

GRUPPEN FÖR VÅGENERGIFORSKNING



Vågenergiforskning i Sverige

Slutrapport etapp 5

GR:50

Göteborg

December 1982

Förord

På uppdrag av Nämnden för Energiproduktionsforskning har Gruppen för Vågenergiforskning fortsatt det arbete som hittills avrapporterats i planeringsrapporten "Vågenergi i Sverige, NE 1977:4", slutrapporten GR:16, februari 1980, samt slutrapporten GR:44, december 1981. Arbetet syftar till att ge underlag för en bedömning av om vågenergin har förutsättningar att bidra till den framtida svenska elenergiförsörjningen.

Denna rapport sammanfattar det forskningsarbete som utförts under etapp 5 av NE-projektet 5563-954. Under etappen har handläggningen av vågenergi övergått från NE till nyupprättade Energiforskningsnämnden (Efn).

Arbetet har bedrivits vid Technocean AB och Chalmers Tekniska Högskola.

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

Civ ing	Filip Alm	Technocean AB
Tekn dr	Lars Bergdahl	Inst. för Vattenbyggnad
Civ ing	Anders Byström	Technocean AB
Civ ing	Lennart Claeson, samordnare	Technocean AB
Professor	Curt Falkemo, ordförande	Inst. för Skeppshydromek.
Civ ing	Jan Forsberg	Inst. för Elektromaskinlära (numera Technocean AB)
Civ ing	Åke Kinnander	Technocean AB
Professor	Johannes K Lunde	Inst. för Skeppshydromek.
Civ ing	Nils Mårtensson	Inst. för Vattenbyggnad
Ing	Thomas Rindby	Technocean AB
Civ ing	Anders Rylander	Technocean AB
Civ ing	Bengt-Olov Sjöström	Inst. för Skeppshydromek.
Professor	Svante von Zweybergk	Inst för Elektromaskinlära

Som programledare vid NE fungerade till en början Birgit Bodlund och Berit Jacobsson men sedan vågenergi övergått till Efn enbart Birgit Bodlund.

Innehållsförteckning slutrapport etapp 5

Förord

Innehållsförteckning

Sammanfattning	i
Summary	iv
1. INLEDNING	1
2. SYSTEMSTUDIER	3
2.1 IPS-bojen	3
2.2 Utländska koncept	11
2.3 Simulering av strömmars fördelning i ett bojkraft- verk med likströmsmellanled.	16
2.4 Isproblem för vågkraftverk	17
3. ALTERNATIVT UTNYTTJANDE	23
3.1 El, värme och avsaltning för lokala behov	23
3.2 Foilpropellern - inledande arbete med hydrodynamisk teori	25
4. ENERGIPRODUKTION	29
4.1 Energiproduktion från en uppskalad IPS-boj.	29
4.2 Linjärisering av effektbegränsning	31
4.3 Styrning och reglering av bojar	36
4.4 Inledande arbete med hydrodynamisk teori för generella rörelseekvationer för vågeffektomvandlare	39
5. FÖRANKRING	43
5.1 Rörelser och förankringskrafter hos en vågenergiboj	43
6. GENERATOR	45
6.1 Burlindade asynkronmaskiner med reglerbar effektfaktor	45
7. VÅGDATA	47
7.1 Uppläggning av SMHI:s mätdata på Göteborgs Datacentral	47
7.2 Jämförelse mellan vågmätningarna vid Ölands Södra Grund och utanför Hoburg	48
7.3 Utvärdering av mätdata från Ölands Södra Grund	50
8. VÅGENERGIBIBLIOTEKET	51

Summary

The work within the Group for Wave Energy Research is commissioned by the Swedish Board for Energy Research. This report summarizes stage 5.

A system study of an energy converter, the IPS-buoy concept indicates a cost optimum buoy diameter when the power plant is installed in the Baltic. Several parameters are studied. Results of measurements from real tests at sea with an IPS-buoy are used to estimate energy production and mooring forces. The optimum buoy will be costed more accurate in a following report.

From foreign concepts - Salters ducks, Bristol Oscillating Cylinder, Lancaster Flexible Bags and Oscillating Water Column are costed for Swedish wave conditions. The result can only be used for comparison between the four concepts.

The distribution of the currents in a power plant with intermediate DC-links is studied. It is shown by simulation that although some links are instantaneously currentless the total power production is little affected. The design of the system have to take these phenomenas into account.

The ice in Swedish waters is quite a problem. It is shown that in the interesting areas for wave power, severe ice conditions as a mean appear every fourth year. The best methods to handle these problems is either to sink the devices when the ice comes or to have them submerged all the time.

Wave energy could be used for other purposes than direct electricity production. For instance wave energy could be used for heating and desalination of sea-water. A study is made for a small isolated island where wave- and wind energy is supposed to be used.

Another application for wave energy is propulsion. So called foil-

propellers are useful for positioning of floating bodies. Cleverly attached to a wave power device it could reduce the mooring forces. It could work as a converter itself and also propel ships.

Energy production from wave energy devices, has been studied to some extent. The results from the trials with the IPS-buoy have been used to estimate the energy production from scaled buoys in the Baltic.

The effect of power saturation has been studied and a method to linearize in the frequency-domain is discussed.

Equipment to control the damping (also locking) of a small model-IPS-buoy has been built and partly tested in Lake Lygnern.

A computer program to determine mooring forces is under developement.

An asynchronous generator with a controllable power factor is going to be tested at the laboratory. This technique gives a better efficiency for the electrical system but less efficiency for the generator.

The wave recordings at Hoburg (SMHI) has shown less value than expected compared to hindcastings. This however probably depends on leward effects.

1. INLEDNING

De senaste åren har på flera håll i utlandet, främst Norge och England, utvärderingar gjorts av energikostnaden för olika omvandlare. Dels har projektgrupperna gjort beräkningar dels har även beräkningar utförts av särskilt tillsatta konsulter. Generellt kan man konstatera att projektgruppernas bedömningar ger lägre kostnader än konsulternas. Orsakerna till detta kan vara bl a följande

- konsulterna har för dålig kunskap om vågenergitekniken. Där de är osäkra tenderar de att lägga sig "på säkra sidan". Speciellt gäller detta kostnader för underhåll.
- projektgrupperna ser ibland inte i tillräcklig omfattning på helhetsbilden varför en del kostnadsposter kan bli ofullständigt beaktade.
- projektgrupperna är mer optimistiska och försöker ta hänsyn till utvecklingsfördelar, inverkan av serieproduktion etc.

Man kan konstatera att intresset styrts över från lösning av rent tekniska problem till att även klara den ekonomiska sidan. Mycket arbete görs nu för att genom olika åtgärder få ner kostnaderna. Ett intressant exempel kan nämnas:

I Norge undersöker man möjligheterna att utnyttja naturlig fokusering dvs att finna platser där vågenergin är högre än i havet utanför pga refraktion mot botten. Man kan med sådana betraktelser även finna områden som är skyddade för de största vågorna men där "normala" vågor är opåverkade.

Ett annat exempel utgör det koncept som genom en ambitiös satsning utvecklas av Svenska Varv AB och som utgörs av vågkraftverk uppbyggda med en speciell slangpump som energiomvandlare. På grund av enkelheten hos omvandlarnas konstruktion och kraftverkets struktur synes denna typ av kraftverk ha goda förutsättningar att generera elenergi till en låg kostnad. Närmare detaljer om detta projekt är ännu ej tillgängliga men det finns skäl att förvänta sig ett teknikgenombrott inom en snar framtid.

2. SYSTEMSTUDIER

2.1 IPS-bojen

En systemstudie har genomförts avseende vågkraftverk uppbyggda av sk IPS-bojar. Studien går i första hand ut på att bestämma ur energikostnadssynpunkt optimal bojstorlek för vågförhållandena i Östersjön. I studien varierar ett antal kraftverksberoende parametrar. Däremot har parametrar såsom vattendjup och avstånd till land hållits konstanta.

Avsikten är att i en kommande rapport med en mer noggrann beräkning bestämma kostnaden för vågenergi producerad av kraftverk bestående av enligt studien "optimala" bojar.

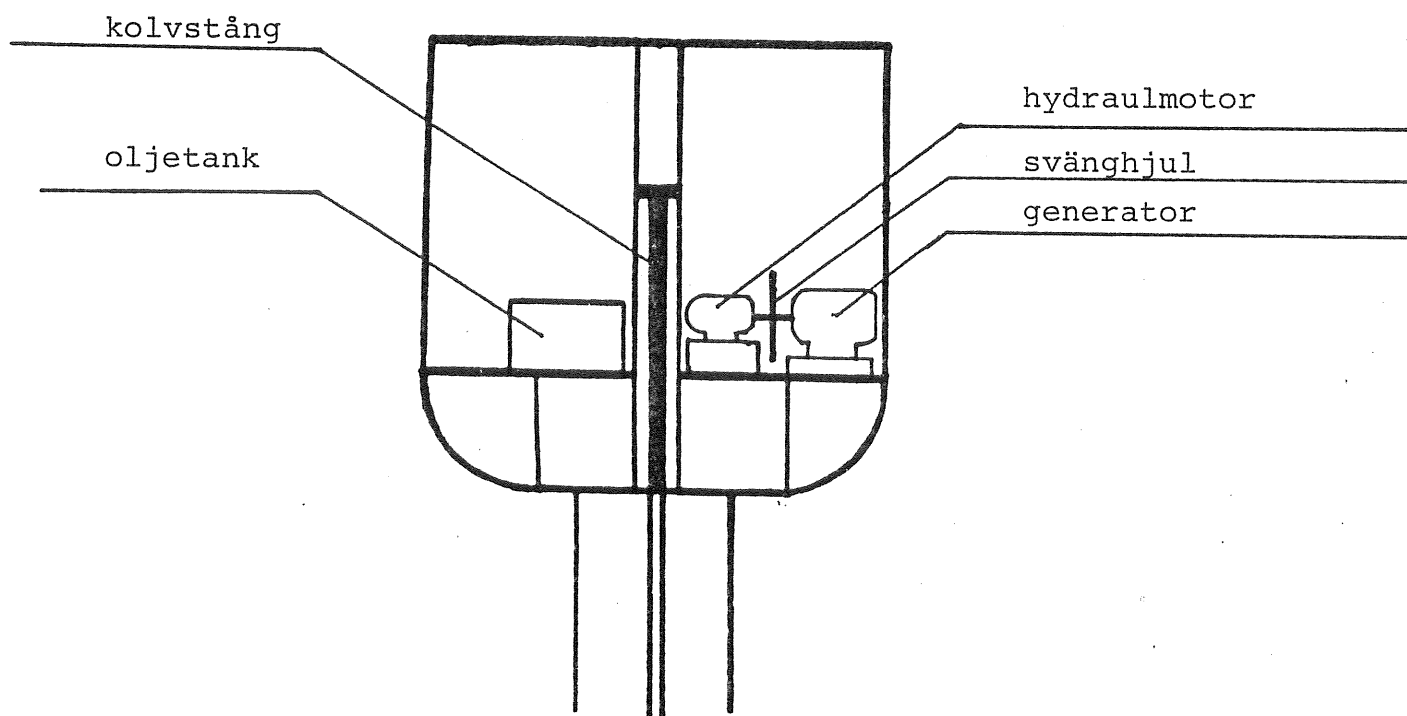
Som utgångspunkt för studien har använts bojar av ungefär samma utformning som den IPS-boj som provades under två säsonger vid Trubaduren. Resultaten från dessa försök (förankringskrafter, energiproduktion) har använts i systemstudien, där dimensioner, dimensionerande krafter samt energiproduktion för olika bojstorlekar i princip bestämts genom uppskalning med Froudes modellregler.

Nedan redogörs kortfattat för vilka studier som gjorts, samt de viktigaste resultaten.

Figur 2.1 visar utformningen av en boj och tabell 2.1 sammanfattar huvuddimensionerna hos de skalade omvandlarna.

För *strukturen* har både stål och betong studerats vardera med 3 olika antaganden om genomsnittlig vägg tjocklek kombinerat med 2 olika antaganden om materialkostnad. Följande materialkostnader har använts

stål	10 - 15 kr/kg	
armerad betong	1 - 2 kr/kg	(2400 - 4800 kr/m ³)



Figur 2.1 Exempel på bojutformning.

Tabell 2.1 Huvuddimensioner hos IPS-bojar

Diameter m	3	4	5	6
Höjd m	3	4	5	6
Rörlängd m	20	27	33	40
Rördiameter	1.0	1.3	1.7	2.0

Det mest sannolika är att det högre stålpriset och det lägre betongpriset är mest aktuella. Man finner därvid att stålalternativet är 3 ä 4 gånger dyrare än betongalternativet. Antaganden om olika betongtjocklek ger en ökning av kostnaden på 15 - 25% för de olika bojstorlekarna när tjockleken ökas.

Förankringssystemet har studerats relativt ingående. Vid uppskalningen har beaktats inverkan av stormvågor på förankringarna. Ankarna förlägges i ett triangulärt mönster pss att varje ankare betjänar tre bojar och varje boj har tre ankare. I genomsnitt erhåller då varje boj ett ankare. Ankarna utföres triangulära och är av gravitationstyp. De är dimensionerade för att inte flytta sig pga maximala driftkraften och även för maximala totala kraften - vid vilken dock lyftning av ena kanten accepteras.

Förankringslinorna är tvådelade med en flytande förtöjningsboj nära omvandlaren. Härigenom blir denna horisontellt förtöjd och förankringarna inverkar mycket lite på bojens hävningsrörelser.

Förankringslinorna dimensioneras för maximala krafter (uppskalade). Den lutande linan till ankaret studeras för både 30° och 60° lutning. Fyra olika material till linor undersöks:

kätting
stålvajer
polyesterlina
gummibeklätt stångstål

Förankringsbojarna utföres i stål. Vid dimensioneringen har följande säkerhetsfaktorer valts

kätting	= $1.8 \cdot s_o$
stålvajer	= 2.5
polyesterlina	= 2.5
stångstål	= 2.0

Installationen av ett bojkraftverk sker succesivt så att nya bojar med en eller två linor inkopplas på redan utlagda ankare. Bojar med maskineri och rör samt förankringssystem transporteras till platsen för kraftverk med supplyfartyg som kan ta en last på 600-800 ton. Boj och rör sammankopplas före sjösättning. Denna sker - för att undvika lyft - mha gejdrrar. Väl sjösatt omhändertas omvandlaren av en bogserbåt som drar den till sin avsedda plats där den installeras mha dykare. Ankarna sjösätts på jämförbart sätt. Kabeldragning utförs med ett speciellt kabellägnings fartyg.

För de olika bojstorlekarna har olika antaganden gjorts map lastkapacitet och utläggningskapacitet. Vid beräkningarna har följande antaganden gjorts beträffande kostnaderna för båtar.

Supplyfartyg	30000 kr/dygn
Bogserbåt	16000 kr/dygn
Kabelfartyg	16000 kr/dygn
Motorbåt	12000 kr/dygn

Pga tunga ankare vid 30^o- förankringar blir installationskostnaden ca 50-200% större än för 60^o-förankringar.

Underhållet kan indelas enligt följande

- förebyggande underhåll
- regelbunden service
- återkommande grundliga genomgångar
- reparationer

Regelbundna inspektioner görs 2 ggr per år och grundliga genomgångar vart tredje år. Bojarna antas bli ilandtagna 3 månader vart 6:e år. Den totala genomsnittliga kostnaden för underhåll blir förhållandevis hög och orsakar omkring halva energikostnaden. Utländska bedömningar ligger på betydligt lägre nivåer - ner mot 3%!

Driften består till största delen i att administrera underhållet samt att övervaka det automatiska kontrollsystemet mm.

Tillverkningen av omvandlarna bör ske på flera platser i anslutning till kraftverksområdena. Full tillverkningskapacitet antas uppnådd efter tre år och totala utbyggnadstiden är lika med livslängden som antagits till 25 år. Därefter skall i princip omvandlarna börja bytas ut. Härigenom erhålles kontinuitet i tillverkningen. Det ökande antalet omvandlare ger upphov till en ökande reparationskapacitet som sålunda når sitt maximum ännu senare.

Energiproduktionen har beräknats utgående från resultaten av försöken med IPS-bojen. Från dessa försök har en verkningsgradskurva bestämts som funktion av T_z . Denna har breddats något mht de outnyttjade möjligheterna till optimering. Kurvan har sedan skalats upp mha Froudes modellregel. Den använda metodiken är ännu inte verifierad till fullo. Det finns stora möjligheter att avsevärt öka energiproduktionen genom sk fasstyrning. Dessa möjligheter återstår att undersöka närmare.

I tabell 2.2 nedan sammanfattas investeringskostnader, underhållskostnader, energiproduktion och energikostnader mm för fyra olika bojstorlekar. Kapitalkostnaderna beräknas på grundval av 6% ränta (realränta) och 25 års livslängd.

Tabell 2.2 Sammanfattning av energikostnadsberäkning

kkkr/boj				
Bojdiameter m	3	4	5	6
Investering	<u>148.1</u>	<u>249.1</u>	<u>381.5</u>	<u>537.3</u>
Struktur	23.5	51.4	96.7	161.3
Förankring	33.0	55.9	98.7	158.7
Maskineri och kolvstång	9.5	20.3	36.0	52.0
Elsystem	44.2	58.7	65.0	75.5
Installation	37.9	62.8	85.1	89.8

Årskostnader	<u>30.6</u>	<u>47.4</u>	<u>63.8</u>	<u>86.9</u>
Kapital (7,8% annuitet)*	11.6	19.4	29.8	41.9
Underhåll	18.0	26.0	31.0	41.0
Drift	1.0	2.0	3.0	4.0

Energiproduktion MWh/boj,år	14	27	44	58

Energikostnad kr/kWh	2.19	1.76	1.45	1.50

*6% ränta (realränta), 25 års livslängd

I tabell 2.3 visas energikostnaden för alternativa antaganden beträffande underhållskostnader och energiproduktion. I anmärkningskolumnen anges förändringen relativt värdena i tabell 2.2.

Tabell 2.3 Energikostnad för andra alternativ

Bojdiameter	3	4	5	6	Anmärkning
Årskostnader	13.8	23.3	35.8	50.1	
Kapital	11.6	19.4	29.8	41.9	
Underhåll	1.2	1.9	3.0	4.2	10% av kapitalet
Drift	1.0	2.0	3.0	4.0	
Energikostnad kr/kWh	0.98	0.86	0.81	0.86	
Energiproduktion	42	81	132	174	+200% genom styrning
Energikostnad	0.73	0.59	0.48	0.50	
Energikostnad	0.33	0.29	0.27	0.28	+200% energiproduktion, 10% underhåll

Studien antyder att bojar med 5 m diameter är bäst anpassade till vågförhållandena vid Ölands Södra Grund. Investeringskostnaderna är tämligen väl kända.

Osäkerheterna i bestämningen av dels underhållets omfattning och dels energiproduktionen är stora. En jämförelse mellan tabellerna 2.2 och 2.3 illustrerar detta. I tabell 2.3 har erfarenhetsmässiga värden för underhållskostnaden inom offshoreindustrin använts. Vidare har erfarenheterna från NTH:s fasstyrda bojkoncept utnyttjats för uppskattning av en högre energiproduktion vid optimal styrning.

Underhåll och energiproduktion måste penetreras ytterligare.

2.2 Utländska koncept

Fyra engelska koncept är översiktligt kostnadsberäknade och jämförda för svenska förhållanden. De fyra är:

Salters Duck, University of Edinburgh
Bristol Oscillating Cylinder, University of Bristol (BOC)
Lancaster Flexible Bag, University of Lancaster (LFB)
Oscillating Water Column, National Engineering Laboratory (OWC)

Förutsättningen för denna jämförande studie är att ett fullt utbyggt kraftverk årligen skall producera 1 TWh. Havet utanför Bohuslän är valt som ett tänkt läge för ett kraftverk. Den producerade energin förs i land via 8 huvudkablar som är anslutna till riksnätet eller lokal förbrukare. Se figur 2.2.

Resultatet framgår av tabell 2.4 och 2.5. Tabell 2.4 redovisar storlek, huvudmått, installerad effekt, totalverkningsgrad mm. Tabell 2.5 redovisar kapital- och underhållskostnader samt uppskattad kostnad per producerad kWh..

Resultaten har sitt huvudsakliga värde såsom en jämförelse koncepten emellan.

Salters Ducks' omvandling bygger på ett gyro-elektriskt förfarande. Lancaster Flexibel Bag, LFB utnyttjar luftfyllda gummikamrar som ändrar volym när en våg passerar. Bristol Oscillation Cylinder, BOC utnyttjar förankringskrafterna till att driva ett antal cylinderkolvpumpar under högt tryck. NEL, Oscillating Water Column bygger på att en omsluten vattenyta, förbunden med omgivande vågor påverkar en luftvolym som pressas respektive sugas genom en turbin.

Duckkraftverket är orienterat parallellt med vågorna, LFB vinkelrätt mot vågorna. BOC är placerat helt - ca 2 m - under medelvattenytan. OWC-kraftverket är bottenfast, parallellt orienterat med vågorna.

Duck och LFB-kraftverken är "mjukt" förankrade antingen horisontellt via en boj eller direkt med kätting ned till botten. BOC-kraftverket är sträckt förankrat till botten. OWC-kraftverket, som utgörs av betongkassuner är utplacerade på en avjämnad botten.

Resultaten av kostnadskalkylen framgår av tabell 2.5. Underlaget för beräkningen är den engelska utvärderingen som är gjord av respektive projektgrupp. Kapitalkostnaderna är uppdelade på konstruktion, energiomvandling, installation, förankringar, kablar och landstationer. Kostnaderna för konstruktioner, installationer och förankringar har skalats ned mha av skalfaktorer samt beräknats proportionellt mot total konstruktionslängd hos kraftverket.

$$K_S = \alpha \cdot K_E \cdot \frac{L_S}{L_E} ;$$

K_S = total kapitalkostnad för svenska förhållanden

K_E = total kapitalkostnad i den engelska utvärderingen, 1£=10kr

L_S = totala konstruktionslängden för svenska förhållanden

L_E = totala konstruktionslängden för de engelska koncepten

α = skalfaktor

Kostnaderna för energiomvandling, kablar och landstation antages vara proportionella mot installerad effekt.

$$K_S = K_E = \frac{P_{inst}^S}{P_{inst}^E} ;$$

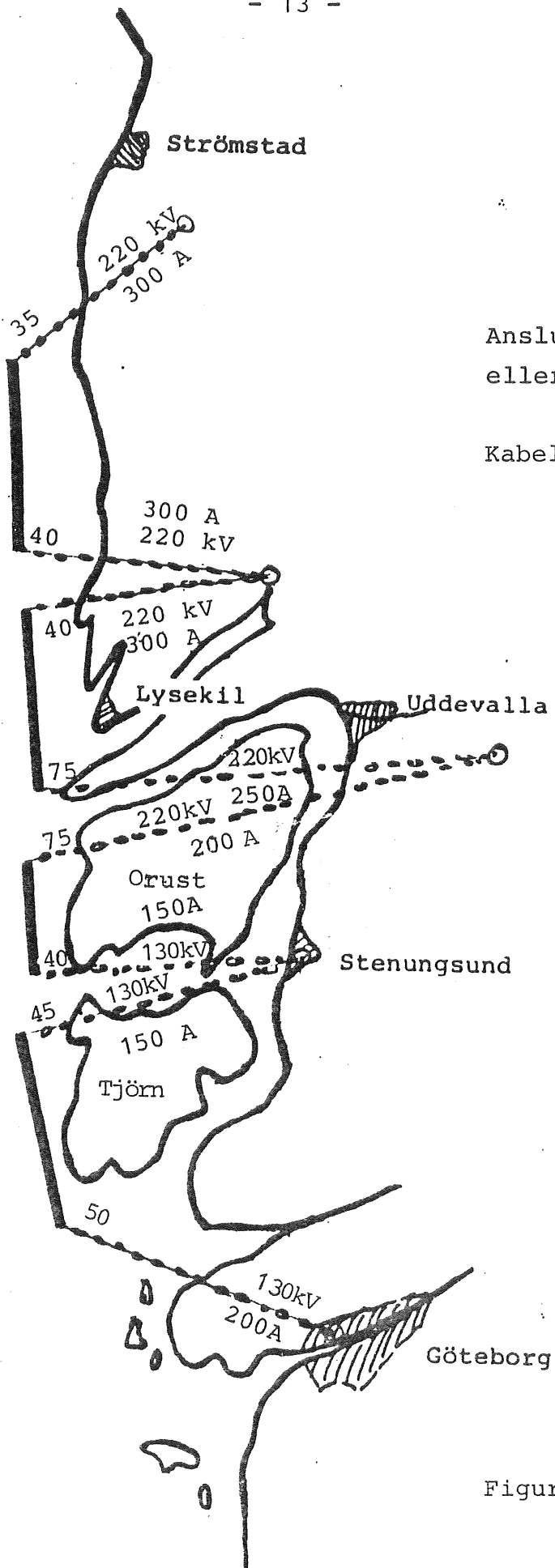
P_{inst}^S = total installerad effekt för svenska förhållanden

P_{inst}^E = total installerad effekt för engelska koncepten

Årliga underhålls och servicekostnader har förutsatts vara de samma för svenska förhållanden.

Priset per producerad kilowattimme är framräknat under antagande om 6% ränta och en 25-årig avskrivningstid enligt formeln

$$\text{Pris per kWh} = \frac{\text{total kap. kostn} \times 0.0782 + \text{drift och underhålls. kostn}}{\text{Producerad energi}}$$



Anslutning till riksnätet
eller till lokalförbrukning.

Kabellängden anges i km.

Skala 1:10⁶

Figur 2.2 Vågkraftverk med
huvudledningar till
land. 1 TWh produk-
tion. Installerad
effekt 700 MW

Koncept	Antal enheter	Konstruktionens huvudmått meter	Nettoareal* vattenyta	Nettoareal havsbotten	Inst. effekt MW	Total verkn. grad	Vattendjup meter
Duck	220	$\phi = 3.6$ $b = 10.2$ $L = 400^{**}$	$95 \times 0.15 \text{ km}^2$	$96 \times 0.3 \text{ km}^2$	400	0.26	40-60
BOC	2800	$\phi = 4.8$ $L = 26$	$100 \times 0.07 \text{ km}^2$	$102 \times 0.15 \text{ km}^2$	710	0.31	30-40
LFB	2200	$b = 5.2$ $h = 5.6$ $L = 80$	$132 \times 0.18 \text{ km}^2$	$132 \times 0.3 \text{ km}^2$	715	0.11***	30-40
NEL:s OWC	1460	$b = 14.8$ $L = 48$ $h = 27$	$85 \times 0.03 \text{ km}^2$	$85 \times 0.03 \text{ km}^2$	760	0.35	20-30

* Inkl säkerhetszoner och mindre trafikpassager.

** Avser 22 st enskilda ducks ihopkopplade på gemensam centrumaxel.

*** Projektgruppen anger i en kommentar att siffran kan innehålla en felfaktor ~2 och borde vara 0.22.

Tabell 2.4 Sammanställning av kraftverkens storlek.

Koncept	Kapitalkostnad Mkr					Inst effekt MW	kr/kWh
	Konstruktion	Energiomvandling	Installation förankring	Kablar landstation	Total kapital kostnad	Drift och* underhålls- kostnader	
Duck	1375	1130	268	408	3181	13	0.25
BOC	553	909	2799	1476	5737	115	0.45
LFB	1292	4175	537	1967	7911	80	0.62
OWC	794	1665	451	762	3672	44	0.29

Tabell 2.5 Sammanställning av kapital- och driftkostnader samt energikostnad för fyra engelska våg-
kraftkoncept nedskalade för vågförhållandena utanför Bohuskusten. Energiproduktion 1 TWh.

* I de engelska kostnadsberäkningarna är underhållskostnaden 1-2% av kapitalkostnaden
vilket kan tyckas lågt.

2.3 Simulering av strömmarnas fördelning i ett bojkraftverk med likströmsmellanled.

En möjlig utformning av ett bojkraftverks elsystem är att införa ett likströmsmellanled. Detta möjliggör att flera generatorer som ger en med vågorna fluktuerande växelström, efter likriktning kan seriekopplas. Härigenom uppnås en utjämning av spänningsvariationerna. För att ytterligare öka utjämningen av effekten innan den växelriktas in på nätet, parallellkopplas flera sådana länkar med seriekopplade generatorer.

I en sådan koppling finns det risk att spänningsvariationerna mellan länkarna orsakar tillfälliga avstängningar av enskilda länkar på grund av att dessas tomgångsspänning är lägre än de parallellkopplade länkarnas knutpunktsspänning.

För att utreda om sådana kommuteringar av ström mellan länkarna kan orsaka effektförluster har en simulering i tidplanet gjorts.

Simuleringen visar att de parallellkopplade länkarnas totala medeleffekt trots mycket ojämn strömfördelning är lika med summan av de enskilda länkarnas medeleffekt som erhålls då de arbetar var för sig, opåverkade av varandra. Att strömmen temporärt blir noll i en del länkar innebär alltså inte att totaleffekten minskar proportionellt mot antalet strömlösa länkar. Men eftersom de resistiva förlusterna är proportionella mot strömmens kvadrat ökar dock dessa förluster till följd av den ojämna strömfördelningen. Däremot visar resultatet av simuleringen att den ojämna effektfördelningen eventuellt behöver åtgärdas. Risk föreligger annars att enskilda länkar kraftigt överbelastas, vilket kan orsaka termiska skador eller leda till länkarnas bortkoppling.

Den lämpligaste motåtgärden kan vara kontroll av länkspänningen och/eller en anpassad inställning av överströmsskydd. Andra motåtgärder kan vara att minska den relativa spänningsvariationen genom att öka antalet seriekopplade generatorer, eller att sätta in extra induktanser som bromsar kommuteringen mellan länkarna.

Om och vilka motåtgärder som behöver vidtagas kan endast besvaras för varje kraftverk för sig. För att göra detta krävs kännedom om impedanser, spänningsvariationer och tröghetsmoment hos kraftverkets komponenter.

2.4 Isproblem för vågkraftverk.

2.4.1 Is i svenska farvatten.

Anläggandet av vågkraftverk i svenska farvatten kräver att man tar hänsyn till det hinder isen utgör. I Östersjön, Skagerack och Kattegatt förekommer is regelbundet. Erfarenhetsmässigt fryser t ex Östersjön helt cirka tre gånger per århundrade. Hög iskoncentration förekommer cirka vart tionde år i Skagerack och Kattegatt.

I det aktuella området förekommer isen såsom fast jämn is utefter kusterna och i skärgårdarna, såsom jämna drivisfält i öppen sjö och i form av isvallar mellan områden med fast och drivande is eller där den skjutits ihop av t ex vind och ström.

Under kalla perioder med stor turbulens i vattnet (vind, strömmar, vågor) och innan istäcke bildats, förekommer också bottenis ned till 5-10 m nivån under vattenytan. Under liknande förhållanden är risken för nedisning av rigg och överbyggnad stor.

Risken för fast is och isvallar är störst i Bottenviken, Bottenhavet, Norra Östersjön och Skagerack-Kattegatt, medan problem med nedisning och drivis förekommer i Södra Östersjön och i Skagerack-Kattegatt.

Nedan görs ett försök att kvantifiera risken för och storleken av vissa ispåkänningar på tre utvalda platser.

2.4.2 Fast is

I fast is härrör påkänningarna på ett ytförlagt vågkraftverk främst från vissa termiska spänningar i istäcket och från mindre förskjutningar av detta. Om kraftverket består av förankrade bojar, kan dessa följa med förskjutningarna i istäcket och man behöver då endast

ta hänsyn till de termiska spänningarna. Dessa kan vara cirka 200 kN/m och verkar då kring kraftverksbojens periferi men behöver ej tas upp av dess förankringssystem.

2.4.3 Drivande fasta isfält

Om kraftverket är bottenfast eller den fasta isen kommer i rörelse måste man räkna med andra belastningar. Sjöfartsverket räknar för fasta kassunfyrar med belastningar enligt uttrycket $P = k \cdot D$ där D är konstruktionens diameter och k en koefficient enligt tabellen nedan, Totalkraften måste anses vara lägst $P_{\min}$ oberoende av diametern.

Isområde	k (MN/m)	$P_{\min}$ (MN)
1 Västkusten och sydkusten söder om Öland.	0.5	2.0
2 Ostkusten Öland-Åland	1.0	3.5
3 Oskusten Åland- Kvarken	1.5	5.0
4 Ostkusten Norr Kvarken	2.0	6.0

Källa: Sikob "Sjöbaserade vindkraftverk". (1978).

Vattenbyggnadsbyrån, som konstruerat de flesta utsjöfyrarna i Sverige, räknar med följande överslagsmässiga formel för dimensionering av islasten mot dessa cirkulärcylindriska konstruktioner. (Engelbrektsson 1983).

$$P = k \sqrt{1 + 5 \frac{h}{D}} \cdot h \cdot D$$

där $k = 1.6 \text{ MPa}$

$h =$ isens tjocklek

och D konstruktionens diameter. Den angivna formeln anges gälla för Bottenviken och Bottenhavet.

2.4.4 Isvallar

Isvallar (packis) torde vara besvärande för både ytförlagda och nedsänkta kraftverk. I det förra fallet kan ju isen torna upp sig till betydande mäktighet och därigenom skada förankringar, undervattensdelar och delar av överbyggnad.

Om man genom att sänka kraftverksbojarna, vill undvika ispåkänningarna så är det viktigt att veta isvallarnas mäktighet på djupet. Om isvallarna "grundstöter" på kraftverket så erhålles ändå betydande islaster.

Det är svårt att kvantifiera isvallarnas mäktighet och de krafter dessa förorsakar på konstruktioner.

Paloso (1975) redovisar undersökningar av isvallar i Finska viken och Bottenhavet. Djupgåendet hos dessa var 6 till 14 m i medeltal, och höjden över vattenytan var 0.5-2 m. Den djupaste vallen gick ned 28 m och reste sig till 3.5 m. Denna extrema vall hade utbildats mot en strand. Karakteristiskt för isvallarna var att de inte var sammanfrusna under djupet 1 m under vattenytan.

2.4.5 Nedisning

Nedisning av både över- och undervattensdelarna av kraftverket kan vara ett problem. Nedisning av överbyggnaden utgör dels ett direkt hinder för rörliga delar dels förändras en kraftverksbojs flytstabilitet genom att dess tyngdpunkt höjs.

Nedisning av undervattensdelarna antas främst vara ett problem för de rörliga delarna men pga isens låga densitet försämrar även denna ispåväxt ett flytande kraftverks stabilitet.

Även nedisningsproblemen är svåra att kvantifiera. (Lundqvist och Udin 1977).

2.4.6 Exempel

Nedan har ett försök till kvantifiering av problemen för en förläggning av en flytande kraftverksboj på tre platser nämligen Hoburgs bank, Ölands Södra Grund och Skagerack i höjd med Uddevalla.

Jämnt istäcke

SMHI:s och Havsforskningsinstitutets (Helsingfors) nya "Klimatologisk isatlas" (1982) har använts som källa för att uppskatta isens förekomst, typ och tjocklek på de tre platserna.

Sannolikheten för isförekomst är cirka 25% vid Hoburgs Bank och 50% vid Ölands Södra Grund och i Skagerack i höjd med Uddevalla inom 5 distansminuter från kusten. Is förekommer således på dessa platser vart fjärde och vartannat år i medeltal.

För 21 februari redovisas nedan isfrekvensen, dominerande istyp och medelflaktjocklek hos denna om is förekommer.

	Hoburg	ÖSG	Skagerack
Isfrekvens %	10	25	40
Istyp	Spridd drivis	Spridd drivis	Tät drivis
koncentration	10-60%	10-60%	60-90%
Istjocklek	10-15 cm	5-10 cm	5-15 cm

Det bör påpekas att det vart fjärde år förekommer "mycket tät och kompakt is" på alla tre platserna.

En tillämpning av den i avsnitt 2.4.3 givna dimensioneringsformeln på de angivna istjocklekarna ger följande belastningar på en kraftverksboj med diameter 10 m. Dessa laster måste tas upp av förankringssystemet i medeltal varje gång is förekommer. Spridningen av istjockleken, ishållfastheten och andra förhållanden är avsevärd, varför man troligen bör dimensionera för högre istjocklek. Alternativt har angivits dimensionerande last enligt tabellen i samma avsnitt.

Totalkraft från istäcket
10 m.

ot en boj med diametern

Extrem last enligt
dimensioneringstabell
(MN)

Hoburgs

5

Ölands Södra Grund

10

Skagerack

10

Isvallar

Frekvensen av isvallen är på de angivna platserna mindre än 10% och förekommer då mycket glest. Det är en öppen fråga om de utgör något problem för kraftverken.

Man bör dock vid projekteringen se till att kraftverksanläggningen inte medför stor ökad risk för isvallbildningar.

2.4.7 Problemlösning

Det finns åtskilliga metoder att möta isproblemen. Vilka som kan väljas beror på de möjligheter som finns att konstruktionstekniskt lösa problemen och om verksamheten i så fall kan bära de därmed förknippade kostnaderna.

Gruppen för vågenergiforskning har ännu inte gjort någon teknisk eller ekonomisk värdering av detta. Detta avses till viss del genomföras under anslagsperioden jan 1983-juli 1984.

De principiella metoder som står till buds är

- att motstå iskrafterna, dvs dimensionera ankarsystem och fundament enligt t ex avsnitt 2.4.3.
- att låta kraftverksbojarna dras ned under isen och således skrubba

mot isens undersida. Detta ställer stora krav på vattentäthet, lokal hållfasthet och slät utformning.

- att använda ett helt nedsänkt kraftverk eller att automatiskt sänka kraftverket vid besvärande isförekommst.
- att ta in kraftverkets ytförlagda delar under stränga vintrar. Detta torde medföra orimligt stora kostnader om kraftverket består av många små enheter.
- att låta kraftverken frysa fast i isen och följa med denna vid överbelastning. Det torde vara svårt att tillåta detta dels på grund av kostnaderna vid återinstallerandet dels ur säkerhetssynpunkt, eftersom de fritt flytande bojarna skulle komma att utgöra ett allvarligt sjöfartshinder.

3. ALTERNATIVT UTNYTTJANDE

3.1 El, värme och avsaltning för lokala behov.

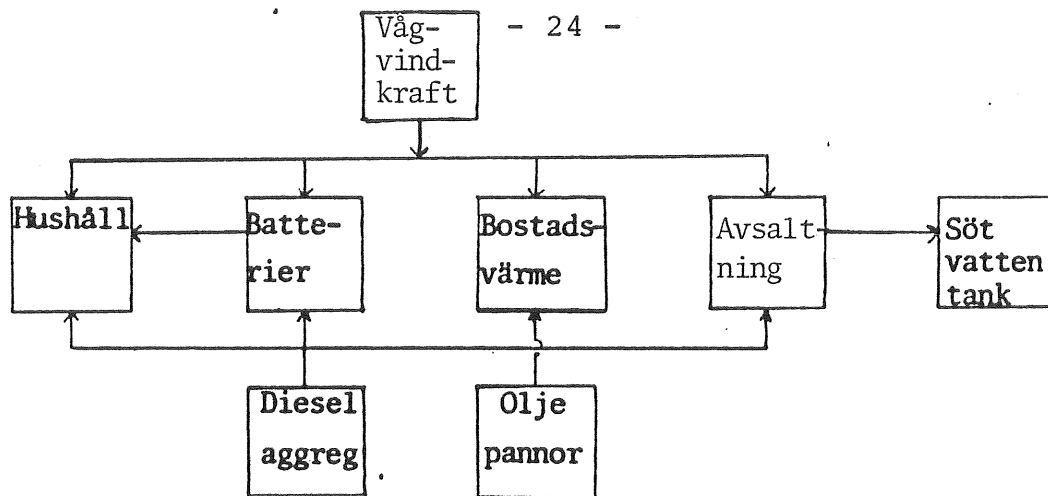
För Centrum för Marin Forskning- och Teknik har Technocean utarbetat en rapport "Systemmodell för energi och sötvattenförsörjning till isolerade öar" om möjligheterna att försörja isolerade öar med el, värme och avsaltat havsvatten med hjälp av vind och vågenergi. Rapporten är ett första steg för att utreda dessa möjligheter.

Det första steget i utredningen innebär upprättandet av en effekt- och energibalans för att med hjälp av den få en grov bild av dimensionering och kostnader. Ett andra steg tas, om första steget motiverar det, som innebär att den tekniska realiseringen närmare undersöks och att en förbättrad kostnadskalkyl görs.

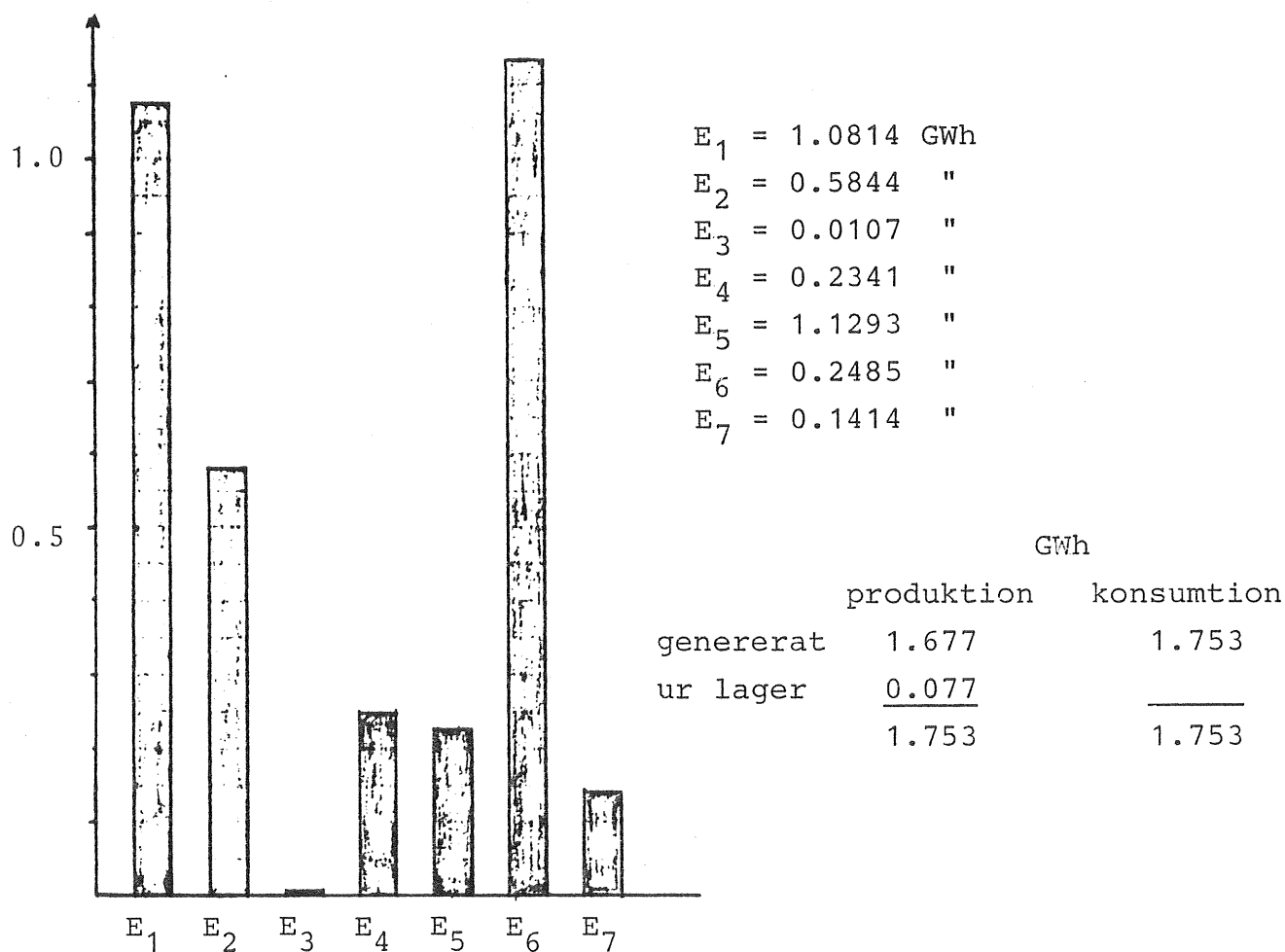
Rapporten redovisar de kvalitativa egenskaperna hos de ingående komponenterna i systemet se figur 3.1 samt hur en effekt- och energibalans kan beräknas där vind-, våg- och temperaturdata tillsammans med en antagen effektförbrukning för elkonsumtion utgör ingångsdata. Avslutningsvis ges ett exempel på en energibalans för en ö vilken lånar många av sina egenskaper från Kosteröarna i norra Bohuslän. Se figur 3.2

Vågenergigruppen bedömer det värdefullt om steg 1 kan slutföras. Till denna slutrapport har en preliminär utvärdering av kostnadsrelationerna mellan rapportens energisystem och ett med enbart bränslen utförts. Den visar att systemet med vind- och vågkraft blir ca 20% billigare om man enbart grundar sig på det i figur 3.2 redovisade exemplet. De viktigaste premisserna för detta resultat är:

1. Årlig avskrivningskostnad för vind och vågkraftverk: 600 kr/kW
2. Kostnad för termisk energi från bränslen: 25 öre/kWh
3. Kostnad för elenergi från bränslen: 55 öre/kWh
4. Samma investeringskostnad i bägge systemen för dieselkraftverk, oljebrännare och avsaltningsanläggning: Endast en månad har beaktats.



Figur 3.1 Schema över ett energi- och vattenförsörjningssystem.



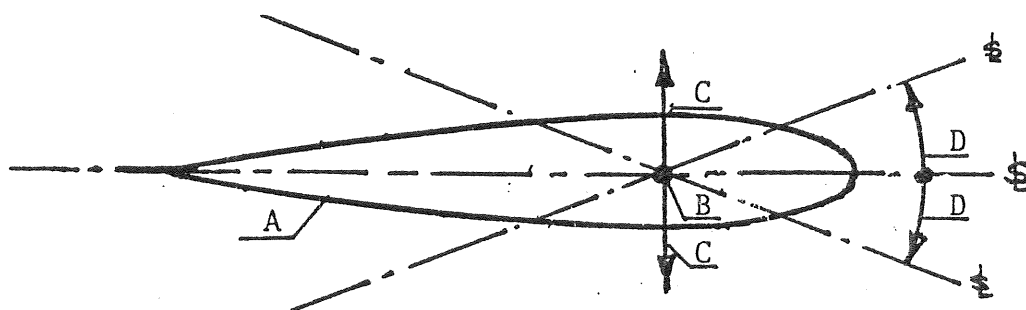
- E₁ energiproduktionen i vind- och vågkraftverk
 E₂ " " oljepannorna
 E₃ " " dieselaggregatet
 E₄ överskottsenergi som ej kommit till användning
 E₅ energikonsumtionen av elektricitet för belysning och apparater
 E₆ " " för uppvärmning
 E₇ energikonsumtion i form av avsaltat vatten

Figur 3.2 Beräkning av energibalans för januari 1978.

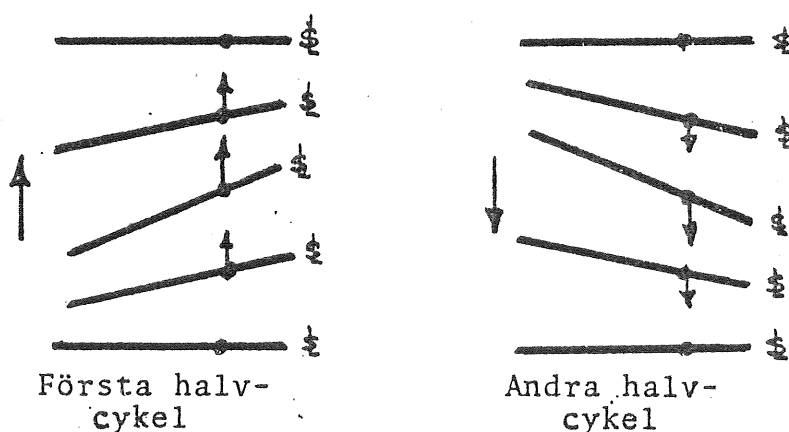
3.2 "Foilpropellern" - inledande arbete med hydrodynamisk teori.

Foilpropellern har intressanta möjligheter som en anordning som kan reducera förankringskrafterna för ett vågkraftverk. Den kan också själv fungera som vågenergiomvandlare. Foilpropellern är också intressant i samband med framdrivning av flytande konstruktioner till havs och i samband med positionering av sådana.

En snittsymmetrisk foil med horisontellt jämviktsläge, är nedsänkt under havsytan, se figur 3.3. Vidare är foilen fri att företa hävningsrörelse och att rotera $\pm 10^\circ$ om en horisontell axel. Axeln går genom foilen och är placerad för om dess hydrodynamiska tryckcenter i dess centerlinjeplan. Man har nu i princip en foilpropeller.



A: Snittsymmetrisk foil
B: rotationsaxel. C: hävningsrörelse. D: stampningsrörelse



Kombinerad hävnings- och stampningsrörelse
Bara foilens symmetrilinje (—) är visad

Figur 3.3 Snittsymmetrisk foil.

Om en sådan foil ges hävningsrörelser kommer den själv att företa stampningsrörelser i takt med hävningsrörelsen och alstrar då en horisontell framåtriktad kraft.

Om man låser foilen i ett horisontellt läge så att den bara utför hävningsrörelser är den i princip ett enda blad i Wells self-rectifying turbin (som är aktuell i samband med utnyttjande av vågenergi) och alstrar även då en horisontell kraft.

Det är dock den relativa rörelsen mellan foilen och vattnet som avgör storleken av den alstrade kraften. En foil som inte har hävningsrörelser men som nedsänkt påverkas av ett vågtåg kommer därför att alstra en horisontell kraft genom att den utnyttjar energin i vågorna.

Foilens nedsänkta horisontella axel kan t ex vara fastmonterad under en flytkropp. Flytkroppens hävningsrörelser i vågorna överförs då till foilen som även företar stampningsrörelser. Foilen utnyttjar då indirekt energin i havsvågorna och alstrar en horisontell kraft som är större ju mer energi som finns. En sådan anordning kan t ex användas för att reducera förankringskrafterna för ett vågkraftverk eftersom foilpropellern då utnyttjar något av den närvarande energin i vågorna. Om flera sådana anordningar monteras på pereferin av en diskusformad flytkropp kommer denna att rotera och man har i princip en (jättestor) Wells self-rectifying turbin. Alternativt kan den diskusformade flytkroppen ha egen rotor bestående av foilen. I båda fallen kommer periferihastigheten att vara låg. Rörelsen som alstras kan troligen utnyttjas med hjälp av t ex hydraulik och energin kan tas i land.

Foilens stampningsrörelse kan t ex vara styrd. Om dess rotationsaxel, ligger bakom dess tryckcenter, vilket kan vara en fördel hydrodynamiskt sett, måste stampningsrörelsen vara styrd. Om inte får man en slags hysteresiseffekt då tryckfördelningen över foilens framkant alstrar en horisontell kraft framåt medan den övriga delen av foilen pga dess stampningsvinkel alstrar en horisontell kraft bakåt.

Foilens hävningsrörelse kan också vara styrd. Om dess hävningsamplitud kan ökas utöver t ex flytkroppens hävningsamplitud ökas också kraften som foilen alstrar.

Eftersom användningsmöjligheterna för foilpropellern är så pass många och eftersom en hydrodynamisk teori för Foilpropellern är ett första steg mot en fullständig aerodynamisk teori för Wells self-rectifying turbin, som saknas, är inledande arbete utfört på detta område.

För att underlätta den teoretisk-hydrodynamiska analysen har man gjort samma antaganden som i den hydrodynamiska teorin för tredimensionella vingprofiler. För att i någon mån göra problemet generellt har man vidare antagit att foilen har en horisontell hastighet U . Hastigheten U kan följaktligen representera t ex tidvattenhastigheten vid foilen, men då U är en godtycklig konstant hastighet kan den också vara lika med noll.

På denna bas har två generella hydrodynamiska teorier utvecklats för foilpropellerns alternerande "tvärkraft", moment, horisontella kraft och verkningsgrad. Om man använder följande symboler:

c = foilens halva kordalängd

U = foilens horisontella hastighet, eventuell tidvattenhastighet vid foilen

v = vinkelfrekvens för foilens rörelse

β' = amplituden för foilens stampningsvinkel

h' = amplituden för foilens hävningsrörelse

b' = avstånden från foilens mittpunkt till stampningsaxeln

så visar teorin att det är följande fysiska parametrar som avgör foilpropellerns hydrodynamiska egenskaper:

- 1) Förhållandet vc/U , (reduced frequency)
- 2) Förhållandet $\beta'U/vh'$ (feathering parameter)
- 3) Stampningsvinkels position b' i relation till foilens mittpunkt
- 4) Foilens sidoförhållande

Teorin visar också att tryckfördelningen över området vid foilens framkant spelar en stor roll för storleken av foilens horisontella kraft. Foilens horisontella krafter är med andra ord större än den horisontella komponenten för dess alternerande tvärkraft.

4. ENERGIPRODUKTION

4.1 Energiproduktionen från en uppskalad IPS-boj.

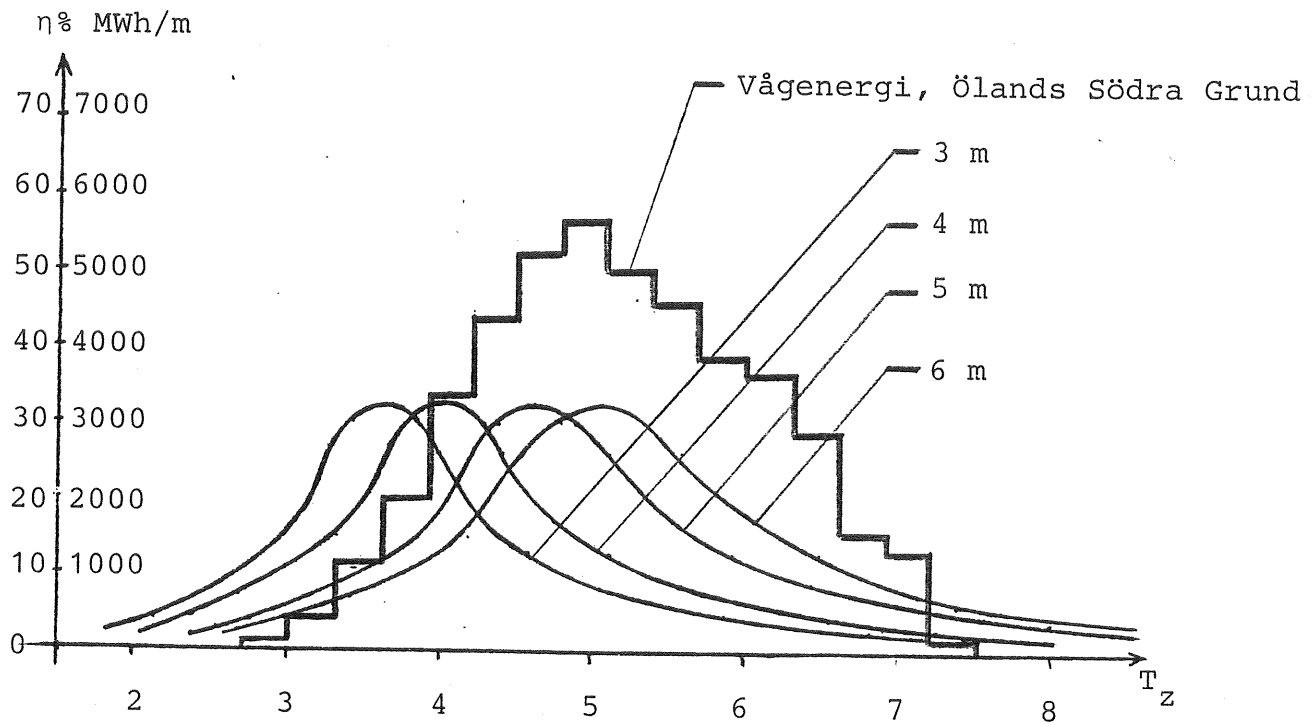
I en teoretisk studie av vågkraftverk för svenska vatten har olika bojstorlekar provats på uppmätta (SMHI) vågdata från Ölands Södra Grund.

Försöksresultaten från IPS-bojen vid Trubaduren utanför Göteborg 1981 har utnyttjats vid energiproduktionsberäkningarna. Med hjälp av uppmätt vågspektrum och elektrisk medeleffekt bestäms en verkningsgradskurva η som funktion av vågornas medelperiodtid T_z

$$\eta = \eta(T_z)$$

Verkningsgradskurvan skalas med Froudes modellregel för olika bojdimensioner och används på ett energi- T_z -diagram för vågorna vid Ölands Södra Grund. Vid uppskalningen införs fel pga olinjäriteter. Eftersom de olika skalade verkningsgradskurvorna används på samma vågsituationer tillkommer även ett skalningsfel. Metoden är dock enkel och kräver ingen större datormängd. Dessutom bygger den på mätresultat från försök i halvskala. Det återstår dock att närmare begrunda metodens tillförlitlighet.

Vid skalningen av Trubadurenförsöken har viss hänsyn tagits till möjligheten att optimalt dämpa och fasstyra en boj. IPS-bojen utgör ett två-kropparsystem. Den lättare delen, boj med rör, har en egenperiodtid ~ 2.8 s. I låst läge tillkommer vattenmassan i röret, ca 20 ton, varvid egenperiodtiden ökar till ~ 4.2 s. Den ursprungliga kurvan är därför breddad, runt sitt maximum 3.6 s, med ± 0.2 s. På så sätt tas viss hänsyn till möjligheten att fasstyra vid periodtider mellan 2.8 s och 4.2 s. Den breddade kurvan har sen skalats från en boj med diametern 3 m till 4, 5 resp 6 m. Verkningsgradskurvorna är inlagda i figur 4.1, tillsammans med ett stapeldiagram för vågenergin under ett år vid Ölands Södra Grund.



Figur 4.1 Verkningsgradskurvor.

Årsenergiproduktionen sammanfattas sålunda

Bojdiameter	Årsenergiproduktion
m	MWh
3	14
4	27
5	44
6	58

Görs bojen lättare och rörvolymen större ges möjligheter till en effektivare fasstyrning. Den upptagna årsenergin kan då ökas avsevärt - hur mycket får visa sig i det fortsatta arbetet.

4.2 Linjärisering av effektbegränsning

Av tekniska och ekonomiska skäl måste effektupptagningen begränsas i vissa vågenergiomvandlare. Detta betyder att en stor del av vågeffekten, i hårt väder, släpps förbi kraftverket. Med effektbegränsningen förs ett olinjärt element in i den matematiska modellen av omvandlaren, i detta fall en boj. Även om bojens rörelse inte störs så mycket av effektbegränsningen, påverkas den upptagna medeleffekten naturligtvis direkt. Vid energiproduktionsberäkningar måste hänsyn tas till detta.

4.2.1 Linjär_endimensionell modell_av_en_boj

Med en lämplig linjär approximation av effektbegränsningen, kan man ersätta olinjäriteten med en dämpkonstant.

Vågspektrum och överföringsfunktioner i frekvensplanet sparar data och räknetid. Dessutom presenteras vågdata till övervägande del som spektrum.

Utan hänsyn till effektbegränsning kan bojamplitudens överföringsfunktion i frekvensplanet tecknas

$$Y(\omega) = \sqrt{\frac{(c - a\omega^2)^2 + (b\omega)^2}{(c - (m+a)\omega^2)^2 + (b+b_1)^2\omega^2}} e^{-\frac{\omega^2 D}{g}}$$

I exemplet som används på följande sidor är

$m = 96000 \text{ kg}$	bojens massa
$a = 32000 \text{ kg}$	medsvängande vattenmassa
$b = 6700 \text{ } \omega \text{ Ns/m}$	hydrodynamisk dämpkonstant
$b_1 = 22000 \text{ Ns/m}$	linjär dämpkonstant pga effektuttaget
$c = 290000 \text{ N/m}$	hydrodynamisk fjäderkonstant
$D = 3.7 \text{ m}$	djupgående
ω	vinkelfrekvens

Eftersom vågorna är oregelbundna och slumpmässiga kan statistiska mått vara brukbara. I det linjära fallet får bojhastighetens varians σ_v^2 beräknas som

$$\sigma_v^2 = \int_0^{\infty} \omega^2 Y^2(\omega) \cdot S(\omega) d\omega$$

Den ur vågorna momentant upptagna effekten p blir

$$P = b_1 \cdot v^2$$

där

v bojhastigheten

och analogt kan medeleffekten P i en viss vågsituation tecknas

$$P = b_1 \sigma_v^2$$

I det olinjära fallet med effektbegränsning blir överföringsfunktionen spektrumberoende

$$Y(\omega) = Y(\omega, S)$$

4.2.2 Linjär approximation

Ett par olika approximationer har angivits i tidigare grupprapporter. En enklare och noggrannare redovisas nedan.

Metoden som används för approximering av effektbegränsningen liknar den man använder för beräkning av beskrivande funktioner.

Vattenytans nivå antas normalfördelad. I det linjära fallet blir även bojens hastighet normalfördelad. Effektbegränsningen alstrar emellertid olinjära krafter på bojen, som integreras till hastighet.

Bojen fungerar som lågpassfilter, så att bojhastigheten, trots olinjäriteten, tenderar att bli normalfördelad eller Gaussisk. I approximationen antas därför en Gaussisk hastighet hos omvandlaren.

I det olinjära fallet gäller för den momentana effekten p att

$$p = \begin{cases} b_1 \cdot v^2 & |v| \leq v_s \\ b_1 \cdot v_s^2 & |v| > v_s \end{cases}$$

där

$$v_s = 0.96 \text{ m/s}$$

motsvarar hastigheten vid maximal effekt 20.2 kW.

Då blir medeleffekten

$$P = E[p] = 2[b_1 \int_0^{v_s} v^2 f(v) dv + b_1 \cdot v_s^2 \int_{v_s}^{\infty} f(v) dv]$$

där

$f(v)$ frekvensfunktionen för bojhastigheten

och om

$$X_s = \frac{v_s}{\sigma_v}$$

kan medeleffekten skrivas

$$P = (2F(X_s) - 1 + 2X_s^2(1 - F(X_s)) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} X_s e^{-\frac{X_s^2}{2}}) b_1 \sigma_v^2$$

där

$F(X_S)$ normalfördelningen $(0,1)$

Härmed kan man definiera en approximativ linjär dämpkonstant

$$b_{1rms} = \frac{P}{\sigma_v^2} = (2F(X_S) - 1 + 2X_S^2(1 - F(X_S)) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} X_S e^{-\frac{X_S^2}{2}}) \cdot b_1$$

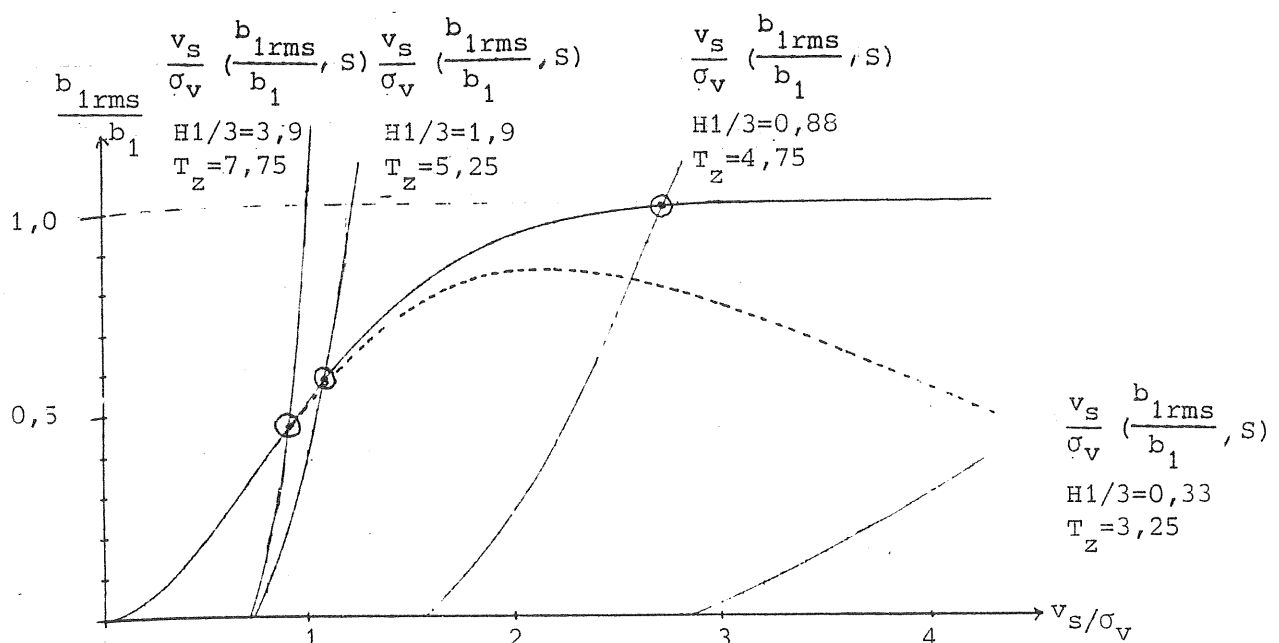
Man erhåller alltså två funktioner eller kurvor

$$\sigma_v = \sigma_v(b_{1rms}, S)$$

$$b_{1rms} = b_{1rms}(\sigma_v)$$

där skärningspunkten mellan dem ger den av vågsituationen bestämda medeleffekten

$$P = b_{1rms} \cdot \sigma_v^2$$



Figur 4.2 Bestämning av medeleffekt mht effektbegränsning.

4.2.3 Onoggrannhet och resultat

Det är nästan ogörligt att teoretiskt bestämma kvaliteten i den linjära approximationen för det stokastiska fallet.

Därför har olinjära tidsseriesimuleringar jämförts med linjära, där effektbegränsningen ersatts av approximationen $b_{1rms} = \frac{P}{\sigma_v^2}$.

Linjära approximationer av typen beskrivande funktioner ger sämre noggrannhet i smalbandiga spektra.

Tabell 4.1 Exempel på linjärapproximation.

skal factor	$H_{1/3}$ m	T_z s	icke-linjär simulering	P kW	linjär simulering	P kW
			σ_v^2 $m^2 s^{-2}$		σ_v^2 $m^2 s^{-2}$	
0.76	1.12	3.75	0.115	2.45	0.113	2.44
1.00	1.47	4.29	0.199	4.00	0.199	4.00
1.50	2.20	5.25	0.264	6.15	0.364	6.13
2.12	3.12	6.25	0.543	7.78	0.545	7.77
2.48	3.64	6.75	0.642	8.49	0.641	8.48
3.26	4.80	7.75	0.848	9.61	0.847	9.60

Den teoretiskt bestämda approximationen b_{1rms} , med antagen normalfördelning av hastigheten, ger ett relativt fel i den beräknade upptagna medeleffekten som ökar med vågornas medeleffekt. Metoden överskattar medeleffekten något (<5%). Felet ökar i stormsituationer. Detta beror bland annat på att olinjäriteten stör den antagna Gaussiska fördelningen, liksom på kvaliteten i antagandet om normalfördelning för olika vågsituationer.

Tar man ingen hänsyn till effektbegränsningen överskattas bojens energiproduktion med minst 100%. Simuleringarna antyder också att medeleffekten knappast någonsin överskrider halva maxeffekten. Detta bör vara intressant vid dimensioneringen av maskineriet.

4.3 Styrning och reglering av bojar

4.3.1 Allmänt

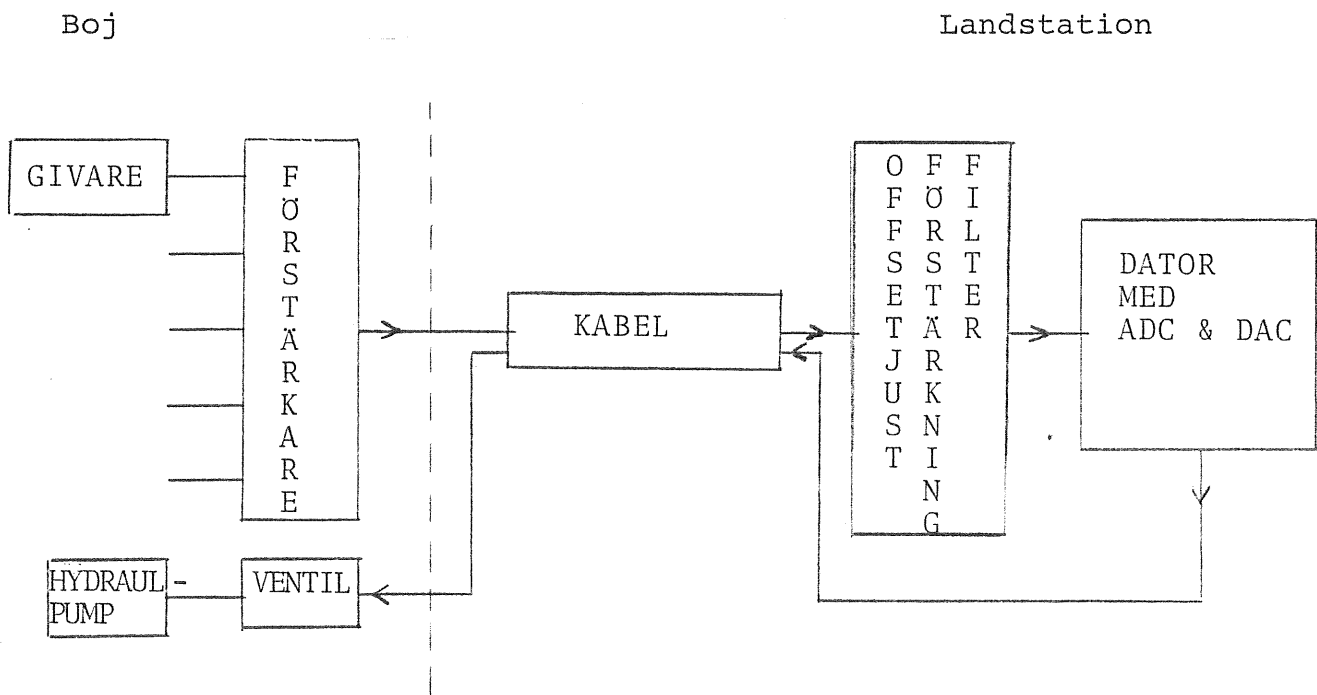
Flertalet omvandlarkoncept för vågenergi är resonanta, med en eller flera egenfrekvenser. Energiupptagningen sker med hög verkningsgrad vid resonans. Det är därför lämpligt att anpassa omvandlaren till de vågspektra som är typiska för varje plats. Genom massändringar kan den naturliga resonansen varieras något och följa förändringar i vågsituationen. På så sätt ökas energiproduktionen. Vidare kan omvandlarens rörelser i vågorna dämpas optimalt genom reglering av den upptagna effekten. I det norska bojprojektet vid NTH har man teoretiskt och experimentellt visat att stora energivinster går att göra med fasstyrning av bojrörelsen. På så sätt kan omvandlaren göras resonant i ett brett frekvensintervall. Relativt det naturligt resonanta systemet kan effektuttaget öka med 500-700% vid optimal fasstyrning. Priset blir ökad komplexitet och större påkänningar. En teknisk-ekonomisk optimering bestämmer hur effektiv styrning man bör välja. I en omvandlare med två svängande massor, exempelvis IPS-bojen, bestäms det styrbara frekvensintervallet av egenfrekvenserna hos den lättare massan och massornas summa. Fasstyrningen av tvåkropparsystemet blir svårare och mindre effektivt eftersom fasta referenser saknas. Påkänningarna vid faslösningen minskar dock relativt ett bottenfast system.

Interproject Service AB (IPS) har låtit bygga en liten boj för sjöförsök i Lygnern. Energin tas upp av en kuggstångsdriven hydraulpump. Stången och pumpen bromsas och låses av en styrd ventil. Bojen med vidhängande rör utgör ett oscillerande tvåkropparsystem. Den fria odämpade bojens egenresonansperiodtid är ~ 1.2 s och den låsta bojens ~ 2.3 s. Bojen blev något tyngre än beräknat varför fasstyrning förutsätter hårt väder med grövre sjö i Lygnern. En datoranpassad ventilstyrning har byggts och prövats för olika dämpningskarakteristiker. Däremot har inga fasstyrningsförsök hunnits med hittills.

4.3.2 Mät- och reglersystem på IPS-bojen i Lygnern

För närvarande mäts fem signaler, kolvstångens hastighet relativt bojen, kraften på kolvstången, bojens acceleration, vågorna och trycket i hydraulslangen. Dessa signaler förstärks och offset-justeras i bojen. Detta för att få högre spänningsnivå ($\pm 2.5V$) i kabeln och därmed mindre störningar.

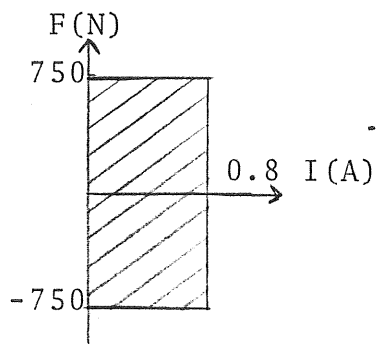
I land består systemet av en 19" förstärkarlåda och en bordsdator ABC 80 med ADC och DAC. I lådan finns spänningsförsörjning till givarna och elektroniken och möjlighet till finjustering av offset och förstärkning. Vidare finns två BNC-utgångar med omkopplare så att signalerna kan studeras på oscilloskop. Hydraulpumpens dämpning styrs mha ett varierbart strömbörvärde till den elektriska ventilen. Ventilens styrområde framgår av figur 4.4.



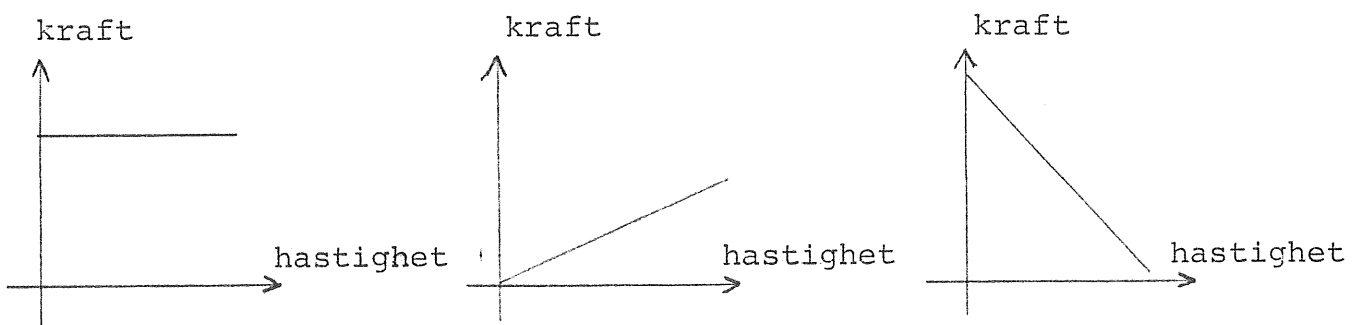
Figur 4.3 Blockschemat för styr & mätsystemet.

De karakteristiska (figur 4.5) för styrning som har provats 1982 har varit: konstant dämpkraft (strömbörvärdet konstant), konstant dämpning (strömbörvärdet proportionellt mot relativ hastigheten) och degressiv dämpning (strömbörvärdet proportionellt avtagande med relativhastigheten).

Det har konstaterats att bojen är för tung och styrningen för långsam för att en fasstyrning skall komma i fråga. Således bör en lättare boj byggas och dessutom bör styr- och mätprogrammet skrivas i assembler.



Figur 4.4 Ventilens styrområde.



Figur 4.5 Använda styrningskarakteristika

4.4 Inledande arbete med hydrodynamisk teori för generella rörelseekvationer för vågeffektomvandlare.

Om man i en grundläggande hydrodynamisk teori förutsätter små rörelser hos omvandlaren och vattnet kan den linjära överlagringsprincipen användas. Problemet för rörelserna kan då betraktas som sammansatt av ett linjärt diffraktionsproblem, där ett infallande monokromatiskt vågtåg verkar på omvandlaren i dess jämviktsläge och sprids åt olika håll, och ett linjärt radiationsproblem där omvandlaren genomgår föreskrivna oscillerande rörelser i vatten som annars har en lugn yta. Då det infallande vågtåget är harmoniskt förutsättes det att omvandlarens rörelse, exciterad av vågtåget, också är harmonisk.

På detta sätt har man byggt upp en resulterande hastighetspotential bestående av summan av hastighetspotentialerna för radiationen och diffraktionen, som var för sig är av första ordningen i amplituden. Interferensen mellan dessa två potentialer av första ordningen är av andra ordningen i amplituden för rörelserna och försummas i en konsekvent linjär teori.

Då det infallande vågtåget är harmoniskt och då omvandlarens rörelse är harmonisk arbetar man i frekvensplanet och de 3-dimensionella rörelserna kan anges av en uppsättning ekvationer av andra ordningen och av typen

$$\sum_{k=1}^6 [a_{jk} \ddot{x}_k + b_{jk} \dot{x}_k + c_{jk} x_k] = f_j(t) + g_j(t) \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad \dots (4.1)$$

där

x_k är omvandlarens svängning i mod k

a_{jk} är koefficienter i omvandlarens inertiamatris och innefattar också medsvängande vatten

b_{jk} är koefficienter i omvandlarens hydrodynamiska dämpningsmatris

c_{jk} är koefficienter i matrisen för omvandlarens hydrodynamiska återföringskrafter och moment

$f_j(t)$ representerar de våginducerade excitationskrafterna och momenten

$g_j(t)$ representerar andra yttre krafter, moment och bivillkor

En differentialekvation i tiden beskriver beteende av ett system för villkorligt valda tidsvarierande ingångsdata. Eftersom (4.1) bara gäller om högra sidan varierar sinusformad med tiden för en frekvens och koefficienterna på vänstra sidan har värde svarande till denna frekvens är (4.1) inte genuina differentialekvationer. (4.1) är i verkligheten en uppsättning algebraiska ekvationer som fastställer amplituderna och faserna för omvandlarens sex frihetsgrader under excitation av sinusformade krafter och under inverkan av sinusformade bivillkor. (4.1) kan följaktligen inte användas för att undersöka inverkan av olinjära och/eller transienta responser.

Om en flytande kropp vid tiden $t=0$ utsättes för en impuls så att den får en hävningsrörelse måste man för att få rörelsen lösa en integraldifferentialekvation i tidsplanet där en faltningsintegralterm ingår. Lösningen visar att kroppen i överensstämmelse med experiment oscillerar omkring sitt jämviktsläge ett ändligt antal gånger och närmar sig sitt jämviktsläge asymptotiskt som t^{-2} . Detta skiljer sig från en lösning baserad på en rörelseekvation av typen (4.1) där rörelsen dör ut exponentiellt med ett oändligt antal oscillationer.

För de flesta omvandlare använder man sig av olinjära effektomvandlingssystem. Effektbegränsning är också en typisk anordning som inför påtagliga olinjäriteter i systemet. Dessa komponenter genererar oharmoniska krafter när de undergår harmonisk rörelse och kan därför i realiteten inte simuleras i frekvensplanet. I stället måste simuleringsmodeller i tidsplanet utarbetas för alla komponenterna i omvandlingssystemet, den hydrodynamiska delen inberäknad. Då komponenterna i effektkedjan påverkar varandra kan omvandlarens prestationsförmåga endast uppskattas genom att simulera det olinjära systemet som helhet.

En tidsseriemodell blir nödvändig också för optimering av omvandlarens dämpning. Vidare kommer vågkrafterna som exciterar systemet att vara alstrade av oregelbundna vågor då överlagringsprincipen, lämplig för det linjära problemet, nu är ogiltig. För att uppskatta produktiviteten av en speciell konstruktion måste ett antal individuella simuleringar företagas med vågspektra svarande till representativt vågklimat som ingångsdata. Varje simulering måste köras tills man får tillförlitliga resultat, statistiskt sett.

En klassisk representation av de på omvandlaren verkande hydrodynamiska krafterna i tidsplanet måste innefatta en faltningsintegral-modell av reaktionskrafterna pga strålningens problem.

I samband med ekvationerna 4.1 i frekvensplanet innebär linjäritet att när omvandlarkroppen utsätts för summan av två eller flera excitationer, alla sinusformade och med samma frekvens, så är den resulterande responsen lika med summan av de enkla responserna. Antagandet utvidgas nu och täcker excitationerna av vilken karaktär som helst. I synnerhet om omvandlarkroppen får en impuls så kommer den motsvarande responsens varaktighet att vara mycket längre än impulsens varaktighet.

Vad som inträffar i ett ögonblick påverkar systemet i större eller mindre grad för all senare tid. Om man låter en sten falla ned i en damm så uppstår vågor som är i rörelse en lång tid. Om vattnet hade varit utan viskositet skulle vågorna närvara för alltid. Detta är i väsentlig motsättning till situationen när en kropp är i rörelse i en ideell vätska som fyller hela rummet. Vid detta tillfälle stoppar all vätskerörelse så snart kroppens rörelse stoppar. Man ser alltså att impuls-responsmetoden, som det arbetades med, framställer det fundamentala bidraget av vattnets fria yta på problemet.

Genuina rörelseekvationer i tidsplanet baserade på dessa observationer har visat sig vara av typen

$$\sum_{k=1}^6 [a_{jk} \ddot{x}_k + \int_{-\infty}^t K_{jk}(t-\tau) \dot{x}_j(\tau) d\tau + c_{jk} \dot{x}_k] = X_j(t) \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad \dots (4.2)$$

där

x_k är omvandlarens svängning i mod k

a_{jk} är koefficienter i omvandlarens inertiamatris och innefattar också frekvensoberoende koefficienter för medsvängade vatten

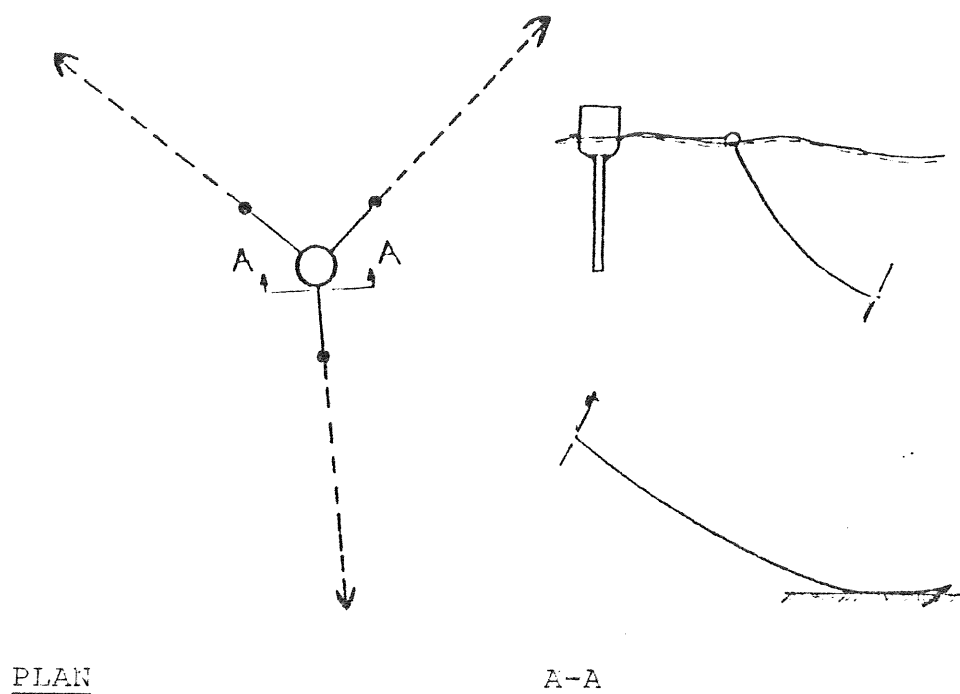
K_{jk} kan tolkas som kraften i tiden t pga en deltafunktion för kroppshastighet i en tidigare tid

c_{jk} är koefficienter i matrisen för omvandlarens hydrodynamiska återföringskrafter och moment

X_j är godtyckliga excitationskrafter och moment som är funktioner av tiden och som kan omfatta yttre krafter som vågkrafter, krafter pga vind, ström, passerande skepp, olinjära bivillkor osv eller motsvarande moment.

5. FÖRANKRING

5.1 Rörelser och förankringskrafter hos en vågenergiboj.



Figur.5.1 Förankrad vågenergiboj.

Plan: Vågenergiboj med förankring sedd ovanifrån.
De streckade linjerna är under vattenytan.
Snitt A-A: Vertikalt tvärsnitt.

Kraftspelet hos en förankrad vågenergiboj i rörelse är ganska komplext. För att ge vågenergigruppen ett verktyg med vilket det är möjligt att studera detta fenomen närmare, så är en matematisk modell för en vågenergiboj under utveckling.

Under året (1982) har problemet strukturerats. Det optimala tillvägagångsättet har visat sig vara att endast modellera de delar som finns på ytan. Den resterande delen simuleras med Jan Lindahls (Inst. för Vattenbyggnad) kabelprogram. Tillvägagångsättet blir då att ha kabelprogrammet som en subrutin till huvudprogrammet. Huvudprogrammet ger då subrutinen en förskjutning och får tillbaka en resulterande kraft.

För närvarande är förskjutningssambanden uppställda för vågenergibojen (inkl. ett godtyckligt antal förankringsbojar). Det som återstår är att ställa upp mass-, dämpnings- och styvhetssambanden.

Resultatet som erhålls vid en simulering är krafter och förskjutningar som funktion av en yttre last.

Någon rapport är ännu inte skriven.

6. GENERATOR

6.1 Burlindande asynkronmaskiner med reglerbar effektfaktor.

Under de senaste åren har ett forskarlag i England utvecklat en asynkronmaskin med reglerbar effektfaktor.

En sådan maskin kan leverera den reaktiva effekt den själv kräver. Behovet av kondensatorer och/eller faskompensatorer kan därigenom elimineras eller avsevärt reduceras.

Föreliggande rapport behandlar denna nya typ av asynkronmaskiner med burlindning, kännetecknade av att de har förmågan att alstra reaktiv effekt.

Grundprincipen för en sådan maskin framställdes för första gången mot slutet av 1970-talet av ett forskarlag vid Imperial College i London. Principens riktighet påvisades experimentellt år 1978 med en planluftgapsmaskin. Senare har två provmaskiner av den nya typen, men av konventionellt grundutförande byggts och testats. Den senaste maskinen var utförd för 112 W.

Den nya maskintypen har fått benämningen SCIM (av Self Compensated Induction Machine).

Sammanfattningsvis kan man om den nya maskintypen säga följande:

- a) Det är såväl analytiskt som experimentellt påvisat, att maskinen kan arbeta med reglerbar effektfaktor och under vissa förutsättningar tom leverera reaktiv effekt till nätet.
- b) Maskinen befinner sig ännu på laboratoriestadiet. De två provmaskiner av konventionellt utförande som byggts, har tillkommit genom omlindning av konventionella maskiner.

Hittills föreliggande provningsresultat tyder på, att man i dessa maskiner uppnått målet att erhålla en avsevärt förbättrad effektfaktor, dock på bekostnad av en något lägre verkningsgrad.

- c) Maskinens egenskaper i generatordrift har hittills inte varit föremål för undersökning.

Eftersom maskinens verkningsätt förutsätter en viss diskontinuitet i statorlindningen, kan man befara att verkningsgraden hos en sådan maskin alltid kommer att vara något lägre än hos en konventionell maskin med samma materialmängd. Det är dock möjligt att den förbättrade effektfaktorn fullt motväger denna olägenhet.

Det är ännu för tidigt att bedöma, om SCIM-maskinen har sådana egenskaper, att den kommer att annektera vissa sektorer av industriell drift och energiproduktion. Man måste beakta att maskintypen ännu inte varit föremål för rationell beräkning eller optimering.

7. VÅGDATA

7.1 Uppläggning av SMHI:s mätdata på Göteborgs Datacentral.

Vågenergigruppen erhåller kontinuerligt mätdata från SMHI:s vågmätningar. Dessa data kommer på papperslistor och arkiveras från och med 1982 på Institutionen för Vattenbyggnad.

Vid vissa tillfällen då typiska vågförhållanden för svenska vatten behövs, kan det vara lämpligt att ha dessa mätserier upplagda på data. Under året har därför vissa mätserier lagrats på Göteborgs Datacentral (GD).

De data som lagras innehåller information om vind, temperatur och vågor. Parametrar är

Vind: Hastighet och riktning. (Endast fasta stationer.)

Temp.: Luft och ytvatten. (Endast fasta stationer.)

Våg: Uppmätt H_s , uppmätt medelperiod (positiv nollgenomgång), de fem högsta vågorna och trettio spektraldensiteter som funktion av frekvensen.

Data som för närvarande finns lagrade är för;

Ölands södra grund okt. 1978 - nov. 1980

Hoburg juli 1981 - jan. 1982

Dessa serier är tillgängliga för vågenergigruppen. De finns på ett magnetband skrivet i EBCDIC-kod med 1600 bpi i packningstäthet.

Detta arbete kommer ej att rapporteras särskilt.

formation. Detta arbete är tänkt att resultera i ett data-program under året (1983).

Vindklimatet och stryklängderna studerades för de två mätplatserna. Det visade sig att medelvinden under mätperioden var så mycket lägre vid Hoburg än vid ÖSG att detta, kombinerat med stryklängderna, kunde förklara den stora skillnaden i medeleffekten.

Slutsatsen av studien blir dock ej att det finns mer våg-energi vid ÖSG än vid Gotland. Anledningen till detta är att mätplatsen utanför Hoburg har stora läeffekter från Gotland. Det skulle därför vara intressant att mäta vågorna på Hoburgs bankar och utanför Herrvik. Detta för att en bättre uppfattning om vågenergens geografiska spridning i dessa farvatten skall erhållas. Norrmännen har konstaterat att vågklimatet vid ett visst tillfälle kan variera avsevärt inom ett relativt begränsat området.

Rapportering av detta arbete sker i GR:46; "On the wave climate of the Southern Baltic."

