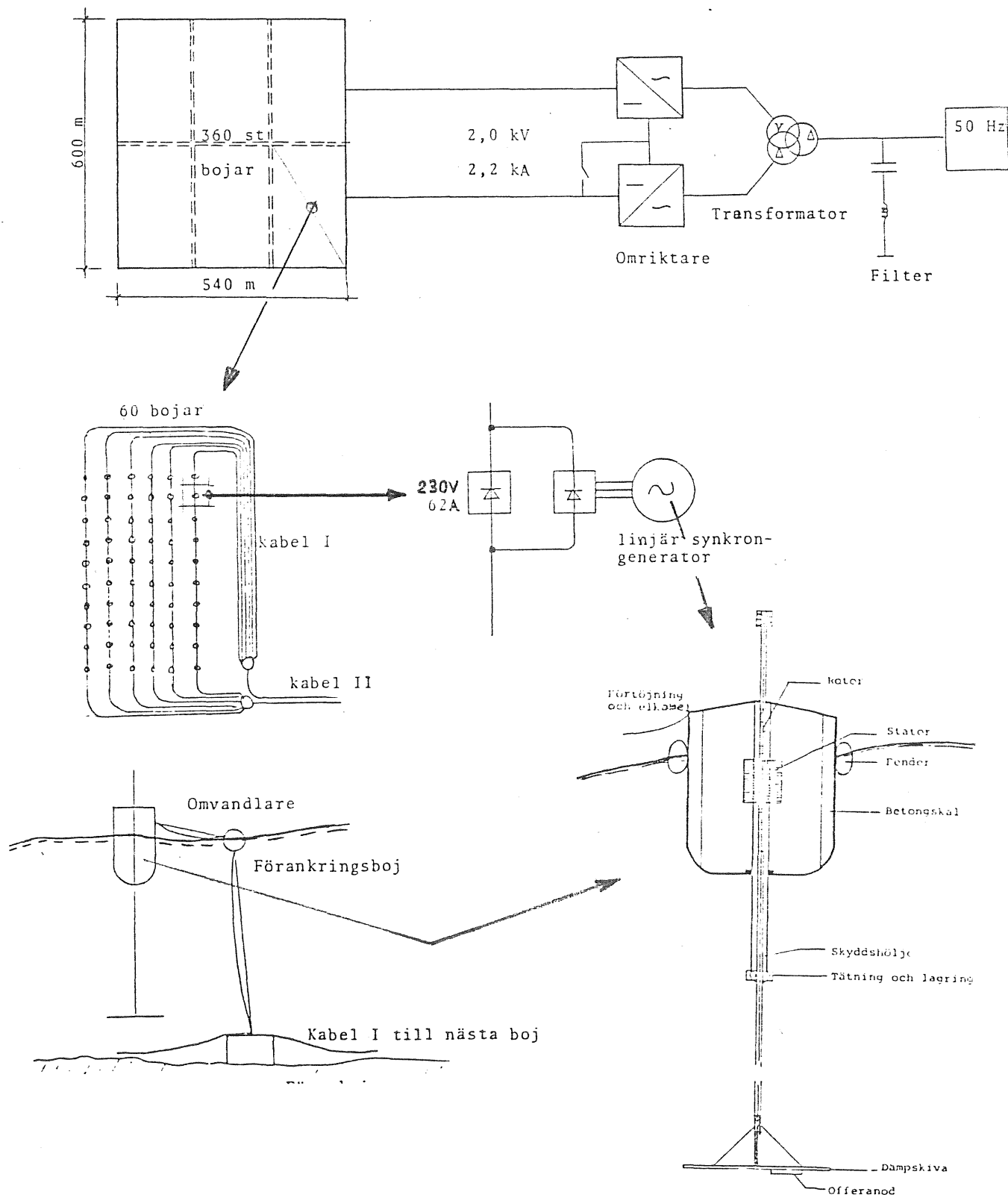
Ett enkelt utförande kan bestå av två nätkommuterade omriktare i seriekoppling. Vid låg effekt i vågorna kan den ena omriktaren förbikopplas. Effektfaktorn kan då förbättras. De två omriktarna ansluts till en transformator med två primärlindningar, Y- resp  $\Delta$ -kopplade. Denna koppling ger mindre övertoner och tillåter billigare filter.

Tomgångsspänningen 3 kV vid omriktaren bestäms av spänningen över en bojrad. De 36 raderna avger parallellt 2200 A vid 2 kV till de två omriktarna i enheten.

Kablarna mellan bojarna måste vara elastiska. Idag finns termoplastiska elastomerer (TPE) med goda elastiska egen-

skaper även vid låga temperaturer, till rimliga kostnader. Kabelanslutningen i bojen måste också tåla kabelns eviga rörelse i vågorna.

I uppskattningen av kraftverkets energiproduktion ligger de osäkerheter som nämnts i kapitel 5.2.



Figur 7.1 Kraftverksenhet 4.5 MW

Tabell 7.1

KOSTNADSBÄRARE	ENHET	MÄNGD	A-PRIS kkr	TOTALT kkr	RED FAKTOR	SLUTKOSTN kkr	ANM
<u>Elsystem (720 bojor)</u>							
Kabel I 10 mm <sup>2</sup>	km	72	10	720	1	720	TPE-kablar
Kabel II 3x300 mm <sup>2</sup>	km	40	125	5000	1	5000	Nergrävda AXKJ-kablar
Kabelutläggning	km	20	25	500	0.7	350	
Generator med lagring	st	720	45	32400	1	32400	
Omriktare med filter	st	4	170	680	1	680	
Transformatorer	st	2	300	600	1	600	
<u>Byggnader etc</u>	st	1	500	500	1	<u>500</u>	
Elsystemet totalt						40250	
Delsumma per boj						55.90	70% av totalkostnad
<u>Förankring (en boj)</u>							
Lina	m	40	0.024	0.960	1	0.960	$P_{BR} = 450 \text{ kN}$
Förankringsboj	st	1	0.300	0.300	1	0.300	syrafast stål-
Betongankare	st	1	4.00	4.00	1	4.00	lina, livslängd 3-4 år
Utläggning	mantim	2	0.8	1.6	0.7	<u>1.12</u>	
						6.38	
Delsumma per boj						6.38	8% av totalkostnad

KOSTNADSBÄRARE	ENHET	MÄNGD	A-PRIS kkr	TOTALT kkr	RED FAKTOR	SLUTKOSTN kkr	ANM
<u>Flytkropp (en boj)</u>							
Betong mtrl	m <sup>3</sup>	11	0.150	1.65	1	1.65	
Armering mtrl	ton	1	2.00	2.00	1	2.00	
Form mtrl	st	1	0.15	0.15	1	0.15	
Spännbultar	st	37	0.030	1.10	1	1.10	
Tätband	m	19	0.025	0.475	1	0.475	
Skyddstub	ton	0.3	4.00	1.20	1	1.20	
Stålstång	ton	1.3	4.00	5.200	1	5.20	
Skiva	ton	0.6	4.00	2.400	1	2.40	
Form- och arm arb	mantim	12	0.175	2.100	0.7	1.470	
Betongarb	mantim	3	0.150	0.450	0.7	0.315	
<u>Sänkesautomatik</u>	st	1	2.000	2.000	1	<u>2.000</u>	

Delsumma per boj 17.96 22% av totalkostnad

Totalsumma per boj 80.24

Beräkning av energikostnaden

Totala kostnaden är 81 kkr/boj. Utan reglering av dämpningen antas årsproduktionen bli 47.6 MWh per boj. Avskrivningstiden 25 år med 10% ränta ger en annuitet 0.11 av anläggningskostnaden. Underhållskostnaden per år uppskattas till 5% av anläggningskostnaden. Detta ger

Kapitalkostnad	0.11x81	8.91
Underhåll	0.05x81	<u>4.05</u>
		12.96

Energikostnaden blir alltså

$$\frac{12.96}{47.6} = 0.27 \text{ kr/kWh} \quad (2385 \text{ kr/kW år})$$

Detta ger en utbyggnadskostnad per kW landeffekt.

$$\frac{81000}{12.5} = 6480 \text{ kr/kW}$$

För ett bojkraftverk med linjära generatorer uppskattas energikostnaden till 0.20 - 0.40 kr/kWh.

Energianalys av bojkraftverket

Tillverkning och utläggning av ett vågkraftverk förbrukar energi, som producerats någonstans. Det måste därför, ur samhälls synpunkt, vara intressant att ta reda på kraftverkets energiförbrukning vid tillverkningen. Känner man kraftverkets årsproduktion av energi, kan energiåterbetalningstiden bestämmas. Denna anger hur lång tid samhället lånar energi till kraftverket. Rimligen måste energiåterbetalningstiden vara kortare än kraftverkets livstid, annars är kraftverket ingen egentlig energikälla.

I beräkningarna har energiåtgången i material uppskattats till 94 MWh per boj, se tabell 7.1 b. Antas energiförbrukningen för transporter och bearbetning utgöra 20% av denna energimängd, uppgår totala förbrukningen till 114 MWh per boj.

Med en uppskattad energiproduktion av 25 - 70 MWh per boj och år, blir energiåterbetalningstiden 6 - 2 år. Härvid har ingen hänsyn tagits till eventuellt restvärde iskrot från kraftverket.



Tabell 7.1 b Energiåtgång vid tillverkning av ett bojkraftverk

KRAFTVERKSDEL	ENHET	MÄNGD	A-PRIS MWh	TOTALT MWh	ENERGIÅTGÅNG MWh	ANM
<u>Elektriska systemet (en boj)</u>						
Generator, stål koppar	ton	1.9	10	19	19	
Kabel I koppar	m <sup>3</sup>	0.001	71	0.071	0.071	
Kabel II aluminium	m <sup>3</sup>	36/720	85	4.25	4.25	
Kabel II plast	ton	100/720	11	1.53	1.53	
Transformatorer	ton	18/720	10	0.25	0.25	
					25.1	27% av totalenergin
<u>Förankring (en boj)</u>						
Lina, stål	ton	0.16	10.5	1.68	1.68	
Förankringsboj, plast	ton	0.01	11	0.11	0.11	
Betongankare	m <sup>3</sup>	35	0.46	16.1	16.1	
Armering, stål	ton	1.05	10.5	11	11	
					28.89	31% av totalenergin
<u>Flytkropp (en boj)</u>						
Betong	m <sup>3</sup>	11	0.46	5.0	5.0	
Stål	ton	3.31	10.5	34.77	34.77	
Tätband, plast	ton	0.01	11	0.11	0.11	
					39.88	42% av totalenergin
					Total energimängd i material 94MWh	

Källa: Byggandets energiprofil. Bfr art nr 6503707 T7 1978 ISBN 91-540-2814-0

### 7.3 Vågkraftverk enligt NEL-OWC

#### NEL:s modell

NEL har bl a utfört modellförsök i en ränna med en modell med principiell utformning enligt figur 7.2

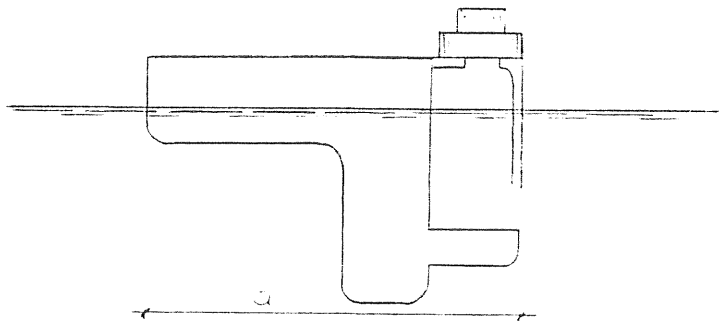


Fig 7.2

Principiell tvärsektion av kraftverksmodul av samma typ som NEL:s modell. Måttet  $a = 250$  mm i modellförsöket.

#### Modellens verkningsgradskurvor

Modellförsök har utförts med två typer av förankring. Dels en fritt flytande konstruktion dels en styvt förankrad konstruktion.

Den av modellerna upptagna och dissiperade effekten per breddenhet  $p_h$  dividerat med den mot modellerna infallande vågeffekten  $p$  (kW/m) kallas den hydrodynamiska verkningsgraden,  $\eta$ .

$$\eta = \frac{p_h}{p} \quad (7.1)$$

Den hydrodynamiska verkningsgraden har undersökts för regelbundna vågor vid olika frekvenser. För en fritt flytande konstruktion erhöles den heldragna kurvan och för den styvt förankrade den streckprickade enligt figur 7.3

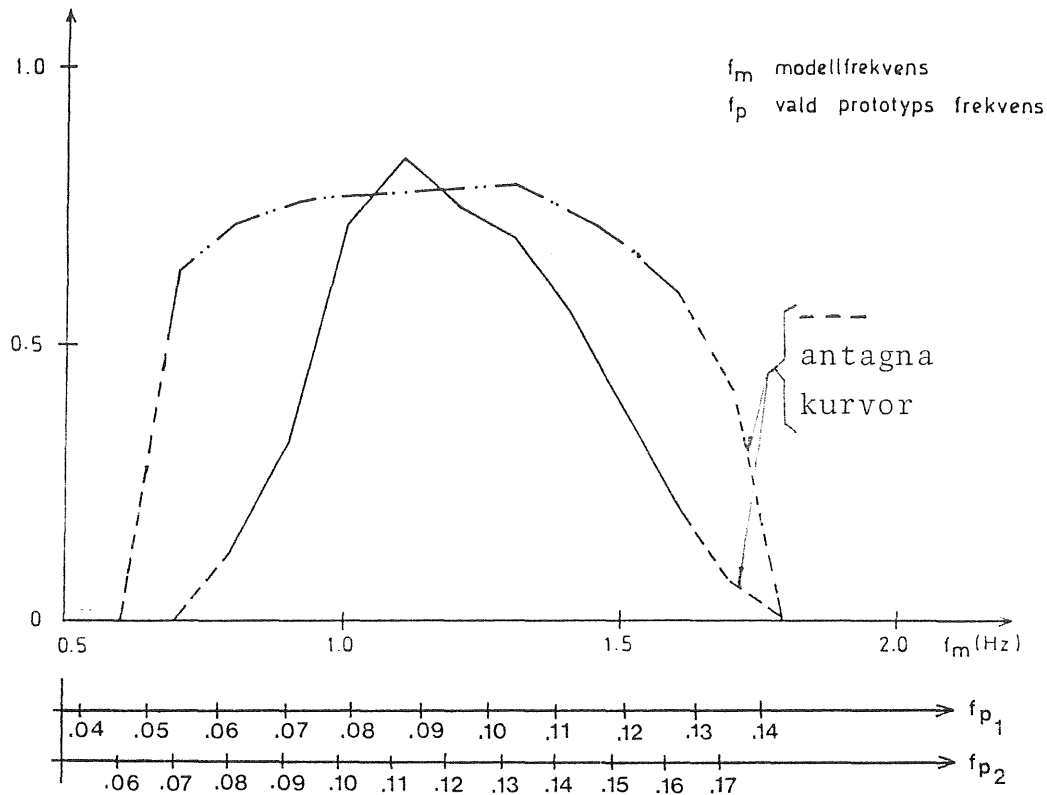


Fig 7.3 Verkningsgradskurvor NEL  
 Helderagen kurva: Fritt flytande konstruktion  
 Streckprickad kurva: Styvt förankrad konstruktion.

#### Uppskalningsprincip

Förhållandet mellan längden i prototypen  $L_p$  och i modellen  $L_m$  är den geometriska skalfaktorn.

$$\alpha_L = L_p / L_m \quad (7.2)$$

Frekvensskalan blir då enligt Froudes modellregel

$$f_m / f_p = \sqrt{\alpha_L} \quad (7.3)$$

Anpassning av prototypernas verkningsgradskurvor till vågklimatet utanför Smögen

Den inkommande årseffektens medelvärde  $p(f)$  för olika frekvensband ges för Smögen i kapitel 6.

Genom att anpassa prototypernas verkningsgradskurvor till effekttäthetsfördelningen hos frekvensbanden erhålles den upptagna medeleffekten för varje frekvensband enligt nedanstående tabell.

Tabell 7.2 Beräkning av upptagen effekt för varje frekvensband  $f$

$f$ (Hz)	$p(f)$ (kWs/m)	$\eta_1$	$\eta_2$	$p_1(f)$ (kWs/m)	$p_2(f)$ (kWs/m)
0.06	--	0.06	0.00	--	--
0.07	--	0.27	0.63	--	--
0.08	336.7	0.72	0.71	242.2	239.0
0.09	262.6	0.81	0.75	212.7	196.9
0.10	188.5	0.72	0.76	135.7	143.3
0.11	134.5	0.59	0.77	79.4	103.6
0.12	80.5	0.38	0.78	30.6	62.8
0.13	52.3	0.16	0.79	8.4	41.3
0.14	24.0	0.03	0.74	0.7	17.8
0.15	19.1	0.00	0.68	0.0	13.0
0.16	14.3	0.00	0.59	0.0	8.4
0.17	11.7	0.00	0.42	0.0	4.9
0.18	9.2	0.00	0.00	0.0	0.0

Den totalt upptagna medeleffekten fås då som summan av frekvensbandens medeleffekt multiplicerad med frekvensintervallet  $\Delta f = 0.01$  Hz

$$p_h = \sum_{f=0}^{\infty} \eta(f) \cdot p(f) \cdot \Delta f \quad (7.4)$$

Den upptagna medeleffekten för den fritt flytande konstruktionen skulle då enligt dessa beräkningar bli 7.10 kW/m och för den styvt förankrade 8.31 kW/m.

Prototypernas storlek

Anpassningen mellan verkningsgradskurvorna och våg-effektspektrum ger frekvensskalan för respektive konstruktion.

För den fritt flytande konstruktionen erhålls då enligt ekvation 7.3 frekvensskalan

$$\alpha_L = \left(\frac{f_m}{f_p}\right)^2 = \left(\frac{1,0}{0,08}\right)^2 = 156$$

Prototypens mått a fig 7.2 blir då enligt ekv 7.2

$$156 \times 0,25 \text{ m} = 39 \text{ m}$$

För den styvt förankrade konstruktionen erhålles på motsvarande sätt a till 25 m.

Reduktion av upptagbar effekt på grund av riktningsberoende

På grund av att prototypen inte har förmåga att uppta den inkommande effekten från alla riktningar måste denna placeras så att öppningen riktas mot den förhärskande vågriktningen. Denna har för Smögen beräknats till VSV (248°). Kraftverket bör således förläggas med sin längdaxel vinkelrätt mot denna riktning d v s i 158° - 338° enl fig 7.4

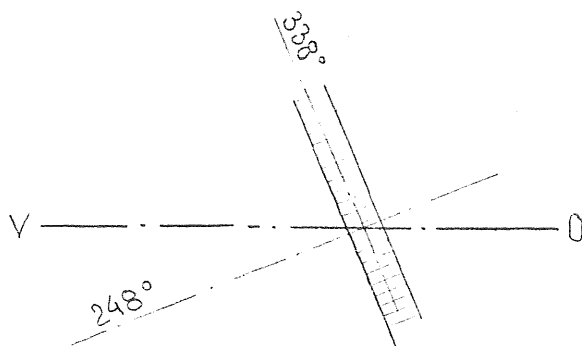


Fig 7.4

Prototypernas placering i förhållande till förhärskande vågriktning.

Den utnyttjbara effekten har reducerats enligt de principer som redovisas i kap 6

Med dessa uppskattningar blir den totala reduktionsfaktorn  $\mathcal{K}$  för konstruktionens riktningsberoende enligt tabell 7.3

Tabell 7.3

riktning	p kW/m	red faktor $\mathcal{K}$	uttagbar effekt p · $\mathcal{K}$ kW/m
28°	0.1	0.00	0.0
67°	0.0	0.00	0.0
113°	0.0	0.00	0.0
158°	0.1	0.20	0.0
203°	0.6	0.85	0.4
248°	7.8	1.00	7.8
293°	2.9	0.85	2.2
338°	0.1	0.20	0.0
	$\Sigma$ 11.6		$\Sigma$ 10.4

$$\text{Total reduktionsfaktor } \mathcal{K} = \frac{10.4}{11.6} = 0.90$$

#### Genererad effekt

Den totala verkningsgraden hos turbin och generator har uppskattats till 60 %. Med dessa uppskattningar som grund blir den genererade årsmedeleffekten från den fritt flytande konstruktionen

$$7.10 \cdot 0.9 \cdot 0.6 = 3.83 \text{ kW/m}$$

För den styvt förankrade konstruktionen blir den genererade årsmedeleffekten

$$8.31 \cdot 0.9 \cdot 0.6 = 4.49 \text{ kW/m}$$

#### Beräkning av dimensionerade vågeffekt

Vid de svåraste stormarna under 1978 uppgick  $H_s$  till 5.125 m och  $T_z$  till 9.25 s. Dessa stormar hade en sammanlagd varaktighet av ca 60 timmar under 1978. Vid dessa tillfällen skulle den fritt flytande konstruktionen maximalt ha upptagit 66 kW/m och den styvt förankrade 86 kW/m.

Beräkning\_av\_generators\_märkeffekt

För att generatorn skall kunna arbeta vid stormtillfällena med

$$H_s = 5.125 \text{ m och } T_z = 9.25 \text{ s}$$

behöver dess märkeffekt vara 60 % av den dimensionerande vågeffekten enligt antagandet ovan om turbinens verkningsgrad. Således behöver märkeffekten för den fritt flytande konstruktionens generator vara 40 kW/m och för den styvt förankrade 52 kW/m.

### Kraftverkets utformning

En kraftverksenhet (längd = 32 m) består av åtta moduler. En modul utgöres av en flytkropp och ett maskineri. Flytkroppen med tvärsektion enligt figur 7.5 och med en bredd = 4 m tillverkas i betong. Modulerna spänns ihop med spännbalkar.

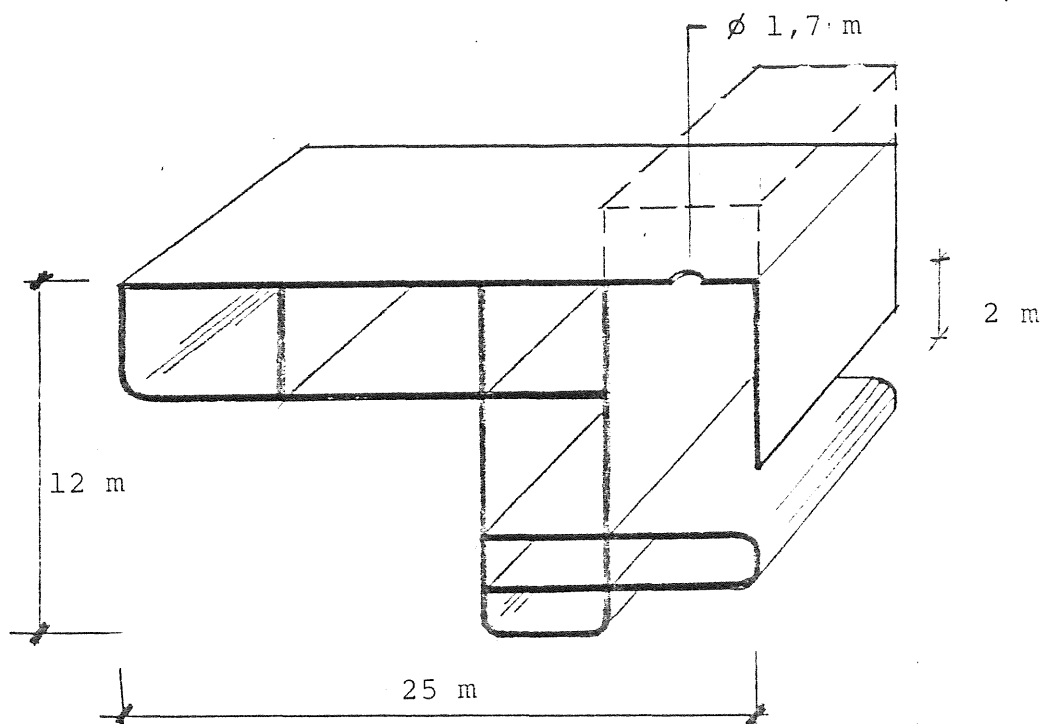


Fig 7.5 Tvärsektion med huvudmått.

Maskineriet består av:

Ventilsystem

Turbin

Turbinhus

Generator

Intern elektronik



Ventilsystem enligt Masudas princip, Meeres Technik 10 (1979), se figur 7.6.

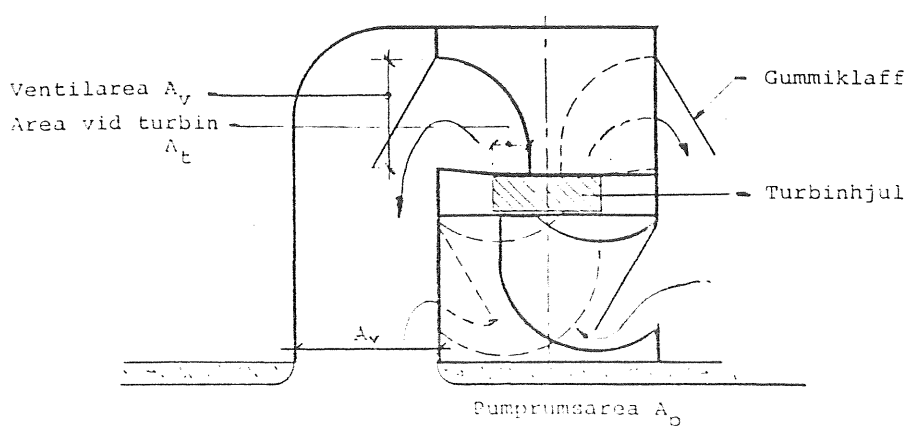


Fig 7.6 Ventilsystem

Om man sätter pumprumsarean till 1 ( $A_p = 1$ ) gäller följande ungefärliga förhållande:

$$A_t = 0.1 \times A_v; \quad A_v = 0.1 \times A_p;$$

$$A_p = 24 \text{ m}^2; \quad A_v = 2.4 \text{ m}^2; \quad A_t = 0.24 \text{ m}^2$$

Turbinhuset tillverkas i stål. Som turbin har valts en reverserad luftfläkt med diametern 1000 mm.

Generatoren är en konventionell synkrogenerator med märkeffekten 160 kW. Normalt varvtalsområde 600 - 1500 rpm.

Den angivna växelspanningen likriktas vid generatoren via en likriktarbrygga till likspänning. Därefter seriekopplas de åtta generatorerna till en enhet, se figur 7.7

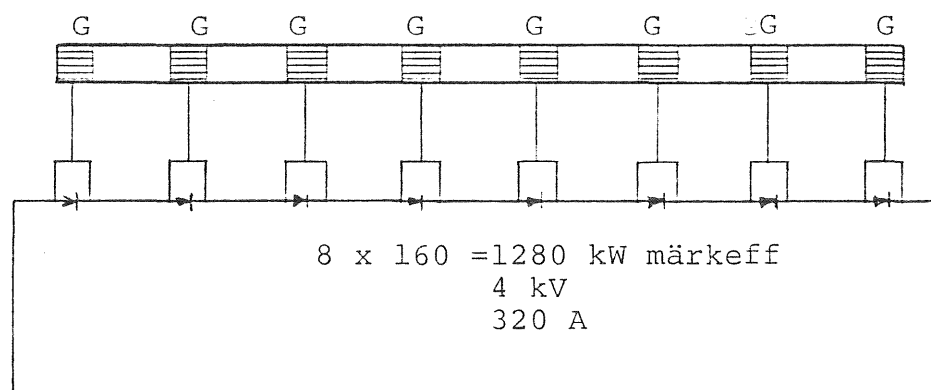


Fig 7.7 Kraftverksenhet med åtta generatorer seriekopplade.

Varje generator är shuntkopplad med en diod, så att ett avbrott i generatorkretsen ej medför strömavbrott i generatorns tilledningar. För funktionskontroll finns ett larmsystem för varje enhet. Varje enhet är försedd med markeringsljus.

#### Kraftverkets placering och konfiguration

Kraftverket är i detta exempel placerat väster om Smögen, ungefär 7 km ut från kusten, se figur 7.8 och med sin längdriktning i NNW - SSO. Vattendjup 60 - 70 m.

Den dominerande vågriktningen var under 1978 VSV (89 % av året).

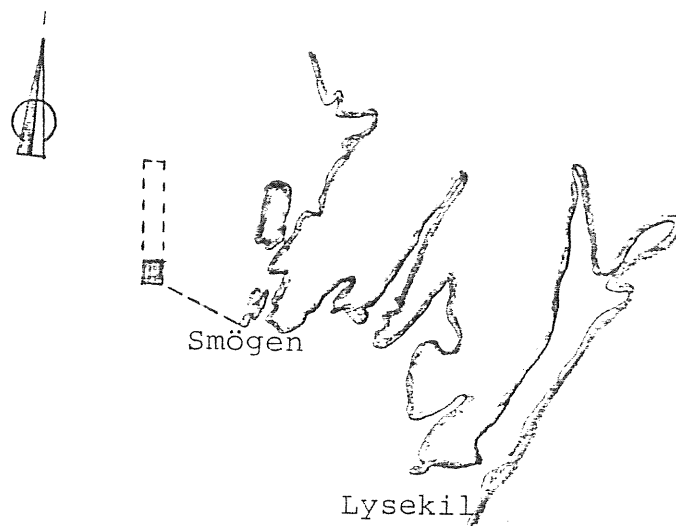


Fig 7.8 Kraftverkets placering

Sex enheter seriekopplas och har en gemensam kabel till land (24 kW), se figur 7.9. Denna del utgör således ett kraftverk med märkeffekten 7.68 MW och har en geografisk utbredning av  $(1.4 \times 1.4) \text{ km}^2$  (inkl 200 m säkerhetszon).

Varje enhet är förankrad i fyra punkter via en flytboj till ett bottenankare, se figur 7.9

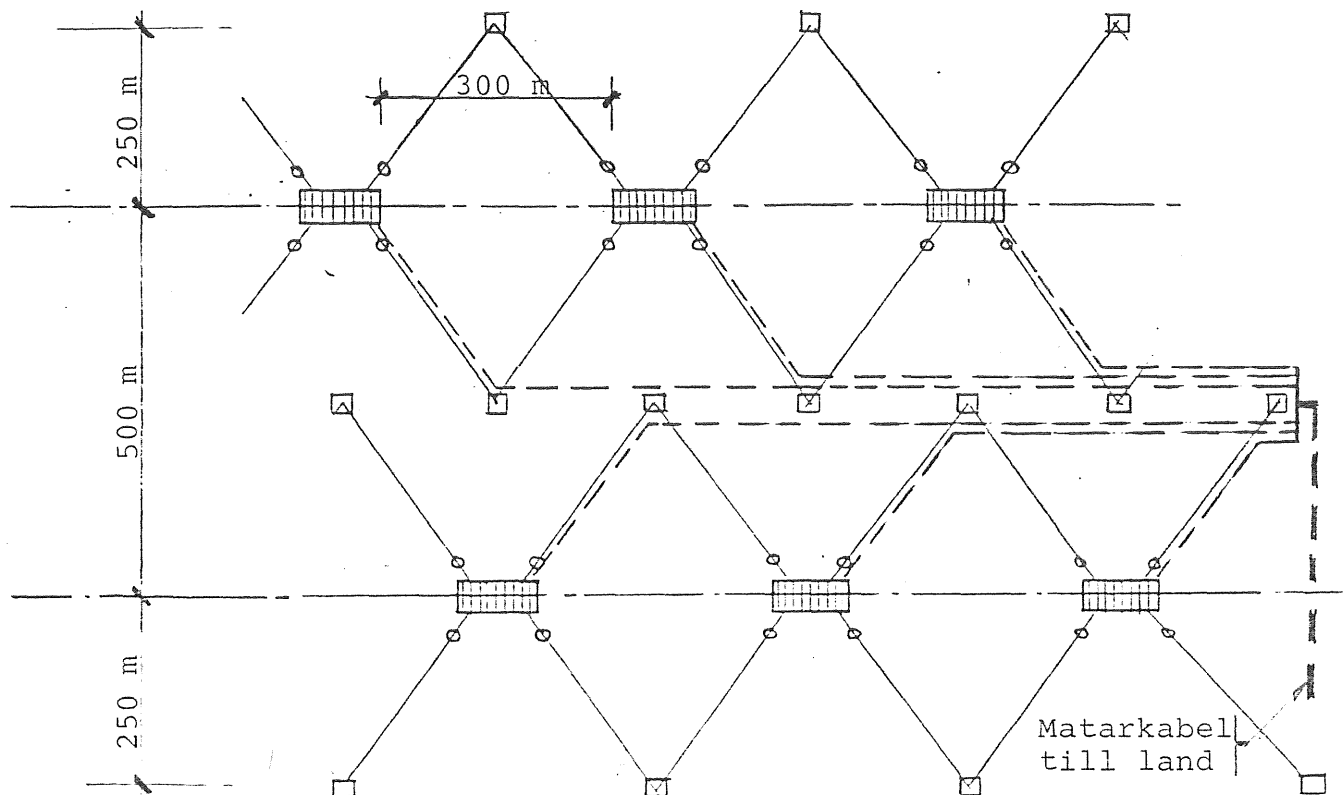


Fig 7.9 Kabel- och förankringssystem

Förankringen utgöres av vajer i övre delen och kätting i nedre delen. Bottenförankringen kan vara en betongvikt eller en fastgjuten bergförankring, beroende på bottenförhållande.

Dimensionerande kraft i linorna kan uppskattas till 6000 kN/lina.

Anläggningen i land utgöres av byggnader för transformatorer och omriktare. Byggnaderna tänkes ligga i omedelbar närhet till landanslutningen av matarkablar.

#### Anläggningskostnader

Anläggningskostnaderna är sammanställda i tabell 7.4. De redovisade kostnaderna gäller för en enhet om åtta moduler (åtta generatorer). Angivna kabel- och linmängder avser kostnadsandel per enhet. Anläggningskostnaderna för byggnader och installationer i land är även redovisade per enhet.

Vid tillverkning av delkomponenter som göres i ett stort antal enheter, kan man reducera tillverkningskostnaden för en komponent efter ett antal producerande enheter (Grupp-rapport 4). Detta har medtagits i kostnadskalkylen och angivits med en reduktionsfaktor.

Tabell 7. 4

KOSTNADSBÄRARE	ENHET	MÄNGD	A-PRIS kr	TOTALT kr	RED FAKTOR	SLUTKOSTN kr	ANM	
<u>Kraftverksenheten (8 moduler)</u>								
Betong mtrl	m <sup>3</sup>	1100	160		1.0	176000		
Armerings mtrl	ton	66	1800		1.0	118800		
Form mtrl x)	st	8	3600		1.0	28800	x) En formsättning anses förbrukad efter 100 gjutningar. Priset avser andel per modul	
Spännkablar	m	2880	60	172800	1.0	172800		
Låsförband	st	7	8000	56000	0,9	50400		
Tätband	m	750	30	22500	1.0	22500		
Form och arm arb	mantim	720	175	126000	0.7	88200		
Betong arb	mantim	460	150	69000	0.7	62100		
					Delsumma	719600		24 % av totalsummar
<u>Maskineri</u>								
Turbin	st	8	12000	96000	0,8	76800		
Turbinhus	st	8	22000	176000	0,9	158400		
Ventilklaffar	st	32	700	22400	0,8	17900		
Generator	st	8	72000	576500	0,8	460800	Märkeffekt 180 kW	
Ihopmontering	mantim	640	175	112000	0,7	78400		
					Delsumma	792300	26 % av totalsummar	

KOSTNADSBÄRARE	ENHET	MÄNGD	A-PRIS kr	TOTALT kr	RED FAKTOR	SLUTKOSTN kr	ANM
Trp						1 511900	
<u>Elsystem</u>							
Internt elsystem	st	8	1500	12000	1,0	12000	
Signalelektronik	st	8	1000	8000	1,0	8000	
Markeringsljus				2500	1,0	2500	
Kablar till matarkabel	m	380	90	34200	1,0	34200	
Matarkabel mtrl x)	m	1350	350	472500	1,0	472500	x) Gemensam matarkabel för 6 enheter (24 kW)
Installationer	Mantim	120	175	21000	0,8	<u>16800</u>	
					delsumma	546000	19 % av totalsumma
<u>Förankring</u>							
Bottenförankring	st	2	90000	180000	1,0	180000	
Fastsättning	mantim	40	800	32000	0,7	22400	Dykeriarbete
Förankringslinor	m	500	750	350000	1,0	<u>350000</u>	
					delsumma	552400	19 % av totalsumman
<u>Utläggning</u>							
Montering av ankarlinor	mantim	40	800	32000	0,8	25600	
Kabeldragning inkl schakt	mantim	30	2000	60000	1,0	60000	x) Gemensam för samtliga matarkablar
Montering och utbogsring av en enhet	mantim	32	800	12800	1,0	<u>25600</u>	
					delsumma	111200	4 % av totalsumman

KOSTNADSBÄRARE	ENHET	MÄNGD	A-PRIS kr	TOTALT kr	RED FAKTOR	SLUTKOSTN kr	ANM
Trp						2 721580	
<u>Anläggning i land</u>							
Byggnader			30000		1.0	30000	
Omriktare Transformatorer			160000		1.0	160000	Kostnadsandel för en enhet
Övrigt			50000		1.0	<u>50000</u>	
					delsumma	240000	8 % av totalsumma
TOTAL ANLÄGGNINGSKOSTNAD						2 961500	

Anläggningens drifts- och underhållskostnader antas per år vara 8 % av anläggningskostnaden  $(0,08 \cdot 2\,961\,500) = 236\,920:-$ . Administrations- och distributionskostnader är ej medräknade i kalkylen.

En kraftverksenhet med märkeffekten 1 280 kW (åtta generatorer) kommer i medeltal under året att producera 135 kW. Kraftverket antas vara styvt förankrat (jfr verkningsgradskurvan).

Utbyggnadskostnaden per kW (märkeffekt) blir således  $2\,961\,500/1\,280 = 2\,314$  kronor.

Den installerade effektens årskostnad blir då  $(0,08 \cdot 2\,961\,500 + 0,11 \cdot 2\,961\,500) / 1280 = 439$  kr/kW (märkeffekt).

Vid en årsdrift om 8 760 tim produceras 1,18 GWh till en kostnad av 0,48 kr/kWh (4 204 kr/kWår).

Annuiteten har satts till 11 % (10 % räntesats och 25 års amortering). Energikostnaden kan således sättas till 0,35-0,55 kr/kWh.

## 7.4 Vågkraftverk med vatten som energibärare

### Funktion och utformning

Till ett flertal bojar som rör sig med vågorna kopplas pumpar som driver vatten genom ett rörsystem till en vattenturbin med generator. Se fig 7.10

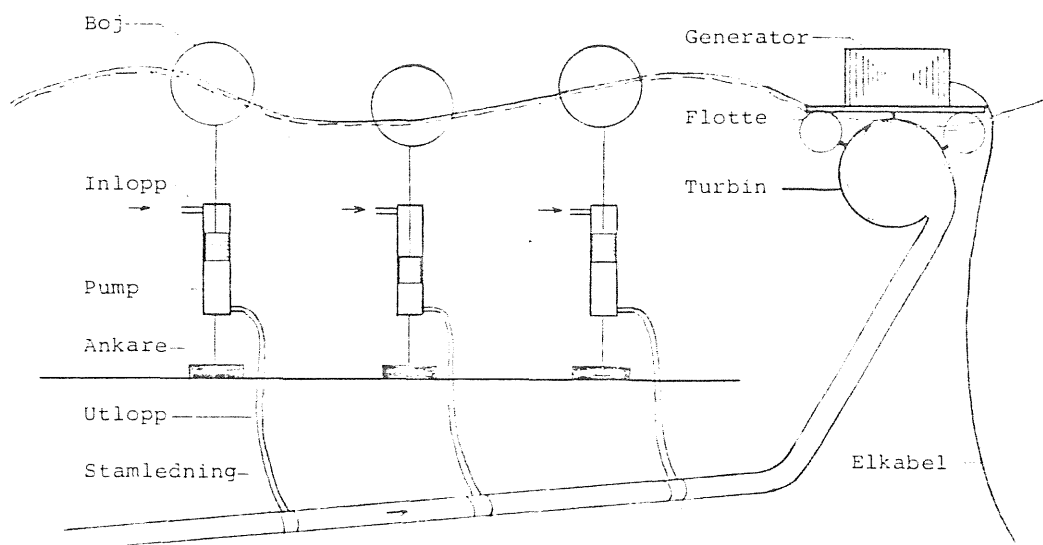


Fig. 7.10 Hydrauliskt system

### Pumpen

Som pumpelement har valts en så kallad petropump tillverkad av en speciell slang som vid töjning minskar sin inneslutna volym. Slangen kan töjas 10-15 %.

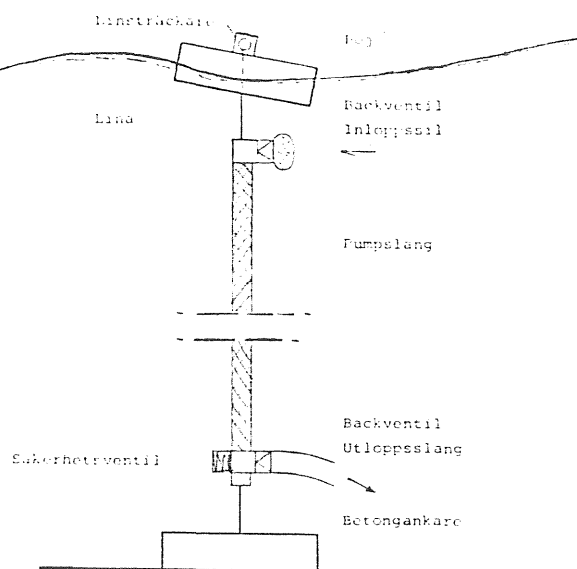


Fig. 7.11 Boj med petropump



I slangens ändrar sitter backventiler samt en inloppsil vid intag och en säkerhetsventil vid uttaget. Det nedre ventilpaketet förankras antingen genom särskilt ankare eller med hjälp av stamledningen. Eventuellt måste slangerna ha någon form av förlängningsbegränsare.

Denna typ av pump är enkelverkande d v s den pumpar endast under förlängningen. Med ett tillräckligt stort antal pumpar i serie torde ändå flödet bli relativt jämnt.

Bojen dimensioneras så att den belastar pumpen med lagom stor kraft och ger den tillräckligt stor slaglängd.

För att pumpen skall arbeta under hela den rörelsefas när bojen rör sig uppåt erfordras att slangerna ej är slak i vågdalen. Därför behövs en anordning som sträcker slangerna i vågdalarna.

Olika lösningar är tänkbara. Pumpen kan t ex vara fast förbunden med botten och ha en förankringslina fäst i bojen via en spelanordning som automatiskt känner av bojens läge i förhållande till vattenytan. Se fig 7.11

Det kanske lämpligaste alternativet är att låta systemet luta något varvid vattenståndsvariationer klaras genom ändrad lutning. Lutningen hos linan bör överensstämma med lutningen hos kraftresultanten på bojen.

### Bojen

Det studerade systemet är inte beroende av hög bojhastighet och bör därför kunna arbeta med bra verkningsgrad utan att bojen är i resonans. Den behöver inte heller någon kringutrustning. Bojen kan därför göras lätt och enkel.

### Stamledningar

Dessa görs lämpligen i plast. Ledningarna läggs på botten så att man får ett lämpligt mönster av bojar.

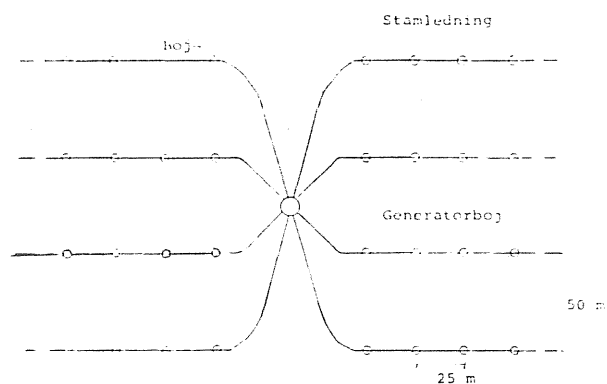


Fig. 7.12 Kraftverkets struktur

Man kan låta dem gå ut från en större centralboj där en turbindriven generator placeras. Bojarna placeras med ca 25 m mellanrum längs stamledningarna. Armarnas riktning anpassas till vågriktningsfördelningen på platsen. Slangdimensionerna väljs så att friktionsförlusterna blir små och verkningsgraden därigenom hög. Verkningsgraden beräknas som

$$\eta = \frac{p_a}{p_i} = \frac{p_i - \Delta p_f}{p_i} \quad (7.5)$$

där  $p_i$  = trycket vid inloppet

$p_a$  = trycket vid utloppet

$\Delta p_f$  = tryckförlust p g a friktion i ledningarna

Friktionstrycksförlusterna kan beräknas ur allmänna friktionsformeln.

$$\Delta p_f = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (7.6)$$

$\lambda$  dimensionslöst tal som beror av Reynolds tal

$\rho$  vattnets densitet

$L$  ledningens längd

$d$  ledningens diameter

$v$  vattenhastigheten ( $Q$  (flödet) /  $A$  (arean) )

Tryckförluster p g a nivåskillnader behöver inte beaktas så länge insug och uttag befinner sig under vattenytan.

Om turbinen förses med sugrör som mynnar strax under vattenytan behöver inga nivåskillnader beaktas heller för denna.

Om turbinen inte kan utföras med sugrör (t ex peltonturbin) måste trycket p g a nivå från turbinens utlopp till vattenytan beaktas.

### Turbin-generatorstation

Stationen förläggs lämpligen på en flotte centralt i fältet av bojor för att minimera slanglängden. Med ett tillräckligt antal bojor torde flödet under ett tidsintervall av storleksordningen vågperioden bli relativt jämnt. Flödet kommer dock att följa medelvågshöjdens variationer. Turbinstationen måste därför kunna regleras så att den arbetar med relativt god verkningsgrad i ett brett effektintervall. Tre alternativ bör beaktas.

- 1) Peltonturbin
- 2) Francisturbin med vridbara ledskovlar
- 3) Standardpump med standard asynkronmotor som körs baklänges (effektmässigt).

Alternativ 1) och 2) har inbyggda regleranordningar. Alt 3) regleras så att man har ett antal t ex 10 pumpar som man kopplar in successivt om de är lika stora eller om de är olika stora så att man bäst utnyttjar effekten (ex 1 pump på 50 % av märkeffekten, 1 på 25 %, 1 på 12.5 %, 1 6.25 % och 2 på 3.125 % varvid vi får en medelförlust på ca 1.5 % p g a regleringarna) med endast 6 pumpar och 6 ventiler.

Från bojen tas effekten iland med elkabel. Om en transformator placeras på flotten kan spänningen väljas fritt för att passa avståndet till land.

#### Beväxning

Ett svårbedömt problem för vågkraftverk är beväxning som för detta system kan tänkas förekomma i ledningar och pumpar. Problemet blir sannolikt stort enbart vid insugningssilarna eftersom mörkret inuti ledningar och pumpar torde medföra att organismerna ej vill sätta sig fast. Pumparnas utsida bör klara sig p g a de ständiga längdändringarna.

#### Bojens energiupptagning och rörelse

För att diskutera detta används en modell med en boj kopplad till en kolvpump. Se fig. 7.13.

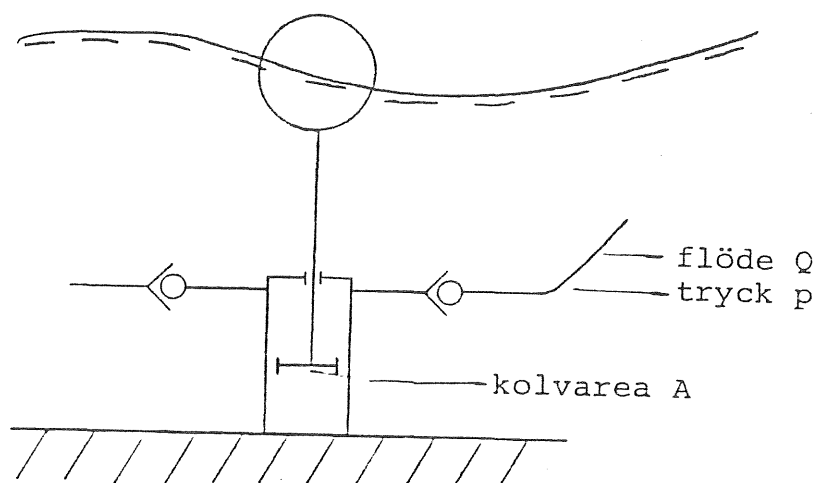


Fig. 7.13 Kolvpump driven av vågboj.

Om bojen rör sig sträckan  $x$  uppåt pumpar den ut en vattenvolym  $V = A \cdot x$ . Kolven påverkar då bojen med en kraft

$$F = A \cdot p \quad (7.7)$$

Arbetet som bojen då uträttar är

$$W = F \cdot x = p \cdot V \quad (7.8)$$

När bojen och därmed kolven sjunker tillbaka till utgångsläget åstadkoms ingen kraft och därför uträttas inget arbete. Vatten strömmar på nytt in i cylindern. Medel-effekten under en period blir därför

$$P = \frac{W}{T}$$

där  $T$  = periodtiden.

Vid ett bestämt tryck  $p$  resp en bestämd kolvarea  $A$  beror arbetet endast på hur långt bojen rör sig uppåt. Betrakta en lätt boj med hög egenfrekvens sådan att amplitudresponssfunktionen har värdet 1 för alla betraktade vågor. Bojen kommer att följa vattenytan om pumpen inte är inkopplad. Om pumpen kopplas in påverkar den bojen med en kraft när bojen rör sig uppåt. Härvid sjunker bojen något så att displacementsökningen motsvarar kraften från kolven. Bojens amplitud är då lika med vågornas amplitud minskat med denna bojsjunkning ( $e$ ).

För att få reda på det exakta medelvärdet av  $e$  måste man göra en noggrannare analys av bojens rörelsemönster.

Medeleffekt  $P_m$  fås som kvoten mellan medelvåghöjd  $\bar{H}$  minskat med medelbojsjunkning  $\bar{e}$  och medelperiodtid  $T_z$ .

$$P_m = \frac{(\bar{H} - \bar{e}) \cdot F}{T_z} \quad (7.9)$$

Maxeffekten som är lika med märkeffekten fås när  $\frac{\bar{H}}{T_z}$  har maximum eftersom  $F$  är konstant.

### Systemtryck

För hydraulisk effekt gäller

$$P = Q \cdot p \quad (7.10)$$

där  $Q$  = flöde

och  $p$  = tryck

För konstant effekt minskar flödet med ökande tryck. Det mindre flödet gör att klenare och därmed billigare slangar kan användas. Man bör därför välja så högt tryck som turbiner, slangar och pumpelement tål.

#### Petropumpens belastning av bojen

Petropumpen belastar bojen med summan av kraften från en progressiv fjäder (d v s fjäderkonstanten ökar med ökat utslag) och en kraft som endast verkar när bojen rör sig uppåt och som också ökar med ökande utslag. Den första kraften motsvarar den elastiska töjningen av slangen och den andra motsvarar pumparbetet. Att den andra kraften ökar innebär att vi får en större pumpad volym per enhetsförlängning vid stora förlängningar.

För detta svängningssystem är ingen noggrann analys ännu utförd. Som underlag för dimensionering på detta stadium betraktas flödet per m förlängning som konstant.

Med en bojsjunkning på 0,1 m för en boj på 4,0 m diameter får vi pumpkraften till

$$F = \rho \cdot g \cdot e \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 12.6 \text{ kN}$$

Med flera parallellkopplade pumpelement på en gemensam större boj kan en större kraft uppnås.

#### Inverkan av petropumpens olinearitet

Eftersom petropumpen har mindre volymminskning per förlängning i början av sitt slag belastar den bojen med en mindre kraft i början. Detta innebär att vi får en mindre bojsjunkning för små vågor. Man utnyttjar därför dessa bättre med en petropump än med en konventionell kolvpump. Den progressiva fjäderkonstanten inverkar också gynnsamt.

#### Beräkning av medel- och maximeffekt för en boj

Medeleffekten beräknas med formeln

$$P_m = \frac{(\bar{H} - \bar{e}) \cdot F}{T_z}$$

För 1975 gäller vid Hoburg

Medelvåghöjden  $\bar{H} = 0.85 \text{ m}$

Medelperiodtid  $T_z = 4.75 \text{ s}$

Bojsjunkning  $e = 0.1 \text{ m}$

Kraften pga slangens elasticitet är relativt liten och kan försummas.

$$P_m = 2.0 \text{ kW per boj}$$

För dimensionering av turbin och generator bestäms den s k märkeffekten. Denna beror av maximivärdet hos  $\frac{H}{T}$  som uppskattas till 0.45 m/s ,jfr figur 6.1c.

Märkeffekten blir då  $0.45 \text{ m/s} \cdot 12.6 \text{ kN} = 5.7 \text{ kW}$ .

Ett sätt att skydda generatorerna mot för hög inlevererad hydraulisk effekt är att släppa förbi överflödigt vatten genom en strypventil. Medeleffekten används till att bedöma hur mycket energi vi får från kraftverket och bör därför vara ett medelvärde över så lång tid som möjligt. Helst ska det dessutom vara korrigerat för bojens begränsade slaglängd och för att bojen inte rör sig förrän vågorna övervinner begynnelsekraften.

#### Dimensionering av petropump

Petropumpen kan förlängas 10 % för normal drift men för kortare perioder upp till 15 %. Genom att variera armeringsvinkeln kan volymminskningen per töjning ändras. Tillverkaren har bedömt att 2 % volymminskning per procent töjning är ett lämpligt värde.

Man har för detta system tänkt sig att använda en lätt boj med hög egenfrekvens vilket innebär att den kommer att följa vattenytan relativt väl. Ett studium av våghöjdsfördelningen visar att relativt mycket energi erhålles om man maximerar bojens slaglängd till 3 m. Nackdelen med en begränsning av slaglängden till 3 m är att inte mera än 3 m slaglängd kan utnyttjas vid vågor som är högre än 3 m. Medelslaglängden för bojen sänks härigenom något. Fördelen med maximering av slaglängden är att pumpslangens längd och därmed pris minskas. Även maximalt uttagen effekt minskar vilket gör att mindre turbiner, generatorer och slangdiametrar kan användas.

Maximal slaglängd kan kontrolleras genom att bojens totala volym ger ett displacement som svarar mot den största tillåtna kraften i slangen.

Med slaglängden 3 m och 10 % töjning erfordras slanglängden  $L = 30$  m.

Produkten av dragkraft och slaglängd ger inmatat arbete. Produkten av tryck och utmatad volym ger det utmatade arbetet

Med dragkraften  $F = 12.6$  kN  
 slaglängden  $S = 3$  m  
 systemtrycket  $p = 1$  MPa  
 fås slagvolymen  $V_s$  som

$$V_s = \frac{FS}{p} = 37.8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Med 2 % volymminskning per procentförlängning vid 10 % förlängning erhålles slangdiametern  $d$  ur

$$V_s = \frac{\pi d^2}{4} \cdot L \cdot 10 \cdot 0.2$$

$$d = \sqrt{\frac{V_s \cdot 4}{0.2\pi \cdot L}} = 90 \text{ mm}$$

Man får slangens innerdiameter till 90 mm.

En uppskattning av det maximala flödet som bojen levererar behövs som underlag för dimensionering av backventiler och eventuell kopplingslang från pump till matarslang.

Medelflödet under en period och periodtiden vid maximieffekt.

$$\frac{P_{\max}}{p} = \frac{5.7}{1} = 5.7 \text{ l/s}$$

Om vi antar att vågen är sinusformad med amplituden hos bojrörelsen 1.5 m (dubbelamplitud = 3 m) och periodtiden 6.5 s

$$z = 1.5 \sin\left(\frac{2\pi}{6.5}t\right)$$

$$\dot{z} = \frac{1.5}{6.5} \frac{2\pi}{6.5} \cos\left(\frac{2\pi}{6.5}t\right)$$

$$\dot{z}_{\max} = \frac{1.5}{6.5} \frac{2\pi}{6.5} = 1.45 \text{ m/s}$$

Pumpens slagvolym är 37.8 l vid 3 meters förlängning  
d v s 12.6 l/m.

Det flöde som dimensionerar bl a backventilerna blir då

$$1.45 \text{ m/s} \cdot 12.6 \text{ l/m} = 18.3 \text{ l/s}$$

### Exempel på kraftverk

Medeleffekt 3.1 MW

Trycknivå 1 MPa

Bojdiameter 4.0 m

Bojens effektgivande kraft 12.6 kN

Enligt tidigare beräkningar har vi då

Bojens medeleffekt 2.0 kW

Bojens maximieffekt 5.7 kW

Medelflödet blir  $\frac{2 \text{ kW}}{1 \text{ MPa}} = 2.0 \text{ l/s}$

Maximiflödet blir  $\frac{5.7 \text{ kW}}{1 \text{ MPa}} = 5.7 \text{ l/s}$

Kraftverkets maximieffekt (installerad effekt)

$$3.1 \cdot \frac{5.7}{2.0} = 8.8 \text{ MW}$$

Med verkningsgraden 0.8 % hos turbin och generator erhålles  
erforderligt antal bojar  $\frac{3100}{0.8 \cdot 2} = 1937 \text{ st.}$

Kraftverket delas upp på 3 genaratorstationer som vardera  
har 8 armar med 80 bojar vilket blir 1920 bojar totalt.

Avståndet mellan bojarna sätts till 25 m.

Armarnas längd blir  $25 \cdot 80 \text{ m} = 2000 \text{ m.}$

Totalt antal armar  $3 \cdot 8 = 24 \text{ st.}$

Varje arm utföres av slangar med successivt ökande diameter:  
1000 m  $\phi$  300, 500 m  $\phi$  400 och 500 m  $\phi$  500.



Som turbiner används standardpumpar som körs baklänges.

Som generatorer används standardasynkronmotorer.

Kraftverket antas ligga 5 km från land.

Som pumpelement används petropumpar med 30 m längd och ca 100 mm diameter.

De förses med backventiler i varje ände samt säkerhetsventil, insugningssil och fästanordning.

Bojen utföres exempelvis som en skiva och förankringen som ett betongblock. Dess volym blir ca

$$V = F/\gamma = 20/14 = 1,4 \text{ säg } 2 \text{ m}^3$$

Kraftverkets uppbyggnad framgår av figur 7.14

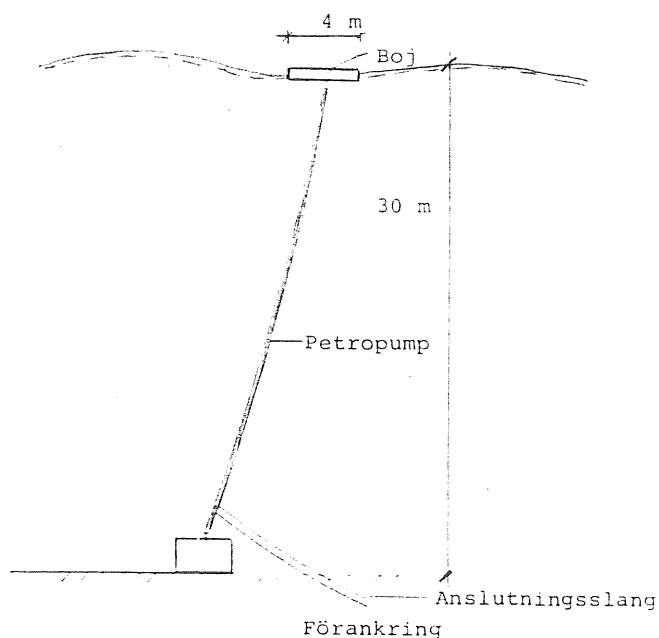
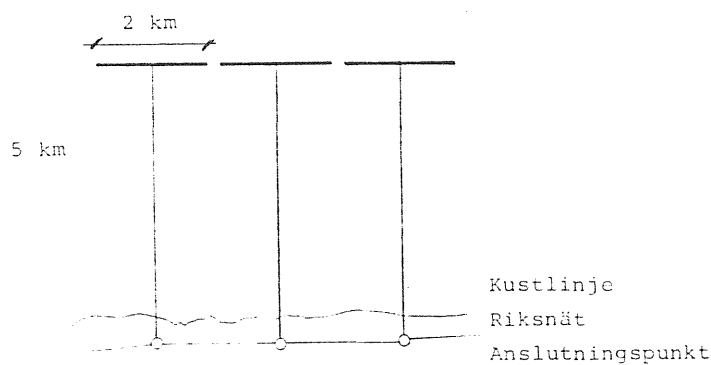


Fig. 7.14 Kraftverksstruktur och omvandlare

Tabell 7.5

KOSTNADSBÄRARE	ENHET	MÄNGD	A-PRIS kkr	TOTALT kkr	RED FAKTOR	SLUTKOSTN kkr	ANM
<u>Omvandlare (1920 st)</u>							
Bojar	st	1920	1.0	1920	0.9	1728	
Förankringar	st	1920	1.5	2880	0.8	2304	
Pumpelement	st	1920	3.6	6912	1	6912	Petropump 30 m, ø 100
Ventiler m m	st	1920	1.4	2680	0.9	2419	
					Delsumma	13363	33 % av totalsumman
<u>Slangar</u>							
Slangar ø 300	m	24000	0.20	4800	1	4800	
"- ø 400	m	12000	0.27	3240	1	3240	
"- ø 500	m	12000	0.30	3600	1	3600	
					Delsumma	11640	29 % av totalsumman
<u>Generatorstation</u>							
Turbiner 8.8 MW	st	3	1720	5160	1	5160	~ 600 kr/kW
Generatorer 8.8 MW	st	3	430	1290	1	1290	~ 150 kr/kW
Generatorboj totalt	st	3	100	300	1	300	
Landkabel 8.8 MW	m	15000	0.1	1500	1	1500	3 km från land
					Delsumma	8250	24 % av totalsumman

KOSTNADSBÄRARE	ENHET	MÄNGD	A-PRIS kk	TOTALT kk	RED FAKTOR	SLUTKOSTN kk	ANM
<u>Utläggning</u>							
Utläggning slangar	m	48000	0.1	4800	0.7	3360	
"- bojar	st	1920	2.0	3840	0.7	2688	
"- kabel	m	15000	0.1	1500	0.7	1050	Nergrävd
					Delsumma	7098	18 % av totalsumman
					TOTAL ANLÄGGNINGSKOSTNAD	40351	kk

Drifts- och underhållskostnader

Anläggningens drifts- och underhållskostnader antas per år vara 5 % av anläggningskostnaden d v s 210830 kr.

Kostnad för producerad energi

Ett kraftverk om 1920 bojar producerar i medeltal 3.1 MW totalt.

Utbyggnadskostnaden per kW blir

$$\frac{40351000}{8600} = 4692 \text{ kr/kW}$$

Vid en drifttid av 8000 timmar per år produceras

$$8000 \cdot 3.1 = 24\ 800 \text{ MWh.}$$

Med 10 % räntesats och 25 års avskrivning av kapitalet blir annuiteten 11 %.

Energikostnaden blir då för ett år

$$40351000 \cdot (0.05 + 0.11) = 6\ 456\ 160 \text{ kr}$$

och energikostnaden uttryckt i kr/kWh blir

$$\frac{6\ 456\ 160}{3100\ 8760} = 0.24 \text{ kr/kWh}$$

Med hänsyn till de osäkerheter som ligger i gjorda antaganden bör det vara rimligt att med ledning av den gjorda kalkylen uppskatta energikostnaden till mellan 0.20 och 0.30 kr/kWh.

7.5 Sammanfattning av kostnadsberäkningar

I Tabell 7:5b sammanfattas kostnadsberäkningarna samt en del andra uppgifter om de tre kraftverken.

Tabell 7:5b Sammanfattning av kostnadsberäkningar

Benämning	Kraftverk			Anm
	Bojar med linjära generatorer	NEL OWC	Bojar med petropumpar	
Plats	Hoburg	Smögen	Hoburg	
Medeleffekt i vågorna på platsen kW/m	7.4	11.7	7,4	
Märkeffekt MW	9.0	7.7	8.8	
Medeleffekt MW	4.3	0.8	3.1	
Total bredd km	1.2	1.0	6	
Total yta km <sup>2</sup>	0.7	1.0	1.2	utan säkerhetszon
MWh/bredd m o år	31.0	7.0	4.5	
kWh/areal m <sup>2</sup>	58.0	7.8	22.8	
Total anläggningskostnad kkr	58.3	17,7	40.4	
Utbyggnadskostn kr/kW	6500	2300	4700	
Energikostnad kr/kWh	0.27	0,48	0.24	
Kostnadsandelar i % av kWh-kostn				
Kapitalkostnader	69	58	69	
Omvandlare	54	29	18	
Distributions-system	9	16	35	
Förankrings-system	5	12	4	
Utläggning	1	1	12	
Underhållskostn	31	42	31	

## 7.6 Utvärdering av de tre kostnadsberäknade kraftverken efter en mall i 12 punkter

Förslag som inkommer från uppfinnare bedöms efter 12 punkter som framgår av tabell 7.6

Tabell 7.6 Punkter för bedömning av externa förslag till vågenergiomvandlare

---

1. Konstruktionens lämplighet för svenska förhållanden
2. Förväntad energikostnad
3. Förmåga att uppta vågenergi. Riktningensberoende
4. Kostnad för utveckling
5. Komplexitet i det energiupptagande systemet
6. Komplexitet hos lagrings- och distributionssystem
7. Komplexitet hos struktur-, förankrings-, reglerings- och manöversystem
8. Tålighet med avseende på mekaniska påkänningar, korrosion, bevaxning, nedisning, drivis m m
9. Möjlighet till kombination med annan funktion
10. Specifika fördelar och nackdelar i samband med tillverkning
11. Miljöpåverkan
12. Känslighet för vind- och strömpåverkan samt vattenståndsvariationer

Några kommentarer till tabellen:

"Svenska förhållanden" kännetecknas bl a av följande

- vågorna är relativt små
- vågeffekten är relativt liten
- förhållandet mellan extrem vågeffekt och medelvågeffekt är litet
- vattendjupet är måttligt
- stor magasineringskapacitet finns i våra sjöar
- kraftnätet är väl utbyggt
- is och drivis kan förekomma
- konfliktrisken med t ex fiskerinäringen är ganska stor

De två sista raderna behandlas i särskilda punkter

Kraftverken bedöms i tabell 7.7

Bedömningen görs i en 5-gradig skala där högt värde utgör ett positivt utlåtande med avseende på kraftverkets funktion. Bedömningen är i viss mån subjektiv.

Tabell 7:7 Bedömning av kostnadsberäknade kraftverk

Bedömnings- punkt	Bojar med linjära generatorer	System enl NEL	Bojar med petropumpar
1. lämplighet	5	4	5
2. energikostnad	4	3	4
3. energiupptagning riktningsberoende	3 5	4 2	2 5
4. utvecklingskostnad	4	3	5
5. komplexitet energiuppt.3		4	5
6. komplexitet distribut. 3		4	3
7. struktur	3	4	3
förankring	4	3	5
reglering	4	4	4
8. påkänningar	3	4	4
korrosion	3	3	4
beväxning	3	4	3
nedisning	4	3	4
drivis	5	2	1
9. kombinationsmöjlighet 2		5	2
10. tillverkning	4	2	5
11. miljöpåverkan	4	4	4
12. vind	4	2	5
ström	3	2	4
vattenstånd	5	5	4

Kommentarer till några punkter:

Pkt 2. Energifkostnaderna har för de tre systemen beräknats till

0.20-0.40, 0.35-0.55 resp 0.20-0.40 kr/kWh

Pkt 3. Förmågan att uppta vågenergi avser hela kraftverkets totalverkningsgrad som dels beror på de enskilda omvandlarnas energiupptagningsförmåga dels på hur tätt de ligger.

- Pkt 4. Kostnaden minskar när känd teknik och standardkomponenter kan användas. Om utvecklingen av ett kraftverk i huvudsak innebär utveckling av en relativt enkel modul är detta fördelaktigt.
- Pkt 5. Ju fler mellanled det är mellan vågorna och den producerade elenergin ju större är komplexiteten.
- Pkt 6. Omfattande system av elledningar eller slangar måste anses som komplexa.
- Pkt 8. Om bojarna är försedda med sänkesautomatik kan de klara drivas.
- Pkt 9. Som exempel kan anges vågbrytare och plattformar för fiske.
- Pkt 10. Serietillverkning av moduler är fördelaktigt.

Genom att punkterna tilldelas olika vikter modifieras poängtalerna som sedan kan summeras. Därefter kan en kvantifierad jämförelse mellan systemen göras. Detta utföres dock ej här eftersom valet av vikter fordrar ett utförligt förarbete, som ännu ej finns förutsättningar att göra.



8 FÖRSLAG TILL FORTSATT VERKSAMHET

## 8. FÖRSLAG TILL FORTSATT VERKSAMHET

För att konstruera ett försökskraftverk speciellt för de nordiska förhållandena, måste man noggrant gå igenom de olika system som finns och söka finna en optimal lösning ur ekonomisk synpunkt. Valet av energiomvandlare är svårt, eftersom antalet möjliga principer är stort.

Det fortsatta arbetet bör därför i ökande omfattning göras i samarbete mellan nordiska forskningsgrupper inom nordisk industri samt med stöd och ledning av företag och myndigheter, som ansvarar för den nordiska elenergiförsörjningen och dess samordning vad gäller energikällor, distributions- och lagringssystem.

Problemen vid vind och vågor är likartade vad gäller omvandlingen av mekanisk energi till elenergi. Enligt en utredning (se nedan) ger vindkraftverk till sjöss i genomsnitt ca 50 % mer energi per meter<sup>2</sup> svept yta jämfört med förläggning till lands. Vindkraftverk och vågkraftverk bör därför kunna samlokaliseras. Härigenom erhålles en sammanlagringseffekt samt ett bättre utnyttjande av elsystemet. Härvid bör deras konstruktion inbördes anpassas, vilket kräver utrednings- och forskningsarbete.

### 8.1 Det svenska bojkraftverket

Bojkraftverket har flera fördelar:

- . vågenergin omvandlas direkt i bojarna till elenergi, vilket ger ett enkelt och robust system
- . systemet medger att bojarna kan överleva storm
- . enheterna kan byggas i stora serier, där varje enhet är föga kapitalkrävande. Vågkraften kan därför byggas ut successivt och nya vattenområden tagas i anspråk allteftersom behovet ökar
- . energikostnaden är relativt låg
- . de enskilda omvandlarna är för sitt arbete oberoende av vågor-  
nas riktning
- . energiuttaget kan regleras och bojarnas arbete anpassas till de växlande vågförhållandena
- . bojarna kan barlastas och därigenom sänkas under vattenytan vid is.

Arbetet med detta bojkraftverk bör därför fortsätta.

Försöken med modellbojen i sjön Lygnern fortsätter under sommaren 1979 inom ramen för nuvarande anslag. Modellförsök ger emellertid endast begränsad information. För att kunna prova bojen under verkliga förhållanden och förse den med en linjär generator måste den tillverkas i större skala och utläggas till sjöss. Härigenom får man erfarenhet av materialfrågor, förankringar, elektrisk effekt, transmissionssystem mm, och kan få en fullständig bild av kostnaderna.

En boj utgör ett element i ett kraftverk, som kan innehålla ett stort antal bojar. Genom att prova en enda boj och kombinera resultaten härav med teoretiska beräkningar av sammanlagringseffekter erhåller man en relativt fullständig bild av ett kraftverk, men till en låg kostnad. Detta gäller inte för flertalet av de brittiska projekten eller andra konstruktioner av mer "sammanhängande" typ.

## 8.2 Studium av våg- och vindenergi för Gotland

Samtliga nordiska projekt arbetar med sina energiomvandlare i vatten. Det japanska kraftverket KAIMEI liksom NEL utnyttjar vattnets rörelser för att driva luft genom turbiner. Resultatet av de brittiska analyserna av olika system pekar på att luftturbiner (Oscillating Water Column) är att föredraga. Å andra sidan har en analys av Eurocean visat, att luftturbiner ger skrymmande och därför dyrare konstruktioner än t ex omvandlare av Törnkvists typ. Det är därför nödvändigt, att mer i detalj studera andra system än bojar för utvinning av elenergi i svenska vatten.

Enligt en rapport i mars 1979 av SIKOB till NE med titeln "Sjöbaserade vindkraftverk" är Gotlands ostkustlämpligt område för vindkraftverk. I detta område finns också hög vågenergi i oftast isfria vatten. Gotland utgör ett lämpligt område för studium av ett större energisystem.

Ett examensarbete vid CTH har också nyligen startat för analys av Gotlands försörjning med vågenergi.

Man bör därför projektera vind- våg-kraftverk med utgångspunkt från såväl de japanska erfarenheterna som från de svenska vindenergistudierna. Båda dessa forskningsområden har nått prototypstadiet. Det japanska kraftverket har i viss utsträckning gjorts tillgängligt för allmänna studier i ett internationellt samarbete (IEA).

## 8.3 Studier i nordiskt samarbete

I Norge arbetar en grupp (Budal-Falnes) vid NTH med vågbojar och en annan grupp (Mehlum) vid SI (Sentralinstitut för industriell forskning) i Oslo med koncentration av vågenergi.

I Finland arbetar en grupp (Törnkvist) med ett datorstyrt kraftverk med kilformade kroppar i vatten.

Förutom dessa mera kända projekt finns ett flertal projektstudier vid svenska och norska varv och andra industrier.

Forskningssamarbete och insyn i den nordiska och i den internationella forskningen kan endast ske om man inom landet bedriver en tillräckligt avancerad egen forskning, som kan ha intresse för kunskapsutbyte mm.

Genom att konkreta systemlösningar bearbetas i Sverige, Norge och Finland finns möjligheter till erfarenhetsutbyte mellan forskningsgrupperna.

Inom vågenergiforskningen finns vissa gemensamma problem, som är relativt oberoende av systemvalet och som lämpar sig för samarbete, nämligen:

- . Hydrodynamiska grundproblem vid vågkraftverk
  - hydrodynamiska krafter på systemet och dess element
  - rörelsen hos kroppar under inverkan av vågor
  - utveckling av datorprogram
- . Vågmätningar
  - mätmetoder
  - analysmetoder och datorprogram
  - utveckling av mätutrustningar, speciellt med önskan att mäta riktningsspektra
  - kartläggning av vågklimatet
  - "hindcasting modeller"
- . Ekologiska verkningar
- . Inverkan på sjöfart, fiske och fritidsaktiviteter
- . Konverteringssystem
  - linjära generatorer
  - olika mekaniska, hydrauliska eller pneumatiska system för energiöverföringen
- . System för ilandtagning av energin
  - flexibla kablar
  - strömart och spänning
  - inkoppling på lokalt nät eller på riksnätet
- . Materialfrågor.

Dessa problemområden är mycket omfattande, varför bidrag med medel och forskare från flera nordiska länder skulle förbättra resultaten och göra dem snabbare tillgängliga.

Prototypkraftverk bör kunna åstadkommas och drivas i nordisk samverkan med utgångspunkt från erfarenheter med de nordiska vågkraftprojekten samt med kännedom om den brittiska och japanska forskningen. Modellkraftverk för norska kusten kan vara av samma storleksordning som ett fullskalekraftverk i Östersjön eller på svenska västkusten.

#### 8.4 Projektering av ett försökskraftverk

Avsikten med detta arbete är att ta fram projekteringsunderlag för ett försökskraftverk och därmed det underlag som krävs för att på längre sikt kunna bygga verkliga kraftverk, dels för elförsörjning, men också för export av kraftverk.

Vid ett sådant arbete kan det bli nödvändigt att göra speciella försök och provningar av komponenter i full skala, material etc.

9. REFERENSER

- Budal K och Falnes J (1978): Wave-Power Conversion by Point Absorbers. Norwegian Maritime Research, No 4, 1978.
- Burchart og Brorsen (1978): On the Design of Gravity Structures Using Wave Spectra. Bulletine nr 13. Aalborg Universitetscenter, Laboratoriet för hydraulik og havnebygning.
- Byggandets energiprofil. Bfr art. nr 6503707.
- DFE-rapport nr 18 (1979): Värdering av insatserna inom området Vindenergi. Delegationen för energiforskning.
- Fiskets omfattning och intresseområden (1977), Fiskeristyrelsen. Rapport 1977-09-05.
- Hardell K et al (1978): Sjöbaserade vindkraftverk. Resultatrapport November 1978. SIKOB-rapport 1546 upprättad för Nämnden för Enerkiproduktionsforskning.
- Hasselman K et al (1973): Measurement of Wind Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave project, Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg 1973.
- Havelock T (1955): Waves Due to a Floating Sphere Making Periodic Heaving Oscillations. Proceedings of the Royal Society of London, A-231,1-7.
- Havet. Naturförhållanden och utnyttjande (1978). Fysisk riksplanering, Underlagsmaterial 7.78.
- Hushållning med mark och vatten, SOU 1971:75.
- Kinsman B (1965): Wind waves, their generation and propagation on the ocean surface. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Meeres Technik 10 (1979) Nr 1, "Kaimei" wandelt Wellen in elektrische Energie.
- Lagerqvist S (1960): Konstruktiv Elektromaskinlära I,II,III, Göteborg 1960.
- Sjöfartsverkets meddelande nr 4, 1977
- Taesler R (1971): Klimatdata för Sverige.
- US Army Corps of Engineers (1973): Shore Protection Manual, Beach Erosion Board: Vol 1, Washington DC 1973.
- Vågenergi i Sverige (1977); Planeringsrapport NE 1979:4, Nämnden för Enerkiproduktionsforskning. Stockholm 1977.

Förteckning av gruppberapporter (GR) från Gruppen för  
Vågenergiforskning

---

- GR:1 Sea Waves at the Swedish Coastal Waters as a Source of Energy. September 1976. Anders Rylander CTH-SH Rapport nr 74-76.
- GR:2 Vågenergi i Sverige. Rapport från planeringsgruppen för Vågenergi - NEPÖ/V. 29 december 1976.
- GR:3 Analys av ett förslag till vågkraftverk. Rapport från planeringsgruppen för Vågenergi - NEPÖ/V. 15 mars 1976.
- GR:4 Komplettering av kostnadskalkyl för vågkraftverk med bojar. 77-10-20. Thomas Rindby.
- GR:5 Effektupptagning i oregelbundna vågor hos en vågboj med linjär dämpning. 1979-08-28 Lars Bergdahl.
- GR:6 Energi ur havsströmmar. 1977. Björn Ringesten. Inst. för Vattenbyggnad CTH. Report Series B:4.
- GR:7 Possibility of large electric output by floating type Sea Wave Electric Generator av Yoshido Masuda, Takeaki Miyazaki och Tomio Emura, JAMSTEC. Översättning till svenska. 1977. Thomas Rindby och Lennart Claeson.
- GR:8 Vattentanksprov med stor elektrisk våggenerator under åren 1974-1975 utförda av JAMSTEC. (Originalets titel: Water Tank Test of Large Sea Wave Electric Generator from 1974 to 1975 by JAMSTEC, Reporter Y Masuda, T Miyazaki.) Sammanfattning på svenska. 1977. Lennart Claeson och Thomas Rindby.
- GR:9 Progressive study of Sea wave electric Generator in 1976 by JAMSTEC, Yoshio Masuda & Takeaki Miyazaki. Sammanfattning på svenska. 1977. Lennart Claeson.
- GR:10 Linjär teori för energiupptagning hos en oscillerande vågenergiomvandlare av bojtyp. 1978-05-12. Lars Bergdahl, Lennart Claeson, Johannes K Lunde.
- GR:11 Vågkraftbojar - modellförsök i regelbundna vågor, 1978-08-30. Lars Bergdahl, Anders Rylander, Lars-Ove Sörman, Lars Wernersson.
- GR:12 Ocean Wave Energy Research in Sweden. 1977. Revised 1978-12-09.
- GR:13 Vågkraftbojar - modellförsök i regelbundna vågor i bred bassäng. 1979-03-20. Lars Bergdahl, Lars-Ove Sörman, Lars Wernersson.

GR:14 Vågkraftbojar - modellförsök med energiupptagning i regelbundna vågor. 1979-03-21. Per Andersson och Jan Forsberg.

GR:16 Vågenergi i Sverige. 79-05-14.

Följande rapporter kommer att färdigställas relativt snart. Titlarna är preliminära.

GR:17 Vågmätningar i Lygnern samt funktionsprov med vågboj i Lygnern och i bassäng.

GR:18 Program för beräkning av vågor ur vinddata.

GR:19 Tillgängliga vattenområden.

GR:20 Hydrodynamic theory of ocean surface waves and energy conversion.

GR:21 Linjär generator för vågbojar.

GR:22 Likströmsmodell för linjär generator.



Förteckning över reserapporter

- RR:1 Redogörelse för resa i Storbritannien för Planeringsgruppen för vågenergi. Edinburgh 760714. Lars Bergdahl.
- RR:2 Besök vid Vassdrags- och Havnelaboratoriet (VHL). Trondheim 770118. Curt Falkemo.
- RR:3 Redogörelse för besök i Danmark för Planeringsgruppen för Vågenergi. Köpenhamn 770118. Anders Rylander.
- RR:4 Redogörelse för besök i Trondheim för Planeringsgruppen för vågenergi. Trondheim 770322. Anders Rylander m fl.
- RR:5 Redogörelse för besök i Köpenhamn i samband med ett havsenergimöte. Köpenhamn 770414. Lennart Claeson m fl.
- RR:6 Besök vid hydrografisk- meteorologisk bojstation i Örlogsberga, Stockholm 770615. Lennart Claeson.
- RR:7 Rapport från möte med IEA Wave Power Expert Group. Oxford 770902. Anders Rylander.
- RR:8 Rapport från besök i Skottland, Edinburgh 771205. Lennart Claeson m fl.
- RR:9 Rapport från besök i Storbritannien. 780129 - 780525. Anders Rylander och Thomas Rindby.
- RR:10 Rapport från besök i Norge 780524 - 780525. Curt Falkemo och Lennart Claeson.
- RR:11 Rapport från besök vid två centra för vågenergiforskning i USA i juni 1978. Svante von Zweybergk.
- RR:12 Rapport från deltagande i ett symposium om "Wave and Tidal Energy" i Canterbury, Storbritannien, 27-29 september 1978. Lennart Claeson och Curt Falkemo.
- RR:13 Rapport från besök i Hamburg 780926 - 780927. Thomas Rindby.
- RR:14 Rapport från deltagande i vågenergikonferens i London 22-23 november 1978 samt från besök hos Vickers Ltd den 24 november. Per Andersson m fl.
- RR:15 Rapport från besök i Trondheim 790326 - 790327. Lennart Claeson.

