GRUPPEN FÖR VÅGENERGIFORSKNING

VÅGENERGIFORSKNING I SVERIGE

Slutrapport etapp 4.

Del III (V)

Tekniköversikt och tillämpningar

Rapport GR:44
Göteborg
December 1981

GRUPPEN FÖR VÅGENERGIFORSKNING

VÅGENERGIFORSKNING I SVERIGE

Slutrapport etapp 4.

Del III (V)

Tekniköversikt och tillämpningar

Rapport GR:44
Göteborg
December 1981

Förord

Denna rapport sammanfattar det forskningsarbete som utförts under etapp 4 av NE-projektet 5563 954. I vissa avsnitt berörs dock även arbete och resultat från såväl tidigare etapper som etapp 5. I kapitel 7 beskrivs försöken med en vågkraftboj till havs. Detta projekt har bekostats huvudsakligen av STU och Interproject Service AB.

På grund av rapportens omfång - närmare 500 sidor - har den uppdelats i fem delar, varje del motsvarande ett kapitel. Varje del innehåller även innehållsförteckning och, rapportsammanfattning och inledning. I slutet på varje kapitel redovisas till kapitlet hörande referenser.

Rapporten har utarbetats av Gruppen för vågenergiforskning som under etapp 4 har utgjorts av följande personer (aktuell institutionstillhörighet anges).

Jan Forsberg	Inst för elektromaskinlära, CTH
Jonny Hylander	" " " "
Svante von Zweygbergk	" " " "
Curt Falkemo	Inst för skeppshydromekanik, CTH
Birgit Jacobsson	" " " "
Johannes K Lunde	" " " "
Bengt-Olov Sjöström	" " " "
Lars Bergdahl	Inst för vattenbyggnad , CTH
Nils Mårtensson	" " " "
Lars-Ove Sörman	" " " "
Filip Alm	Technocean i Göteborg AB
Anders Byström	" " " "
Lennart Claeson	" " " "
Åke Kinnander	" " " "
Thomas Rindby	" " " "
Anders Rylander	" " " "
Pontus Clason	Arendalsvarvet fd Skeppshydromekanik, CTH

Dessutom har personal vid institutionerna och Technocean medverkat vid utskrift av rapporten, verkstadsarbete mm.

Information om forskningsgruppens verksamhet kan lämnas av Lennart Claeson (031-81 33 25) som är samordnare i gruppen.

Göteborg den 20 december 1981

Curt Falkemo
Projektledare

VÅGENERGIFORSKNING I SVERIGE

Slutrapport etapp 4.

Innehållsförteckning i:iii

Förord i:i

1. SAMMANFATTNING 1:1
   1.1 Allmänt 1:1
   1.2 Internationell utblick (Del I) 1:1
      1.2.1 Uppföljning av internationell utveckling 1:1
      1.2.2 Litteraturuppföljning bibliotek 1:3
      1.2.3 Kontakter med utländska forskare 1:3
   1.3 Energipotential (Del II) 1:3
      1.3.1 Vågmätningar, bruttoenergipotential 1:3
      1.3.2 Tillgängliga vattenområden 1:4
   1.4 Tekniköversikt och tillämpningar (Del III) 1:4
      1.4.1 Vågkraftverk 1:4
      1.4.2 Energiupptagning 1:5
      1.4.3 Elektriska system 1:5
      1.4.4 Förankringssystem 1:6
      1.4.5 Material 1:6
      1.4.6 Realisering av vågkraftverk 1:6
      1.4.7 Kostnader 1:7
   1.5 Teoriutveckling (Del IV) 1:7
      1.5.1 Grundläggande teoriutveckling 1:7
      1.5.2 Tillämpad teori 1:8
      1.5.3 Teoretisk analys av petropumpslang 1:8
      1.5.4 Optimering av boj 1:8
      1.5.5 Energiproduktionsberäkning 1:9
      1.5.6 Frekvensanalys inom vågteorin 1:9
   1.6 Modellförsök (Del V) 1:10
      1.6.1 Laboratorieförsök 1:10
      1.6.2 Försök i Lygern med kopplade bojen 1979. 1:10
      1.6.3 Försök i Lygern med kopplade bojen 1981. 1:10

1.6.4 Försök i Lygnern med petropumpskraftverk 1:11
1.6.5 Försök med IPS-bojen vid Trubaduren 1:11
2. INLEDNING 2:1
2.1 Allmänt 2:1
2.2 Rapporten 2:2
2.3 Rapportförteckning 2:3

3. INTERNATIONELL UTBLICK 3:1
3.1 Uppföljning av internationell utveckling 3:1
3.1.1 Norge 3:1
3.1.2 Storbritannien 3:5
3.1.3 Japan 3:20
3.1.4 Övriga länder 3:24
3.2 Litteraturuppföljning 3:25
3.3 Kontakter med utländska forskare 3:28
3.3.1 Allmänt 3:28
3.3.2 Kontakter refererade i reserapporter 3:28
3.3.3 Övriga kontakter 3:44
3.4 Referenser 3:48

4. ENERGIPOTENTIAL 4:1
4.1 Vågmätningar 4:1
4.1.1 Använda metoder för insamling av vågdata 4:1
4.1.2 Redovisning av vågdata 4:13
4.1.3 Bedömning av årsmedeleffekter 4:20
4.2 Tillgängliga vattenområden 4:26
4.2.1 Allmänt 4:26
4.2.2 Isförhållanden 4:26
4.2.3 Miljöförhållanden 4:29
4.2.4 Fiske 4:30
4.2.5 Sjöfart 4:33
4.2.6 Militära intressen 4:33
4.2.7 Fritidsintressen 4:33
4.2.8 Anslutning till kraftnätet 4:33
4.3 Lokalisering till havs 4:35
4.4 Referenser 4:35

5. TEKNIKÖVERSIKT OCH TILLÄMPNINGAR 5:1
5.1 Vågkraftverk 5:1
5.1.1 Allmänt om vågkraftverk 5:1
5.1.2 Struktur hos vågkraftverk 5:1
5.1.3 Samlokaliserade vind- och vågkraftverk 5:6
5.2 Energiupptagning 5:15
5.2.1 Några hydrodynamiska principer 5:15
5.2.2 Omvandlare - översikt 5:19
5.2.3 Mellanled 5:62
5.2.4 Generatorer 5:69
5.3 Elektriska system 5:85
5.3.1 Frekvensomriktarsystem 5:85
5.3.2 Exempel på system för simulering av vågkraftverk map elektriska systemet 5:90
5.4 Förankringssystem 5:100
5.4.1 Struktur och funktionssätt 5:100
5.4.2 Komponenter 5:105
5.5 Material 5:112
5.5.1 Allmänt 5:112
5.5.2 Stål 5:112
5.5.3 Betong 5:118
5.5.4 Plaster 5:121
5.5.5 Gummi 5:123
5.6 Realisering av vågkraftverk 5:125
5.6.1 Tillverkning 5:125
5.6.2 Installation 5:126
5.6.3 Underhåll och drift 5:126
5.6.4 Utförda studier 5:127
5.7 Kostnader 5:135
5.7.1 Principer för kostnadsberäkning 5:135
5.7.2 Utförda kostnadskalkyler 5:142
5.7.3 Exempel på kostnadskalkyler 5:147
5.8 Referenser 5:151

6. TEORIUTVECKLING 1/6.1
6.1 Grundläggande teoriutveckling 1/6.1
6.1.1 Allmänt om den hydrodynamiska teorin 1/6.1
6.1.2 Rörelseekvationerna 1/6.2

6.1.3 Hastighetspotentialer 1/6.3
6.1.4 Den hydrodynamiska reaktionskraften och dess moment 1/6.4
6.1.5 Kochinfunktionen 1/6.5
6.1.6 Den hydrodynamiska exitationskraften och dess moment Haskinds formel 1/6.6
6.1.7 Effektupptagning hos en svängande kropp i vågor 1/6.7
6.1.8 Exitationskraftens amplitudfaktor 1/6.8
6.1.9 Direktivitet och absorptionslängd 1/6.9
6.2 Tillämpad teori 6:82
6.2.1 Använda begrepp 6:82
6.2.2 Energi- och effektspektrum 6:84
6.2.3 Standardspektrum 6:87
6.2.4 Linjär teori för NE-bojen 6:88
6.2.5 Teori för den kopplade bojen 6:93
6.2.6 Energiupptagning i oregelbunden sjö 6:99
6.3 Teoretisk analys av petropumpslang 6:101
6.4 Optimering av boj 6:102
6.5 Energiproduktionsberäkning 6:120
6.5.1 Inledning 6:120
6.5.2 Den statistiska modellen 6:121
6.6 Frekvensanalys inom vågteorin 6:127
6.6.1 Bakgrund 6:127
6.6.2 Den diskreta Fouriertransformen 6:127
6.6.3 Autokorrelationsfunktionen och effektspektrum 6:128
6.6.4 Fast Fourier Transform (FFT) 6:128
6.6.5 Överföringsfunktion 6:130
6.6.6 Reducering av felet i spektralskattningen 6:132
6.6.7 Spektralupplösning 6:133
6.7 Referenser 6:134

7. MODELLFÖRSÖK 7:1
7.1 Laboratorieförsök 7:1
7.1.1 Målsättning 7:1
7.1.2 Utförda modellförsök 7:1
7.1.3 Försöksanordningar 7:10
7.1.4 Resultat 7:13
7.1.5 Slutsatser av modellförsöken 7:26

7.2 Försök i Lygnern med kopplade bojen 1979 7:28
7.2.1 Målsättning 7:28
7.2.2 Utförda försök 7:28
7.2.3 Försöksanordningar 7:32
7.2.4 Utvärdering 7:40
7.2.5 Resultat med kommentar 7:43
7.2.6 Slutsatser och sammanfattning 7:47
7.3 Försök i Lygnern med kopplade bojen 1981 7:48
7.3.1 Målsättning 7:48
7.3.2 Utförda modellförsök 7:48
7.3.3 Försöksanordningar 7:48
7.3.4 Resultat 7:55
7.3.5 Slutsatser och erfarenheter 7:70
7.4 Försök i Lygnern med petropumpskraftverk 7:79
7.4.1 Försök 1979 7:79
7.4.2 Försök 1980 7:81
7.5 Försök med IPS-bojen vid Trubaduren 7:84
7.5.1 Målsättning 7:84
7.5.2 Konstruktion och funktion 7:84
7.5.3 Utförda försök 1980 7:89
7.5.4 Resultat 1980 7:96
7.5.5 Utförda försök 1981 7:113
7.5.6 Resultat 1981 7:116
7.6 Referenser 7:123

1 SAMMANFATTNING

1.1 Allmänt

I detta kapitel redovisas kortfattat för innehållet i kapitel 3-7 i rapporten. Sammanfattningarna står inte i proportion till omfånget hos respektive kapitel utan tonvikten har lagts vid att ge upplysning om väsentliga resultat.

1.2 Internationell utblick

1.2.1 Uppföljning av internationell utveckling

I detta avsnitt lämnas en redogörelse över utvecklingen inom vågenergiforskningen i flera länder. Informationens aktualitet och insiktsfullhet varierar betydligt.

Norge har hittills satsat ca 60 milj kr, vilket motiverats av de goda förutsättningarna landet har med ett årsmedelvärde på ca 20 kW/m i vågeffekt. I huvudsak har tre olika koncept utvecklats - fasstyrd boj, svängande vattenpelare och koncept med fokuserande kraftverk. Dessutom har betydande insatser gjorts beträffande studium av vågor och vågklimat. I slutet av 1981 presenterades en evaluering av den norska vågenergiforskningen. I denna jämfördes de tre olika koncepten för tre olika platser på den norska kusten. För den bästa av dessa platser undersöktes även ett brittiskt projekt som jämförelse. Evalueringen tog sikte på att jämte energipotentialen uppskatta energikostnaderna. I del II av evalueringen presenteras energikostnader på mellan 100 och 150 öre/kWh, för de norska koncepten och över 200 öre/kWh för det brittiska. Forskningsteamen är starkt kritiska mot det sätt varpå kostnadsberäkningarna har gjorts och menar att kostnaderna bör kunna bli lägre än 50 öre/kWh.

Storbritannien har det tyngsta programmet med en satsning på hittills 120 milj kr. Satsningen har dels gjorts på olika koncept dels på stödforskning av allmän karaktär t ex map nya omvandlingssystem, insamling och analys av vågdata, hållfasthet, förankring, energigenerering och energiöverföring samt miljöpåverkan.

Storbritannien räknar med att ca 20% av elenergibehovet skulle kunna täckas med vågenergi. Pga att vågenergin skulle produceras långt från konsumenterna blir nätets kapacitet begränsande. Av de många koncept som studerats kan nämnas Salter's ducks, Cockerells Contouring rafts, Russel's rectifier, NEL's OWC (Oscillating Water Column), Bristol Cylinder, Lancaster flexible bags och Vickers Chambers.

Försök har utförts i olika skalor - 1/100 i laboratorier och 1/10 till sjöss, teoretiska modeller har utvecklats och kostnadsberäkningar har genomförts. Efter hand har på grundval av detta omfattande arbete ett antal omvandlare befunnits orealistiska av ekonomiska eller tekniska skäl (i första hand överlevnad). För närvarande är de fyra sistnämnda omvandlarna ovan föremål för fortsatt satsning.

De beräknade kostnaderna för vågenergin varierar kraftigt och beror i hög grad på vem som räknat. Det beräkningar som gjorts av oberoende konsulter pekar på kostnader mellan 60-150 öre/kWh medan forskningsteamens egna uppskattningar hävdar kostnader mellan 35 och 100 öre/kWh.

Under 1982 skall Storbritannien besluta om nästa steg skall bli en fullskaleprototyp till havs och i så fall även hur den skall se ut.

Japan är det land som sysslat längst med vågenergi genom sina vågdrivna ljud- och lysbojar. I mitten av 1970-talet byggde man efter omfattande laboratorieförsök en fullskaleprototyp med samma omvandlingsprincip som bojarna. Prototypen, med namnet KAIMEI utnyttjas nu i ett internationellt samarbetsprojekt inom IEA. De deltagande länderna ges möjlighet att utprova olika turbiner mm.

Japan studerar även ett antal andra koncept samt har ett pågående vågmätningsprogram.

USA har gjort vissa undersökningar av ljud- och lysbojar samt av en vågpump. Mest aktuell är idén med "dam-atoll" som bygger på vågornas refraktion. USA deltar även i Kaimeiprojektet.

Övriga länder som visat intresse för vågenergi är Canada, Eire, Frankrike, Finland, Danmark, Italien m fl.

1.2.2 Litteraturuppföljning, bibliotek

Sedan oktober 1979 bevakas ett flertal relevanta tidsskrifter. Ett bibliotek har byggts upp som nu omfattar ca 3000 artiklar, rapporter och proceedings med särskild inriktning på kroppars rörelser i vågor, krafter från vågor, vågspektra och förankring.

1.2.3 Kontakter med utländska forskare

Ett viktigt led i kunskapsuppbyggnaden utgör kontakterna med utländska forskare. Dessa kontakter har bestått både i korrespondens och personliga sammanträffanden. Oftast har ramen varit en konferens eller liknande. Av naturliga skäl har umgänget med norrmännen varit särskilt livligt. I rapporten ges en förteckning över deltagande i olika konferenser mm samt en uppräkning av andra former av kontakter. Särskilt givande har seminariesamarbetet med Norge varit. Vidare har vi haft stor nytta av deltagandet i de stora brittiska konferenserna och av ett flertal studiebesök i både Storbritannien och Norge. I och med symposiet i Göteborg 1979 blev den svenska forskningsinsatsen internationellt känd och erkänd.

1.3 Energipotential

1.3.1 Vågmätningar

I detta avsnitt redovisas alla kända bestämningar för minst ett helt år av vågeffekter runt den svenska kusten. Bestämningarna utgörs av observationer, mätningar och olika hindcastberäkningar. Metoderna beskrivs och bedöms. Sammanlagt föreligger 10 olika källor. Värden finns för 33 olika platser längs svenska kusten och gäller för tidsperioder från 20 år till 1 år. Slutligen görs en sammanfattande bedömning av årsmedeleffekten på de nämnda platserna

där även tillförlitligheten av bestämningsmetoden anges och hänsyn till isförekomst tas.

De mest intressanta områdena på västkusten och utanför Gotland bedöms ha en årsmedeleffekt på 5 ± 1 kW/m.

1.3.2 Tillgängliga vattenområden

Kapitlet behandlar de hinder som kan tänkas för placering av vågkraftverk utmed den svenska kusten. Sålunda beskrivs isförhållandena under normal respektive sträng vinter samt diskuteras vilka problem isen kan medföra och hur de skulle kunna bemötas. Vidare berörs eventuella miljöproblem men framför allt riskerna för konflikt med fiskerinäringen. Metoder för fiske beskrivs kortfattat och en översikt över var fisket bedrivs ges. Konfliktrisker med sjöfart, militära intressen, fritidsintressen och marin kulturminnesvård berörs, liksom anslutningsmöjligheterna till kraftnätet.

Möjligheten att lokalisera vågkraftverk till havs diskuteras.

Utanför bohuskusten kan fiske och is utgöra betydande hinder för introduktion av vågkraftverk. Öster om Gotland bedöms problemen vara betydligt mindre.

1.4 Tekniköversikt och tillämpningar

1.4.1 Vågkraftverk

Detta omfattande kapitel berör först olika strukturlösningar hos vågkraftverk. Bl a tas möjligheten upp att samlokalisera havsförlagda vindkraftverk och vågkraftverk. En studie av detta har gjorts för Gotland.

Därefter berörs kortfattat några olika hydrodynamiska principer samt olika sätt att dela in vågenergiomvandlare. Därefter beskrivs utformning och funktion mm hos de flesta omvandlare som på allvar studerats. Antalet koncept fördelar sig på olika länder enligt följande:

Japan	7
Storbritannien	12
Norge	3
USA	4
Finland	2
Västtyskland	1
Danmark	1
Frankrike	1
Mauritius	1
Summa	32

De svenska koncepten berörs i kapitel 7 och tas ej upp här.

Ett stort antal patent finns på området och ett par exempel lämnas.

1.4.2 Energiupptagning

Fortsättningsvis beskrivs olika omvandlingsled mellan det hydrodynamiska och det elektriska ledet, såsom mekanisk, hydraulisk och pneumatisk omvandling.

En omfattande undersökning av rotorlindningsfria generatorer för vågenergiomvandlare sammanfattas ganska kortfattat. Särskilt berörs de högst speciella krav som ställs på en sådan generator: den skall uppfylla extremt höga miljökrav med starkt salthaltig och fuktig atmosfär och den bör vara praktiskt taget service- och underhållsfri. Dessa krav medför att endast vissa typer av generatorer kommer ifråga nämligen borstlösa synkrongeneratorer, asynkrongeneratorer med burlindad rotor samt reluktansgeneratorer. Särskilt reluktansgeneratorer diskuteras.

I ett följande avsnitt följs tidigare gjorda utredningar avseende den linjära generatorn upp. Ett konkret exempel på en dimensionering av en 50 W modellgenerator visas.

1.4.3 Elektriska system

I avsnittet ges en översikt över sådana frekvensomriktarsystem som är lämpliga för överföring av effekt från vågenergiomvandlare till

ett kraftnät. En förutsättning är att den elektriska energin levereras med en likspänning överlagrad med ett spektrum av växelströmskomponenter. Den elektriska effektens kvalitet förbättras genom olika åtgärder avseende reaktiv effektförbrukning, övertonshalt i växelspänningen, modulation av den aktiva och reaktiva effekten samt variation hos den avgivna effekten.

Kapitalet exemplifierar fortsättningsvis hur man kan simulera det elektriska systemet hos ett helt vågkraftverk. Som indata används verkliga spänningstidsserier från fältmätningar. Med en uppkoppling av en mätdator och två strömriktare kan sedan ett kraftverk simuleras och inverkan studeras när olika villkor för sammanlagring av effekten från många bojar ställs.

1.4.4 Förankringssystem

Kapitlet lämnar en översiktlig beskrivning av olika föreslagna förankringssystem och dessas egenskaper. Vissa exempel på tillämpningar beskrivs. En översikt ges över olika komponenter i förankrningssystemet.

1.4.5 Material

Havet utgör från beständighetssynpunkt en besvärlig miljö och valet av material har därför en avgörande betydelse. Vågornas karaktär orsakar även problem med nötning och utmattning. I kapitlet görs en genomgång av olika material. I avsnittet om stål beskrivs korrosionsmekanismen ingående liksom olika sätt att skydda sig mot korrosion. Betong diskuteras map armeringskorrosion, kemisk nedbrytning och frostskador. Vidare berörs plast och gummi.

1.4.6 Realisering av vågkraftverk

I detta kapitel diskuteras hur det skulle gå till att tillverka och installera samt driva och underhålla ett kraftverk. I litteraturen redovisade studier refereras.

1.4.7 Kostnader

Avsnittet tar först upp olika principer för kostnadsberäkningar dels den vanliga annuitetsmetoden och dels metoden med diskonterat kapitalflöde. Olika principer för bestämning av underhållskostnader berörs liksom inverkan av tillverkning i långa serier.

Därefter följer en översikt över hittills publicerade kostnadskalkyler för vågkraftgenererad elenergi. 62 sådana uppgifter redovisas. Variationen av energikostnaderna är mycket kraftig vilket i första hand beror på att kalkylerna ofta haft helt olika syften.

Slutligen visas exempel på kostnadskalkyler enligt de två ovan nämnda metoderna.

1.5 Teoriutveckling

1.5.1 Grundläggande teoriutveckling

I detta kapitel rapporteras forskningsarbete avseende utveckling av en matematisk-hydrodynamisk teori för beräkning av på en flytande kropp verkande reaktionskrafter och deras moment, excitationskrafter och deras moment, samt kroppens effektupptagning och absorptionslängd.

Problemet betraktas som ett hydrodynamiskt potentialproblem. Därmed måste det existera en hastighetspotential vars gradient ger vätskerörelsen och därför också trycket i varje punkt i vätskan.

Det första steget mot en lösning av det skisserade problemet är att identifiera de randvillkor på kroppen, på den fria havsytan, på havsbotten och strålningsvillkoren oändligt långt från kroppen, som hastighetspotentialen måste tillfredsställa när problemet är linjäriserat.

Det andra steget är att bygga upp en hastighetspotential som tillfredställer alla dessa linjära randvillkor. För detta utvecklas hastighetspotentialen för en pulserande källa under havsytan. Denna integreras därefter över kroppens yta. Genom att addera hastighetspotentialen för den infallande vågen blir den resulterande

hastighetspotentialen för vätskerörelsen fastställd.

Det tredje steget är att använda den resulterande hastighetspotentialen för att utveckla generella formler för de olika hydrodynamiska krafter som påverkar kroppen.

Det fjärde steget är att utveckla en generell formel för kroppens effektupptagning och att optimera denna under globala bivillkor eller dämpningsvillkor.

Det femte steget är att diskutera kroppens absorptionslängd och påvisa att de tidigare generellt accepterade resultaten måste modifieras när hänsyn tagits till dämpningsvillkoren.

1.5.2 Tillämpad teori

Inledningsvis ges en översikt över allmänna vågsamband och vågspektrum. Sedan redovisas den linjära teorin för NE-bojen med bl a beräkning av verkningsgrad. Därefter beskrivs teorin för oregelbunden sjö som diskuteras utifrån den linjära teorin för NE-bojen.

1.5.3 Teoretisk analys av petropumpslang

En utförd teoretisk analys av petropumpslangen berörs i korthet.

1.5.4 Optimering av boj

En teoretisk optimering av bojar har gjorts utifrån den enkla matematiska modellen för NE-bojen. Beräknade vågförhållanden vid Hoburg har använts. Vid optimeringen har bojens diameter, massa och dämpning varierats så att bästa medelverkningsgrad erhållits. Samtidig ändring av massa och dämpning har inte gjorts.

Optimeringen resulterar i en boj på ca 190 ton med en diameter på 9.7 m och en konstant dämpning på 300 kNs/m. Bojen skulle därvid få en total medelverkningsgrad på 20% och leverera 142 MWh/år.

1.5.5 Energiproduktionsberäkning

Här redovisas en nyutvecklad metod att på statistiska grunder beräkna energiproduktionen från en NE-boj. Metoden tillåter att effektbegränsningar beaktas liksom återkopplingen på bojrörelsen av dessa begränsningar.

Metoden medför i ett konkret fall att energin från en viss boj beräkningsmässigt ökar från 18 till 23 MWh när hänsyn tas till återkopplingen av effektbegränsning.

1.5.6 Frekvensanalys inom vågteorin

Med frekvensanalys kan ett kraftfullt hjälpmedel erhållas för att beskriva energiupptagningen i en vågkraftboj, med hjälp av Fast Fourier Transform (FFT) tar analysen rimlig tid.

Överföringsfunktioner och effektspektrum kan uppskattas för de undersökta vågenergiomvandlarna. Emellertid bör det betonas att det är skattningar av spektrum och överföringsfunktionerna som erhalles. Beroende på hur dataserien som uppmättes ser ut, om den använda mättiden är tillräcklig, erhålles mer eller mindre bra skattningar. Vid analysen av effektspektrum bör variansen reduceras eftersom den är alltför stor hos ett råspektrum. Härvid kan emellertid medelvärdesfel uppkomma. Vid bestämningar av överföringsfunktioner är det viktigt att de ingående spektra varians-reduceras innan kvotbildningen sker.

Ett flertal FFT-algoritmer förekommer, innan de användes bör noga undersökas hur de är definierade, då ett flertal definitioner av Fouriertransformen förekommer. Likaså bör de provas mot en känd korrekt FFT-algoritm eller kontrolleras genom av variansen för tidsserien jämföres med ytan under effektspektrum ("medeleffekten"). Dessa bör vara lika om FFT-algoritmen är korrekt.

1.6 Modellförsök

1.6.1 Laboratorieförsök

Rapporten redovisar experiment med modellbojar i vågränna och vågbassäng. Försöken har utförts i regelbundna och oregelbundna vågor med eller utan energiupptagning. Olika bojar har undersökts map form, diameter och massa. Vid energiupptagning har den simulerade generatordämpningen varierats. Resultaten har använts för dimensionering av bojar i större skala och för verifiering av uppställda matematiska teorier. Speciellt har hydrodynamisk massa och dämpning för bojar undersökts. Verkningsgraden hos energiupptagande bojar har studerats. Maximalvärden på över 50% och medelvärden på ca 35% uppnåddes i regelbundna respektive oregelbundna vågor.

1.6.2 Försök i Lygnern med kopplade bojen 1979

På grundval av tidigare erfarenheter från olika förankringsarrangemang byggdes en ny boj med ett kopplat system (via en generator) bestående av dels en boj och dels en friflytande stång med en dämpskiva nere i vattnet.

Mätningar utfördes i naturliga vågor på sjön Lygnern. Vågor och bojeffekt mm mättes samtidigt. Resultaten signalbehandlades och lagrades mha en mätdator och bearbetades senare. Rapporten redovisar 40 försöksserier. Den mekaniska verkningsgraden bestämdes på laboratorium varefter den hydrodynamiska verkningsgraden kunde bestämmas ur den totala. Den hydrodynamiska medelverkningsgraden bestämdes genom tidsserieanalys. Som mest erhölls nära 100%.

Försöksserien gav värdefulla erfarenheter av mätgivarsystem, digital signalbehandling samt försöksmetodik.

1.6.3 Försök i Lygnern med kopplade bojen 1981

1981 gjordes mätningar med den kopplade bojen sedan den modifierats något. 35 användbara mätserier har registrerats. Mätningar med olika generatordämpning har utförts i ett antal vågsituationer.

Resultaten har bearbetats både med tidsserieanalys och frekvensanalys. Den senare har medfört en utvidgning av frekvensanalysen för oregelbundna vågor.

Bojens hydrodynamiska medelverkningsgrad ligger i området 15-20% i naturliga vågor. Bojen har visat sig vara något för liten för Lygnerns vågor.

1.6.4 Försök i Lygnern med petropumpskraftverk

Under 1978 byggdes ett kraftverk med en petropump som lades ut i Lygnern. Några mätningar utfördes ej men olika förankringsarrangemang testades. Kraftverket visade sig mycket tillförlitligt även i hårt väder.

Kraftverket byggdes om och mätningar kunde genomföras under 1980. Sammanlagt 13 mätserier redovisas. Maximala medelverkningsgraden uppgick till 16% vilket är bra mht att systemet på intet sätt var optimerat.

Försöken kommer att fortsätta på uppdrag av Svenska Varv AB.

1.6.5 Försök med IPS-bojen vid Trubaduren

1980 sjösattes ett vågkraftverk i form av en större bojmodell i havet utanför Göteborg. Bojen är sammansatt av dels själva bojskrovet och ett därunder hängande långt rör. Vattnet i röret driver en kolv som rör sig relativt bojen och genom dämpning av denna relativa rörelse tas energi ut. Försöken föregicks av modellprov i Lygnern varvid preliminära dimensioner bestämdes vilka sedan skalades upp.

Försöken innebar framför allt en erfarenhetsmässig framgång eftersom alla viktiga moment fanns med såsom

- projketering och konstruktion
- upphandling och byggande
- mekaniska och elektriska installationer
- utformning av mätutrustning och upprättande av mätstation
- utmärkning och utläggning av förankringar

- sjösättning och intrimning av kraftverk
- reparation till sjöss
- mätning och signalöverföring med upp till 6 kanaler
- upptagning av boj
- utvärdering och rapportering

Eftersom försöken kom att äga rum under hösten utsattes kraftverket flera gånger för kraftiga stormar med våghöjder på över 6 m. Detta medförde att kraftverket skadades och under 1980 mättes därför endast förankringskraften. Sedan kraftverket reparerats och modifierats kunde under 1981 ett antal mätserier erhållas avseende energiproduktion, bojrörelser mm.

Förankringskraftmätningarna visade att det valda trepunktssystemet med blåsa och wire-kätting gav mycket små förankringskrafter. Som mest reigstrerades 16 kN i en lina. Totalt registrerades 19 mätserier. Mätserierna har analyserats med tidsserieanalys och frekvensanalys. Kraftspektrum och överföringsfunktioner har framtagits.

Vid mätningarna 1981 registrerades följande signaler: våghöjd, bojacceleration, stångkraft, generatorns varvtal, ström och spänning. Generatorns dämpning varierades automatiskt i fyra steg.

Totalt har 23 mer eller mindre fullständiga mätserier registrerats.

Kraftverkets hydrodynamiska medelverkningsgrad har uppgått till nära 50% och den totala medelverkningsgraden till nära 30%. Vid en optimering av kraftverket bör man kunna få ut mycket mer energi.

I kapitlet anges slutligen hur mycket energi IPS-kraftverk i olika skalor skulle producera för förhållandena vid Ölands södra grund.

2 INLEDNING

2.1 Allmänt

Sedan vågenergiforskningen i världen kom i gång på allvar i mitten av 1970-talet har kunskaperna inom området ökat enormt. Tron på vågenergins möjligheter har präglats av omväxlande optimism och pessimism. I dagsläget synes många av de tekniska problemen vara lösta. Det återstår att göra försök med prototyper i fullskala. Det stora problemet är nu att få godtagbar ekonomi vid utnyttjandet av vågenergi. Visserligen anges relativt höga kostnader i dag, men det finns stora möjligheter att sänka dessa genom bättre konstruktioner.

De största satsningarna görs i Storbritannien (hittills 120 Mkr), Norge (60 Mkr) och Japan (60 Mkr). I mindre omfattning forskas i flera länder bl a USA och Sverige. Jämte de officiella statliga forskningsprogrammen växer intresset från industrin.

Trots begränsad tillgång på vågenergi i svenska vatten finns det all anledning för oss att delta i utvecklingen av följande skäl:

- vågenergi har bättre möjligheter att utnyttjas ekonomiskt här än t ex vid Atlantens kuster. Detta beror framför allt på mindre svåra stormförhållanden.

- energipotentialen är av tillräcklig storlek för att vara intressant, särskilt för lokala behov såsom exempelvis för Gotland.

- provningsförhållandena är gynnsamma i svenska farvatten (risken för att en hel försöksprototypanläggning spolas bort vid en storm är mindre än t ex i Nordsjön). Därigenom har svensk industri möjlighet till en snabb utveckling och kan vinna försteg vid provning av anläggningar. Detta har stor betydelse vid en satsning på export av produkter och know-how.

- vågenergi utgör ett tillämpat forskningsområde vilket motiverar en förhållandevis stor satsning för upprätthållande av kunskapsnivån.

- många utvecklingsländer har potentiella möjligheter att utnyttja vågenergi. Ofta är kostnaderna för den importerade energin mycket hög. Dessa länder saknar emellertid möjligheter att själva utveckla den komplicerade teknik som ett utnyttjande av vågenergi medför. Enkla vågkraftverk skulle därför kunna utgöra en lämplig form av u-landsstöd.

Inom den närmaste femårsperioden kommer fullskaleanläggningar att byggas och utprovas. Det är troligt att detta arbete kommer att ske i internationell samverkan. Det är mycket önskvärt att Sverige då deltar.

2.2 Rapporten

I denna rapport presenteras resultaten av de senaste insatserna inom vågenergiforskningen i Sverige. Bland dessa insatser märks bl.a.

- inhämtande av kunskap från forskning i utlandet
- etablering av kontakter med utländska forskare
- grundläggande och tillämpad teoriutveckling
- utveckling av mät- och analysmetoder
- kartläggning av vågförhållanden och lokaliseringsförutsättningar omkring den svenska kusten
- studium av kostnadskalkyler och teknik för omvandling
- undersökningar av generatorer och elektriska system
- modellförsök med bojar i laboratorium
- försök med skalmodeller i Lygnern
- försök med en modell i stor skala

Rapporten består av ett antal kapitel som är relativt oberoende av varandra. De olika avsnitten skiljer sig ifråga om språklig stil, teknisk nivå och omfång eftersom många olika författare medverkat.

I rapporten presenteras för första gången resultaten från de fältmätningar som hittills utförts. Vidare redovisas den omfattande och grundläggande hydrodynamiska teorin. Dessutom görs en genomgång av olika möjliga typer av elgeneratorer.

Överskådliga sammanfattningar återfinns avseende internationella kontakter, uppskattningar av vågenergin runt svenska kusten och hittills tillkännagivna uppgifter om kostnader för vågenergi producerad elenergi.

2.3 Rapportförteckningar

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 77615. Lennart Claeson.

RR: 7 Rapport från möte med IEA Wave Power Expert Group. Oxford 780902. Anders Rylander, Gösta Wahl.

RR: 8 Rapport från besök i Skottland, Edinburgh 771205, Lennart Claeson m fl.

RR: 9 Rapport från besök i Storbritannien. 780129 - 780205. 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 Zweygbergk.

RR: 12 Rapport från deltagande i ett symposium on "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.

RR: 16 Besök vid Marintekniskt Senter vid NTH. Trondheim. 79613 - 79615. Lars Bergdahl.

RR: 17 Kätting, stål och fiberlinor, kurs i Fagernes, Norge. 790425 - 790427. Thomas Rindby.

RR: 18 Reserapport från Vågenergikonferensen i Edinburgh 26-28 juni 1979. Åke Kinnander m fl.

RR: 19 Rapport från deltagande i konferensen BOSS 1979 i London. 14 dec 1979. Lars Bergdahl.

RR: 20 Rapport med fotobilaga från besök hos Even Mehlum, Oslo. 1979-09-27. Lars-Ove Sörman m fl.

RR: 21 Rapport från möte på SMHI. 1979-09-31. Anders Rylander.

RR: 22 Rapport från deltagande i konferensen Sea Climatology i Paris 1979. Januari 1980. Anders Rylander.

RR: 23 Rapport beträffande besök vid två laboratorier för studium av vågenergi i USA i januari 1980. Svante von Zweygbergk.

RR: 24 Resa till Stockholm 18-22 okt 1979. Föredrag SMR-IVA, besök hos VBB och Vattenbyggnad KTH, 1979-12-14, Lars Bergdahl.

RR: 25 Rapport från resa till Storbritannien 1980-03-26 - 1980-04-03. Göran Olsson. 8 okt 1980.

RR: 26 Rapport från besök i Trondheim den 1-3 dec 1981 i samband med seminarium om vågmätningar. Lennart Claeson jan 1981.

RR: 27 Rapport från besök i Visby 80 05 06. Lennart Claeson 30 maj 1980.

RR: 28 Rapport om deltagande i seminariet BETON TILL ENERGIANLÆG i Köpenhamn 810325.
Anders Byström April 1981.

RR: 29 Rapport från IEA-möte i Paris den 29 september 1981, oktober 1981, Lennart Claeson.

RR: 30 Rapport från deltagande i symposiet Wave and wind directionality with applications to the design of structures. Paris 810930 - 811001. Oktober 1981, Anders Byström.

** RR: 31 Rapport från deltagande i ett symposium on "Wave and Tidal Energy" i Cambridge, Storbritannien, 23-25 september 1978.
Anders Byström, Lennart Claeson och Pontus Clason.

* RR: 32 Rapport från deltagande i hydraulikdagar i Linköping den 27 och 28 oktober 1981.

** RR: 33 Rapport från besök i Trondheim den 23-25 november 1981 i samband med seminarium om material och korrosion.

Förteckning av grupprapporter (GR) från Gruppen för Vågenergi-forskning

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. Lars Bergdahl 79-08-28.

GR: 6 Energi ur havsströmmar. 1977. Björn Ringesten. Inst. för Vattenbyggnad CTH. Report Series B:4.

GR: 7 Posssibility of large electirc output by floating type Sea Wave Electric Generator av Yoshio 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, Youshio 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 och 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: 15 Havets vågor - en energikälla för framtiden. Rev 1980-01-22. Lennart Claeson.

GR: 16 Vågenergi i Sverige. 79-05-14. 2:a upplagan februari 1980.

** GR: 17 Modellförsök med energiupptagande bojar i sjön Lygnern (1978-79).

** GR: 18 Program för beräkning av vågor ur vinddata.

GR: 19 Vågkraftverk i svenska farvatten. Tillgängliga vattenområden - Inledande studie. 5 aug 1980. Lennart Claeson.

GR: 20 Hydrodynamic theory of ocean surface waves and energy conversion. Johannes K Lunde. 1 februari 1980.

** GR: 21 Likströmsmodell för linjär generator.

GR: 22 Dimensionering av linjär synkrongenerator. Jan Forsberg, Per Bergström, Åke Kinnander, 800721.

GR: 23 Linear Analysis of a Wave Energy Converter Consisting of two Coupled Heaving Bodies. Lennart Claeson. March 1980.

GR: 24 Vågkraftbojar - modellförsök med energiupptagning i regelbundna vågor i bred bassäng. Lars Bergdahl, Göran Olsson, Lars-Ove Sörman, Mars 1980.

GR: 25 Vectors, Second Order Cartesian Theorems and Integral Theorems. Johannes K Lunde.

GR: 26 Inledande försök med petropump. Karl-Gustav Wahlstrand. Dec 80.

** GR: 27 Pendlande synkrongenerator.

GR: 28 The Swedish Wave Energy Programme. Paper from First Symposium on Wave Energy Utilization, Gothenburg 1979. Bergdahl, Claeson, Falkemo, Forsberg, Rylander. December 1981.

GR: 29 Vågenergi för Gotland - ett förslag till energiförsörjning med vågkraftverk. Februari 1980, Anders Byström.

GR: 30 Vågenergi för Gotland, Mars 1980, Anders Byström.

* GR: 31 Energiproduktionen från en vågkraftboj.

GR: 32 Vågkraftbojar - modellförsök med energiupptagning i oregelbundna vågor i bred bassäng. Lars Bergdahl, Göran Olsson, Lars-Ove Sörman. 30 mars 1981.

GR: 33 Förankringsseminarium i Göteborg 12-14 maj 1980. Föredrag sammanställda av Lennart Claeson. Oktober 1980.

GR: 34 Inledande försök med Interprojektbojen, dec 1980.

* GR: 35 Fortsatta försök med petropump. Karl-Gustav Wahlstrand. Dec 81.

GR: 36 Seminarium om vågdata för vågenergi. Trondheim 1-3 december 1980. Föredrag sammanställda av Knut Torsethaugen och Lennart Claeson. Trondheim/Göteborg, oktober 1981.

** GR: 37 Modellförsök med energiupptagande boj i Lygnern (1980-81).

** GR: 38 Förankringskraftmätningar på Interprojectbojen.

GR: 39 Undersökning av nya typer av rotorlindningsfria generatorer för användning i vågenergiomvandlare. Svante von Zweygbergk. Göteborg november 1981.

* GR: 40 Samlokalisering av vågkraftverk och havsbaserade vindkraftverk vid Gotland. Lennart Claeson, Pontus Clason, Hans Ganander, Nils Mårtensson.

* GR: 41 Seminarium om Elektriska system för vågenergiomvandlare. Göteborg 11-13 maj 1981. Föredrag sammanställda av Lennart Claeson. Dec 1981.

** GR: 42 Seminarium om Materialteknikk, korrosjon og aldring i bølgekraftverk. Trondheim 23-25 nov 1981. Föredrag sammanställda av Lennart Claeson.

** GR: 43 Fortsatta försök med Interprojectbojen.

NE-rapporter

NE 1977:4 Vågenergi i Sverige

NE 1981:16 Akvatisk energi, resultat, utvecklingsläge och förutsättningar

NE 1981:23 Utvärdering av vågenergi. Förslag till fortsatta insatser.

Proceedings från vågenergisymposiet i Göteborg 1979

First Symposium on Wave Energy Utilization, CTH, Gothenburg 30 Oct-1 Nov 1979.

** Rapporter som ännu ej är färdigställda
* Rapporter som är praktiskt taget klara

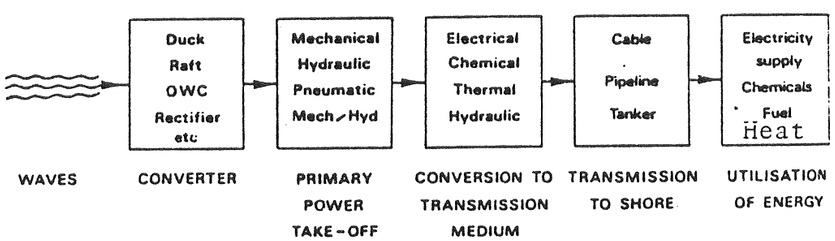
5 TEKNIKÖVERSIKT OCH TILLÄMPNINGAR

5.1 Vågkraftverk

5.1.1 Allmänt om vågkraftverk

Med vågkraftverk förstås sådana anordningar som är avsedda att uppta energin i havets vågor och omvandla den till användbar form.

Energiflödet genom ett vågkraftverk kan ske enligt figur 5.1.1.



Figur 5.1.1 Energiflöde genom vågkraftverk.

Ett kraftverk skall vara utformat för att ge energi till så låg kostnad som möjligt samtidigt som effektens kvalitet måste vara acceptabel. Vidare skall ett kraftverk kunna överleva stormar utan att dess funktion nedsätts i allt för hög grad. Material och utformning måste väljas med tanke på den svåra korrosiva miljön, isproblem och biologisk påväxt.

Eftersom vågenergin har en relativt låg energitäthet kommer vågkraftverk att utgöra omfattande konstruktioner. Antalet omvandlare kan vara av storleksordningen 100-10000 och kraftverkens utsträckning km-mil.

Av dessa skäl krävs sannoligt speciella tillverkningsstationer och speciella fartyg för utläggning och underhåll.

5.1.2 Struktur hos vågkraftverk

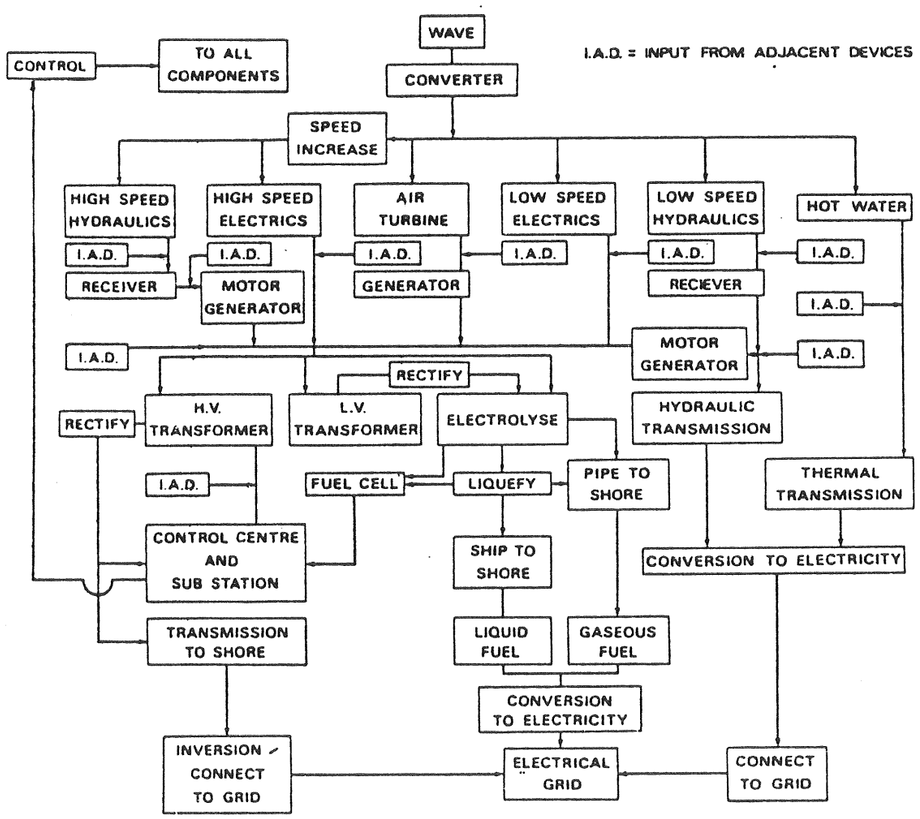
Om elektricitet för införsel på ett nät skall produceras måste den oregelbundna effekten från vågorna omformas till elektrisk ström med bestämd spänning och frekvens.

Denna utjämning kan åstadkommas på olika sätt. För stora omvandlare som i sig utgör ett helt kraftverk måste utjämningen ske direkt på omvandlaren t ex med ackumulatorer såsom gasklockor, svänghjul eller batterier.

Om kraftverket består av många mindre omvandlare kan en viss utjämning ske genom serie och parallellkoppling av omvandlarna.

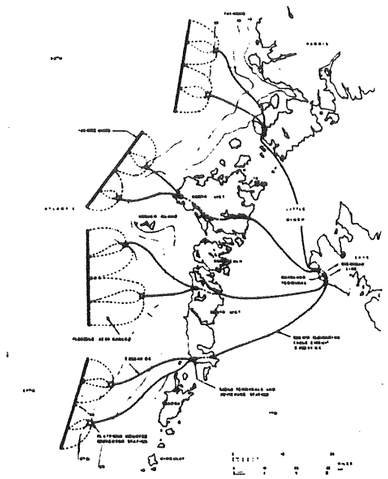
Vågkraftverk kan även tänkas producera värme eller vätgas.

En översikt över tänkbara strukturer framgår av figur 5.1.2.

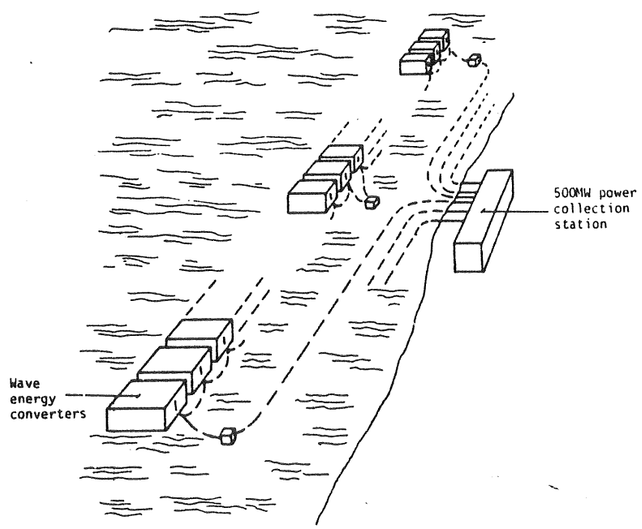


Figur 5.1.2 Översikt över omvandlingssystem.

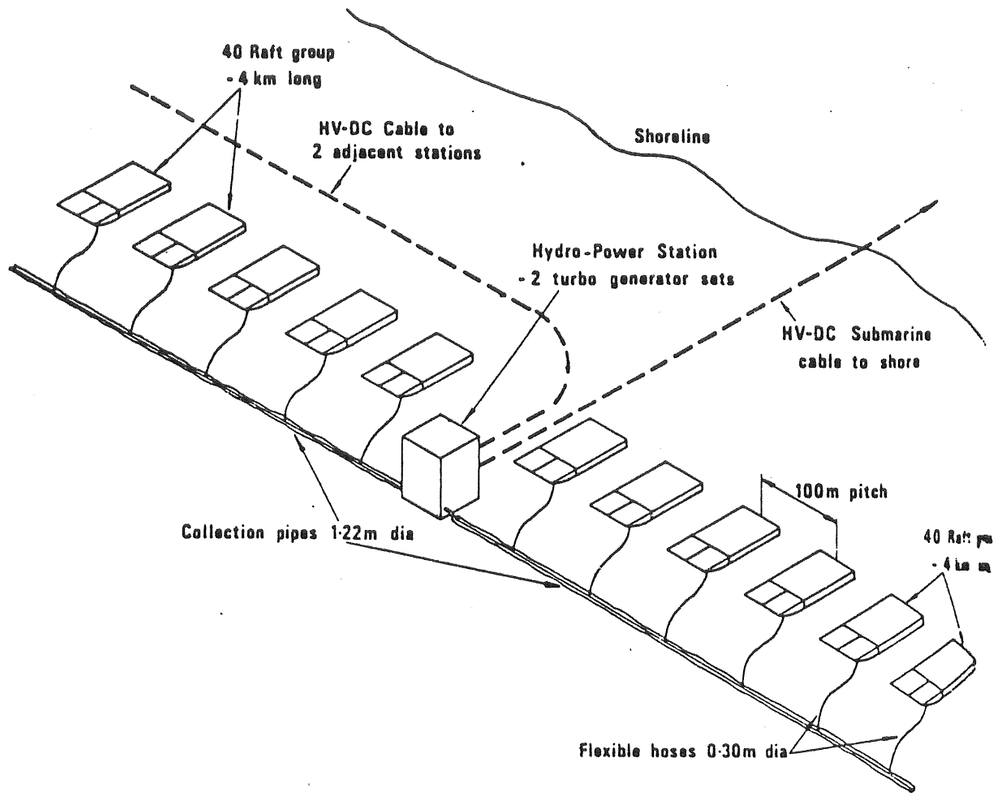
Den fysiska utformningen av vågkraftverk kan se ut på många olika sätt, vilket enklast illustreras av följande exempel.



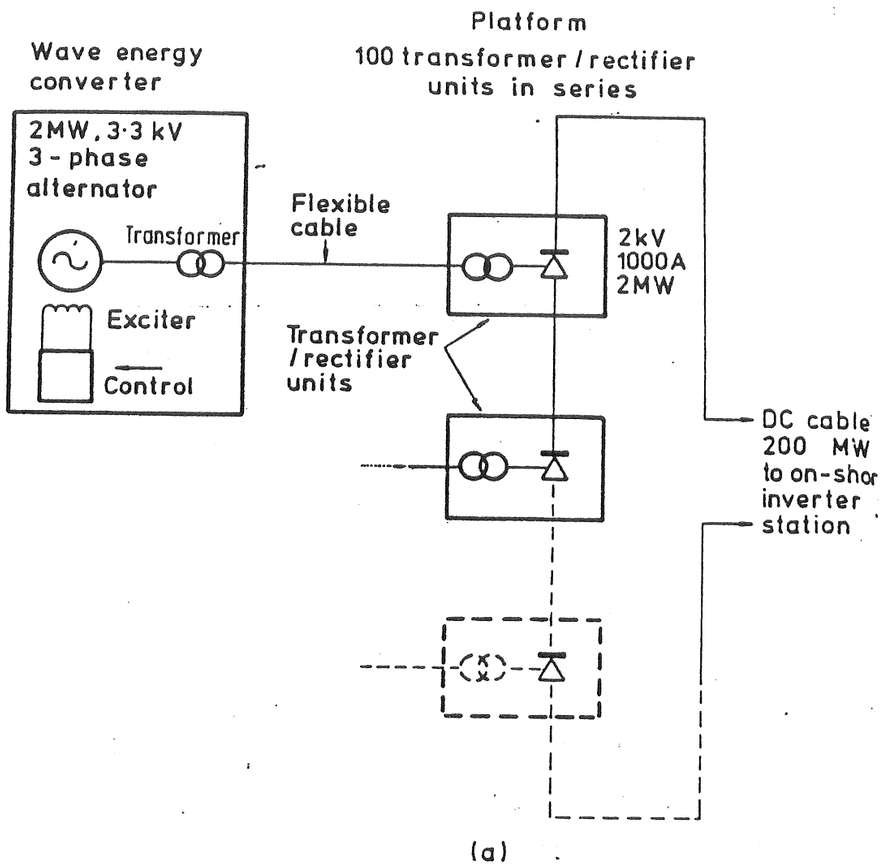
Figur 5.1.3 System av vågkraftverk anslutna till ett stamnät.

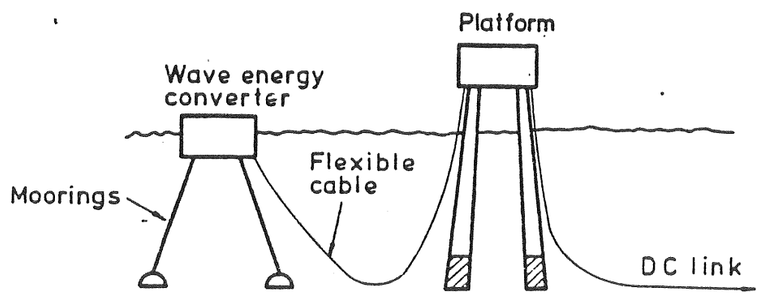


Figur 5.1.3 Princip för vågkraftverk med omvandlare på linje.



Figur 5.1.4 Vågkraftverk med hydrauliskt energisamlingssystem.





Figur 5.1.5 Struktur hos ett elektriskt system.

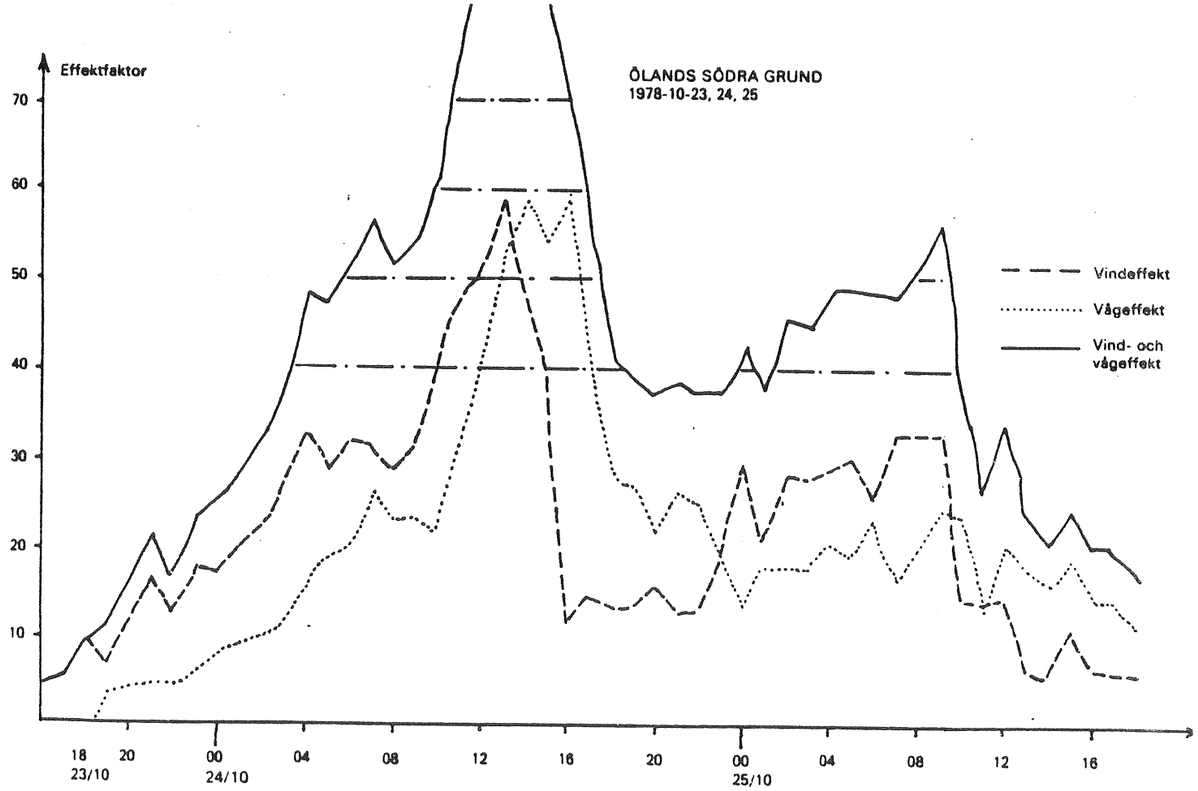
5.1.3 Samlokalisering av vågkraftverk och havsbaserade vindkraftverk vid Gotland

I rapporten GR:40 redovisas en studie enligt rubriken.

Bakgrund

Utnyttjande av vågenergi i svenska farvatten kräver en ansenlig havsareal för ett någorlunda stort kraftverk. Om samma område även utnyttjas för utvinning av vindenergi från havsbaserade aggregat skulle betydligt mer energi erhållas per ytenhet.

Vinden blåser i allmänhet upp snabbare än vad vågorna tillväxer och mojnar en stund innan vågorna lägger sig. Därigenom skulle ett kombinerat kraftverk ge möjlighet till ett bättre utnyttjande av landkabeln för en viss installerad effekt än vad varje kraftslag skulle ge var för sig. Som resultat erhålles även en utjämning av den producerade och till land förda elektriska effekten. Förhållandet illustreras i figur 5.1.6.



Figur 5.1.6 Exempel på sammanlagring av vind- och vågenergi en viss dag vid lika andel producerad maximal effekt.

Rapporten syftar till att belysa vilka fördelar man skulle kunna uppnå med en samlokalisering av vågkraftverk och havsförlagda vindkraftverk.

Eftersom området utanför Hoburg befunnits intressant både när det gäller havsbaserad vindkraft och vågkraft är det motiverat att välja detta område som lokalisering för ett kombinerat vind-vågkraftverk för vilket en begränsad studie görs.

Huruvida ett kombinerat kraftverk blir mer ekonomiskt än enbart havsförlagda vindkraftverk respektive vågkraftverk går inte att säga direkt. Här inverkar sådana faktorer som variationerna i energitillförseln från respektive energislag, variationerna i förbrukning, möjligheter till magasinering, energikostnad hos alla utnyttjade energislag, kabelkostnader m.m.

Systemlösningar

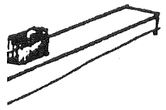
Ett kombinerat kraftverk tänkes bestå av ett antal vindkraftaggregat och ett antal vågkraftsaggregat. Märkeffekten hos ett vindkraftaggregat kan vara ca 100 ggr större än för ett vågkraftaggregat. Med vindkraftaggregat på 3 á 5 MW bör avstånden mellan aggregaten vara av storleksordningen 1 km. Varje vågkraftsaggregat skulle då inom samma område kunna ta i anspråk ca 1 ha.

Vågkraftverk kan ha mycket olika utformning. Lämpligheten för samlokalisering med havsbaserade vindkraftverk är också ganska olika. I en tabell kommenterar rapporten dessa möjligheter för de olika kraftverkstyperna.

Kombinationsmöjligheterna klassas därvid enligt följande:

A kombination mindre lämpligt
B vågkraftverk och vindkraftverk kombineras i en flytande enhet
C vågkraftverk och vindkraftverk kombineras i en bottenfast enhet
D vågkraftverk läggs runtomkring (det bottenfasta) vindkraftverket och utnyttjar dettas fundament för centrala funktioner (t ex generatorstation eller omriktarstation)
E vågkraftverken placeras så att de kan utnyttja vindkraftverkens fundament för förankring.

strationer till
t.



verk på

ss

er

s-

gs-
urvan.

d)

et

roduktion.

nd-
n-
t

on
a

re
le

5.2 Energiupptagning

5.2.1 Några hydrodynamiska principer

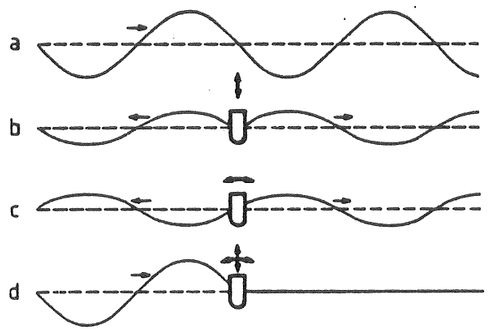
Energiupptagningsförmågan hos flertalet omvandlare är beroende av vågfrekvensen. Även andra vågkarakteristika har betydelse såsom vågornas höjd och branthet. Till de förstnämnda hör alla svängande system. Av central betydelse för energiupptagningen hos svängande kroppar är begreppen egenfrekvens och resonans.

Om en boj på en ostörd vattenyta trycks ned och sedan släpps, kommer den att guppa upp och ner en stund. Härvid svänger den med en konstant frekvens nämligen egenfrekvensen. Om man nu påtvingar bojen en oscillerande (svängande) kraft t ex genom att skicka vågor mot den och om kraften varierar med samma frekvens som bojens egenfrekvens så kommer bojen att ta upp energi från vågorna och lagra den som rörelseenergi vilket medför att amplituden hos svängningarna ökar - resonans uppträder.

Man kan visa att en kropp som svänger i resonans kan ta upp energi från större bredd än sin diameter om rörelsen dämpas optimalt. Om bojens egenfrekvens och frekvensen hos den påtvingade kraften ej överensstämmer kommer bojen att under en del av sin svängningscykel att avge energi till vågorna.

När en flytande kropp oscillerar (svänger) i vågor kommer den själv att radiera (sända ut) vågor som överlagras på det naturliga vågsystemet. Om kroppen svänger med rätt frekvens och amplitud i två moder t ex vertikal svängning och rotation kommer vågorna att utsläckas totalt bakom kroppen vilket innebär att all vågenergi absorberas. Figur 5.2.1 åskådliggör detta fenomen för det tvådimensionella fallet.

En boj i en rad av point-absorbers på i förhållande till våglängden bestämda avstånd från varandra kan genom interferensverkan erhålla en kraftig förstärkning av energiupptagningen. En sådan rad kan teoretiskt ta upp 50% av den infallande energin medan två rader kan ta upp 100%. Därvid verkar den bakre raden, vilken kan vara utan maskineri, som en dynamisk reflektor.

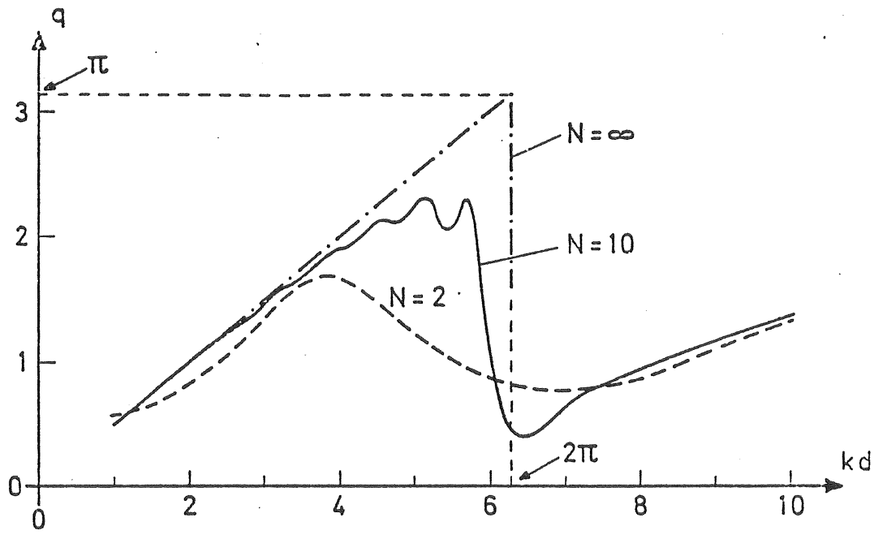


a infallande våg.
b symmetrisk våggenerering genom vertikal svängning.
c antisymmetrisk våggenerering genom roterande svängning.
d superposition av genererande vågor på den infallande vågen resulterar i fullständig upptagning av den infallande vågen (Budal & Falnes, 1978)

Figur 5.2.1 Total absorbtion av vågeffekten med en rad av bojar som oscillerar i en symmetrisk och en antisymetrisk mod.

Interferens mellan bojar

Förstärkningsfaktorn q som funktion av kd dvs vågtalet x bojdiametern, framgår av figur 5.2.2. N anger antalet bojar.



Figur 5.2.2 Förstärkningsfaktor vid interfererande bojar (Budal & Falnes, 1977).

Svängande system kan beskrivas av andra ordningens differentialekvationer vilket beskrivs ingående i kapitel 6.

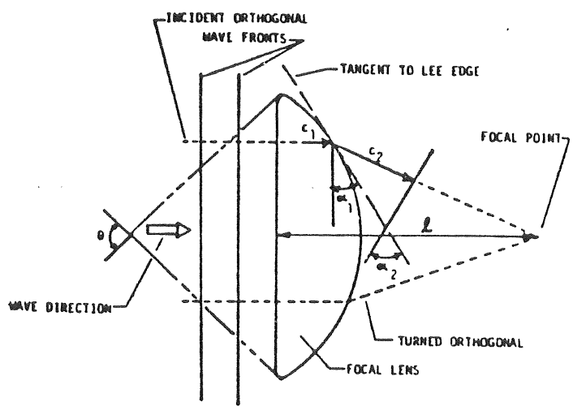
En speciell typ av omvandlare bygger på principen om lutande plan. Här är våghöjden avgörande och linjär teori som bygger på frekvensanalys och superposition är ej tillämplig. I stället måste teoretiska undersökningar göras mha verkliga eller realiserade vågtåg. Det är relativt komplicerat att beräkningsmässigt studera "upprush" och "overtopping" och de flesta metoderna är halvempiriska.

En likartad princip går ut på att låta vågen falla in i en konvergerande kanal varvid vågamplituden ökar vilket utnyttjas pss att vattnet får rinna över en kant, se vidare 5.2.2.

Even Mehlum på SI i Oslo har visat hur man med hjälp av konstgjorda grund kan fokusera vågor (i princip kan även naturliga grund utnyttjas) - se kap. 5.2.2. Följande förenklade "optiska" analys kan tjäna som illustration av fenomenet.

Fokusering

Fokusering enligt Mehlums idé är i princip en sk fresnelfokusering. Den åstadkommes genom att under vattenytan placera en styckevis linsformad struktur i vågorna varvid diffraktion eller refraktion uppstår. Enligt figur 5.2.3 kan en nedsänkt linsformad skiva bromsa infallande vågor när de passerar. När vågorna lämnar den krökta kanten riktas de mot en fokalpunkt. Denna kan bestämmas mha Snells lag.



Figur 5.2.3 Linsfokusering.

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{\sin(\alpha_1)}{\sin(\alpha_2)}$$

där c_1 är fashastigheten på grunt vatten över linsen dvs

$$c_1 = \sqrt{gh_1}$$

där h_1 är djupet till linsen
c_2 är fashastigheten på djupt vatten dvs

$$c_2 = gT/2\pi$$

ur ovanstående erhålles.

$$2\pi\sqrt{\frac{h_1}{gT_2}} = \frac{\sin(\alpha_1)}{\sin(\alpha_2)}$$

Om linsens kant är cirkulär med radien R erhålles fokalavstånd-det ur linsekvationen.

$$F = \left(\frac{1}{c_2/c_1 - 1}\right) \cdot R$$

Exempelvis ger en våg med T = 6 sek och h_1 = 5 m och R = 100 m att F = 296 m. Med en centrumvinkel på 90° kommer vågenergin från en kordalängd på

$$a = 2R \sin\frac{(\theta)}{2} = 141 \text{ m att fokuseras}$$

T = 6 m svarar ungefär mot H_s = 1.6 m. Approximativt erhålles

$$P = 0.5 \times 1.6^2 \times 6 = 7.7 \text{ kW/m}$$

vilket ger en total effekt på 7.7 x 141 = 1 MW

5.2.2 Omvandlare - översikt

Under de senaste åren har ett flertal seriösa förslag avseende omvandling av vågenergi presenterats. Efter hand har de flesta sållats bort främst av konstandsskäl. Det kan likväl ha sitt intresse att ge en översikt över de omvandlare som varit föremål för mer ingående studier.

Det har gjorts försök att klassificera omvandlarna i olika kategorier. Oftast finns dock typer som inte renodlat kan fås att passa in i ett sådant system. Bland andra har följande indelningsgrunder föreslagits av olika omvandlare

- aktiva
- semiaktiva
- passiva

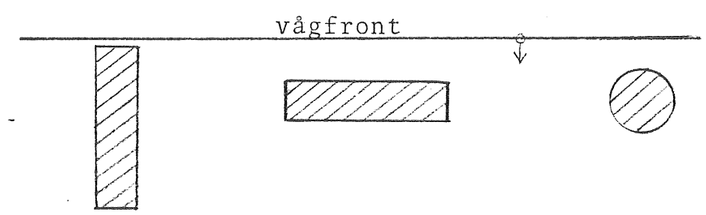
En aktiv omvandlare rör sig i vågorna och orsakar därvid själv vågor medan en passiv omvandlare utgörs av en fast konstruktion som i regel står på botten. Till kategorin aktiva omvandlare hör de flesta flytande konstruktioner såsom bojar och flottar.

Semiaktiva omvandlare kan vara tunga flytande konstruktioner.

En annan indelningsgrund är

- terminators
- attenuators
- point absorbers

varvid indelningen hänger samman med omvandlarens orientering och utsträckning, se figuren

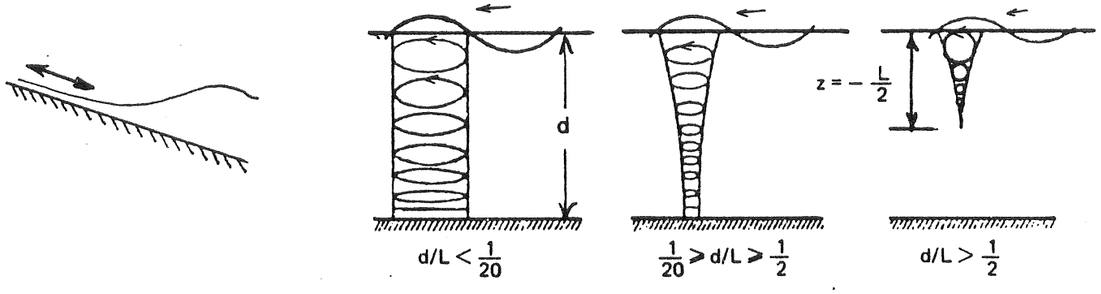


Figur 5.2.4 Terminator, attenuator och point absorber.

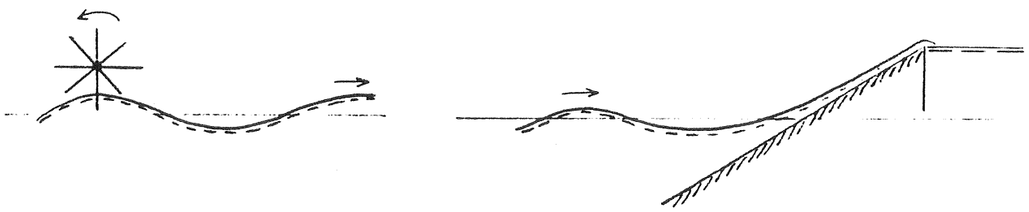
En annan indelning bygger på hur omvandlaren utnyttjar vågrörelsen. Tre olika principer kan urskiljas.

- Omvandlaren utnyttjar vågornas partikelrörelse. I princip rör sig vattenpartiklarna i slutna banor. På djupt vatten är dessa cirkulära, på grunt vatten elliptiska och på en strand fram och återgående. Se figur 5.2.5.

Tänkbara applikationer är vattenhjul och lutande plan med overtopping se figur 5.2.6.

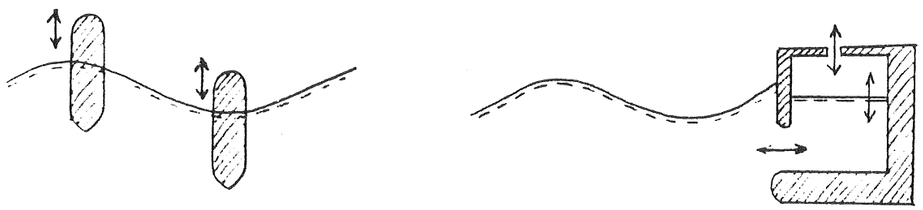


Figur 5.2.5 Partikelbanor hos vågor vid olika djup.



Figur 5.2.6 Vattenhjul och lutande plan.

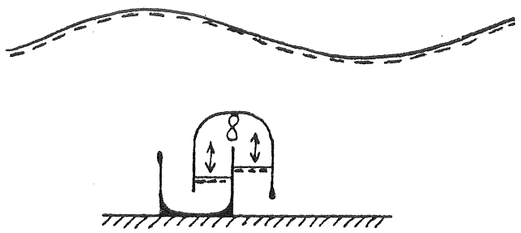
- Omvandlaren utnyttjar vattenytans rörelse t ex genom Archimedes princip eller principen kommunicerande kärl se figur 5.2.7.



Figur 5.2.7 Boj och svängande vattenpelare.

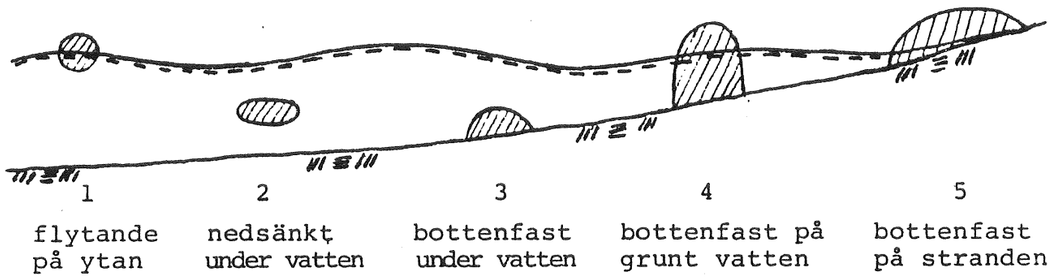
Ovanstående principer utnyttjas nästan alltid i kombination med följande.

- Omvandlaren utnyttjar den tryckvariation (hydrodynamiskt tryck) som uppstår pga vågorna. Detta tryck är störst i ytan och avtar exponentiellt mot djupet se figur 5.2.5. Tryckvariationerna kan på olika sätt utnyttjas i undervattenskammare se figur 5.2.8.



Figur 5.2.8 Tryckkammare med svängande vattenpelare.

Indelningen kan även göras efter omvandlarens läge i vattnet, figur 5.2.9.



Figur 5.2.9 Indelning av omvandlare efter läge i vattnet.

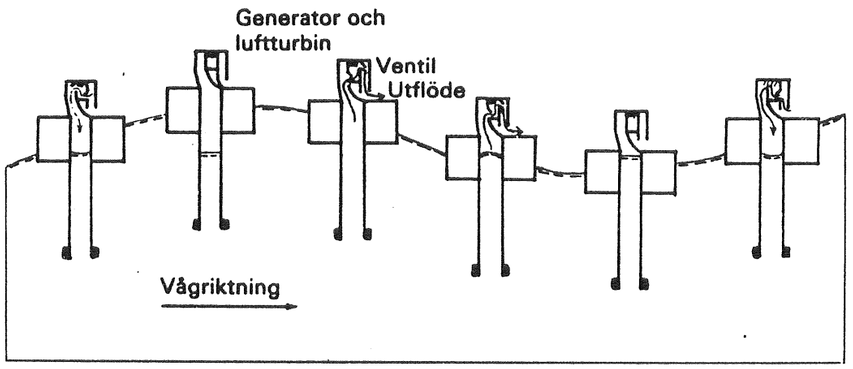
I den följande exposén över omvandlare görs indelningen efter det land där den framtagits. De mest intressanta förslagen beskrivs ingående medan övriga endast berörs kortfattat map utformning och funktion.

Den mångfald principlösningar som förekommer illustreras till sist med några gamla patent.

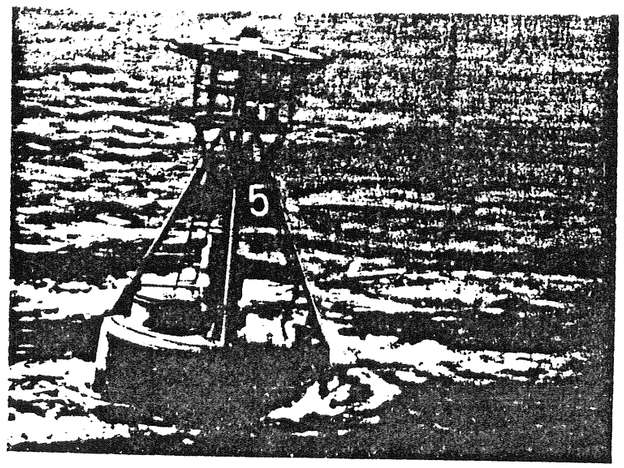
Japan

Masudas boj

I Japan utvecklade Yoshio Masuda redan 1963 en ljud- och ljusboj som arbetar med en luftturbin vilken drivs av en svängande vattenpelare. Idag finns flera hudra sådana bojar av typ Ryokuseisha.



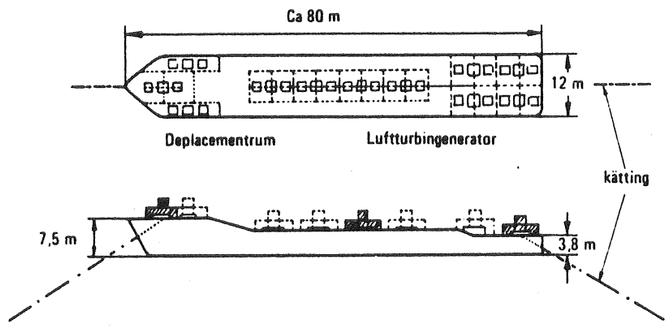
Figur 5.2.10 Arbetsprincip för ljud- och lysboj.



Figur 5.2.11 Ljud- och lysboj av typ Ryokuseisha.

Kaimei

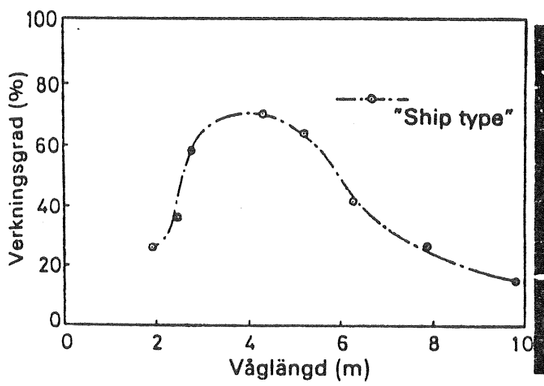
Den grundläggande idén för Masudas boj har genom Japan Marine Science and Technology Center (JAMSTEC) under 70-talet utvecklats till ett enkelt och robust kraftverkssystem. En prototyp som har formen av ett fartyg, Kaimei ("havets strålglans") byggdes 1976.



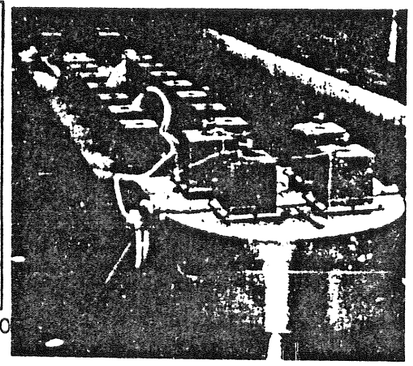
Figur 5.2.12 Skiss av Kaimei.

Prototypen studeras inom International Energy Agency, se avsnitt 3.1.3.

Utformningen av prototypen har föregåtts av flera års modellförsök där ett antal olika utformningar undersökts. Figur 5.2.13 visar resultatet från försök med en 7,5 m lång modell, figur 5.2.14



Figur 5.2.13 Verkningsgrad från modellförsök.



Figur 5.2.14 7.5 m modell i vågränna.

Fullskaleprototypen är 80 m lång, 12 m bred och väger ca 500 ton.

Skrovet är uppdelat i 4 deplacerande sektioner och 22 turbinsektioner utan botten. Ett ventilsystem, se avsnitt 5.2.3, som förbinder två sektioner till en turbin, likriktar luftströmmen så att turbinen får konstant rotationsriktning.

Kaimei kan utrustas med 11 generatorer. I den första försöksomgången använde man endast en i fören, en midskepps och en i aktern. Kaimei är så utformad att man kan pröva och jämföra olika turbin- och generatortyper. De valda turbinerna är 1,4 m i diameter med direktkopplade växelströmsgeneratorer. Vid 900 rpm levererar generatorn 125 kW.

Kaimei förankrades på ca 40 m djup, några km utanför kusten i Japanska Sjön, med fören mot den mest förhärskande vågriktningen. Förankringarna utgjordes av fem st 20-tons ankare med ett par hundra meter kätting.

Mätsignalerna från vågmätare och givare på turbiner, generatorer och förankringar sändes in till land med telemetriutrustning.

Under försöksperioden vintern 1978-79 var vädersituationen ovanligt lugn med mycket få oväder. Den genomsnittliga vågeffekten under december och januari var 30 kW/m mot normalt det dubbla. Den totala producerade energin blev därför mycket låg, trots att apparaturen fungerade utan driftsavbrott eller andra större problem i sex månader.

Vid de oväder som inträffade uppmättes signifikanta våghöjden, H_s, till 3-4 m med max våghöjd omkring 7 m. Vid dessa tillfällen uppmättes generatoreffekten till 100-250 kW per generator. Den genomsnittliga effekten var dock endast några tiotal kW. För att någon energi skall produceras överhuvudtaget måste våghöjden överstiga 1,3 m, vilket den gjorde under ca 1700 timmar, d.v.s. ca 40% av tiden. Den genererade elenergin leddes iland med sjökablar och anslöts till nätet.

Lufttrycket i turbinsektionerna i Kaimei var lägre än vid modellförsöken. Man tror att skillnaden beror på olika ventilsystem. Kaimei har endast två ventiler per turbin mot fyra i modellförsöken. Till andra årets försök utrustade man Kaimei med fyra-ventilerssystem. Man tror också att fyra ventiler bättre ska kunna utnyttja energin i långa vågor, t.ex. dyningar.

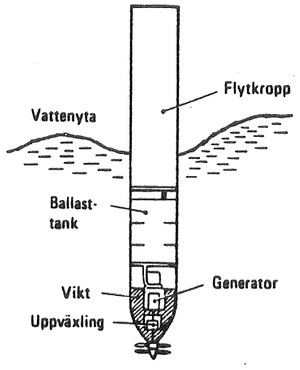
Man konstaterade även att den mittersta turbinen hade ca 40% lägre effekt än de i ändskeppen p.g.a. pitch-rörelsen.

Förankringarna visade sig vara mycket överdimensionerade. Den största uppmätta belastningen i en kätting var 50 ton, vilket var betydligt mindre än man dimensionerat för. Slutsatsen är att de dimensioneringskriterier som gäller för vanliga fartyg räcker gott och väl för vågkraftverk av Kaimeis typ.

Friendship

I mitten av 70-talet arbetade Ocean Energy Development Co (med stöd från Mitsui Engineering & Shipbuilding Co and Power Engineering Laboratory Corporation) med att utveckla bojar för generering av elström. Bojarna, som har formen av en lång, smal cylinder, flyter vertikalt. I bojens nedre ända är två motroterande turbiner fästade. Med lämpliga dimensioner kommer bojen att svänga i resonans med de infallande vågorna. Bojens rörelseamplitud blir flera gånger större än vågornas amplitud. P g a hastighetsskillnaden mellan bojen och det omgivande vattnet, uppstår en relativ vattenström som driver turbinerna. Dessa har vridbara blad (Kaplan-turbiner), varigenom rotationsriktningen kan bibehållas oberoende av bojens rörelseriktning.

Turbinerna är via en planetväxel och ett svänghjul kopplade till en generator. Med hjälp av ballasttankar, ventiler och en pump kan bojens massa varieras och därmed kan dess egenfrekvens anpassas till aktuell vågsituation så att resonans alltid erhålles.



Figur 5.2.15 Friendship.

Omfattande modellförsök har gjorts, dels i laboratorium och dels till havs. I laboratorieförsöken har man erhållit en amplitudförstärkning av bojrörelsen på upp till 20 ggr. Bojen har dock varit odämpad vid dessa försök dvs något energiuttag gjordes inte.

För sjöförsöken byggdes en 22 m lång modell. Diametern var 1,2 m och vikten 13,5 ton. Modellen var konstruerad att svänga 3,5-8 m vid våghöjder mellan 0,5-1,5 m. Egenfrekvensen justerades till mellan 7 och 8 sekunder. Några mätresultat från sjöförsöken har inte presenterats. Projektet lades ner efter några år främst pga svårigheter med förankring och ilandföring av energin från den kraftigt svängande bojen.

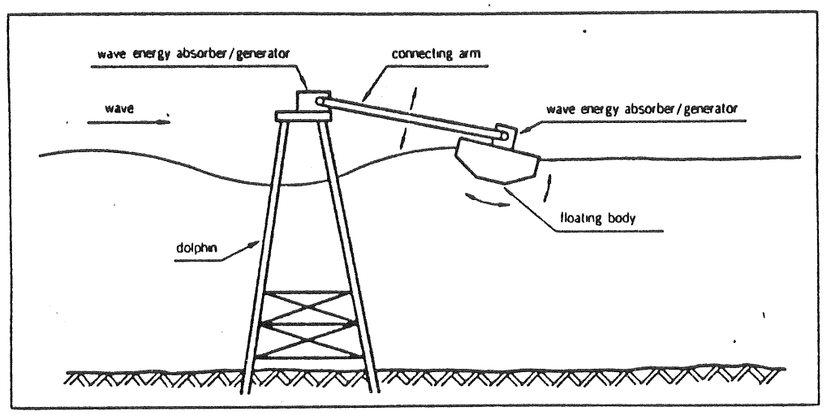
NKK:s vågomvandlare

Ett tämligen nytt vågkraftsystem har utvecklats av Nippon Kokai (NKK), där omvandlaren uppges kunna absorbera ända upp till 100% av den infallande vågenergin.

De viktigaste delarna i systemet är en flytkropp, en dykdalb (bottenfast pelare), en förbindelsearm och två generatorer. Flytkroppens rull- och hävrörelser, orsakade av vågorna,

genererar en rotationsrörelse mellan flytkroppen och armen och mellan armen och dykdalben. Rotationsrörelsen växlas upp och driver generatorerna.

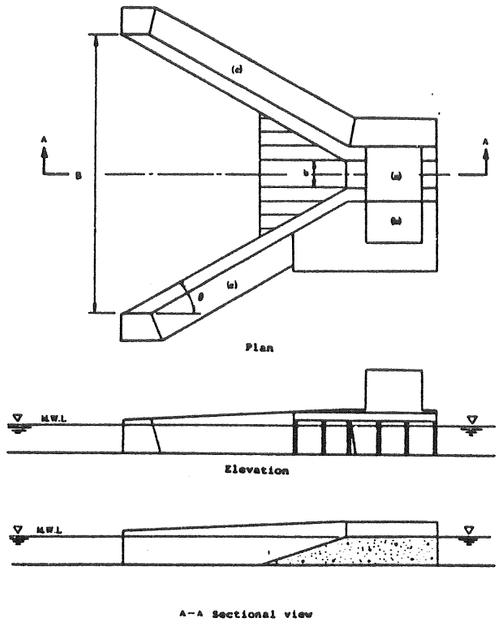
Modellförsök har gjorts med en flytkropp med dimensionerna 3 x 1 x 0,5 m. I vågor med ett effektinnehåll av 90 watt erhölls 70 watt ut från generatorerna. Samtidigt kunde konstateras att vågrörelsen absorberades fullständigt. Mellanskillnaden, 20 watt, angavs vara mekaniska förluster.



Figur 5.2.16 Bottenfast vågomvandlare.

Konvergerande kanal

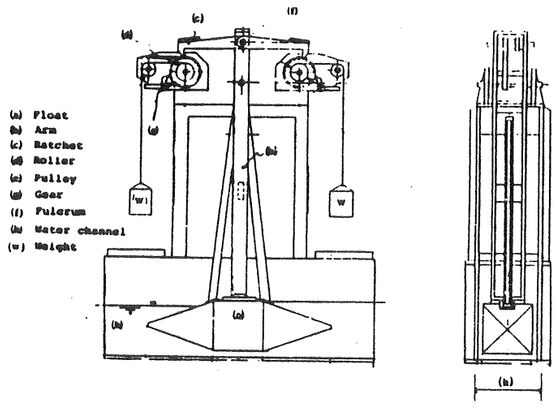
Vågorna tvingas in i en konvergerande kanal med i dess inre del sluttande botten varvid vågorna bryter så att ett enkelriktat vattenflöde erhålles. Idén har studerats vid Kansai Electric Power Co. Ltd dels med en turbin direkt i flödet dels p s s att flödet får strömma över ett överfall till en högre liggande reservoar varur energin sedan tas med en turbin för låg fallhöjd. Modellförsök har gett verkningsgrader på 15-20%. Principen för kanalen visas i figur 5.2.17.



Figur 5.2.17 Kraftverket med konvergerande kanal.

Pendlande undervattenskropp

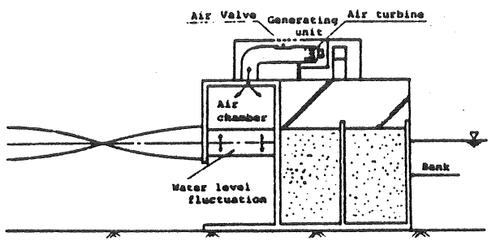
I en konvergerande kanal som ger enkelriktat (men pulserande) flöde kan en pendlande undervattenskropp placeras. Modellförsök har utförts av Uchida Institute of Technological Research and Development. En verkningsgrad på 30-40% har uppnåtts. Figur 5.2.18 visar experimentmodellen.



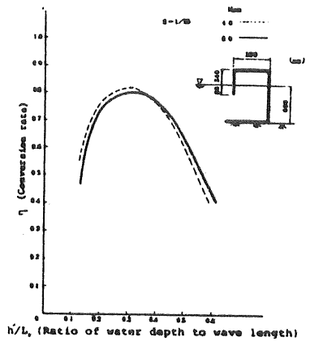
Figur 5.2.18 Kraftverk med pendel.

Bottenfast OWC

Även i Japan har intresse ägnats åt ett koncept med bottenfast OWC, se figur 5.2.19.



Figur 5.2.19 Vågkraftverk av typ bottenfast OWC.



Figur 5.2.20 Verkningskurva från modellförsök med bottenfast OWC.

I modellförsöken har en verkningsgrad på 80% uppmätts, se figur 5.2.20.

Storbritannien

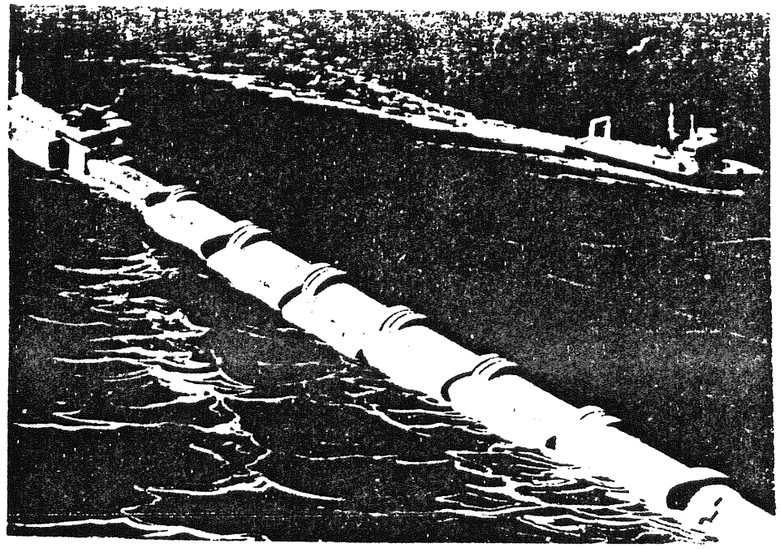
Salters ducks

Stephen Salter vid Edinburgh University är en av föregångarna inom vågenergiforskningen.

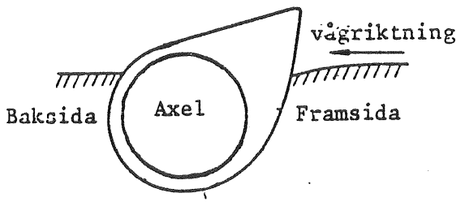
På sitt laboratorium utvecklade han en speciellt formad omvandlare som i en vågränna absorberade över 80% av vågenergin inom ett brett frekvensband. På grundval av dessa resultat lyckades Salter väcka de styrandes intresse och därmed initierades det brittiska vågenergiprogrammet.

Salters ducks (duck=anka) består av ett antal speciellt utformade kammar, vilka sitter på en lång gemensam axel, relativt vilken

de roterar fram och tillbaka pga vågorna, se figurerna. Axeln får en försumbar nettorotation eftersom kammarna utefter den ej svänger i fas med varandra. Kammarna har en kilformad framsida och en cylinderformad baksida. Härigenom sänds inga vågor ut bakåt eftersom inget vatten trängs undan på omvandlarens baksida vid rotationen.

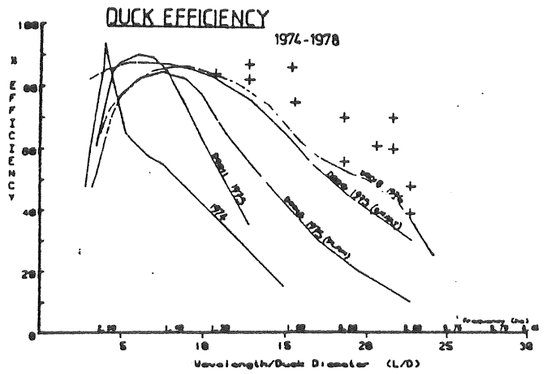


Figur 5.2.21 Kraftverk av Salters ducks (Grove-Palmer, 1979).



Figur 5.2.22 Tvärsnitt av en Salters duck.

Den relativa rörelsen mellan axel och kam kan utnyttjas för energi-upptagning. Omvandlaren har i laboratoriet gett 90% verkningsgrad



Figur 5.2.23 Exprimentella verkningsgradskurvor för Salters duck, (Salter, 1978).

En modell i skala 1:10 är under utprovning i Loch Ness, se figur 5.2.24.

Figur 5.2.23 Modell av Slaters duck i Loch Ness. Vågorna dämpas effektivt (Bellamy, 1978).

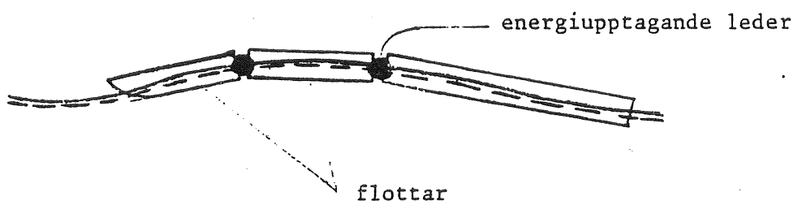
I en fullskaletillämpning visar det sig att hållfasthetsproblemen blir stora, speciellt för den genomgående axeln. Någon bra mekanisk eller hydraulisk anordning som kan ta tillvara energin och samtidigt utstå de svåra stormarna på Nordatlanten är ännu inte utvecklad. Några förslag visas i figurerna nedan. Systemet med gyroskop har fördelen att varje modul arbetar enskilt och ej har behov av den referens som den genomgående axeln utgör.

Det är tänkbart att ett enkelt och billigt system med kuggremmar skulle kunna arbeta i Östersjöförhållanden. I så fall skulle Salters duck som ju tar relativt litet utrymme i anspråk, kunna utgöra ett intressant alternativ för Sverige.

Cockerells contouring rafts

Ett annat förslag är Cockerells "contouring rafts" (raft = flotte).

Omvandlaren utgörs av en rad kopplade flottar som under inverkan av vågorna vinkeländras relativt varandra. Denna relativa rörelse utnyttjas för energiupptagning. Principen framgår av figuren



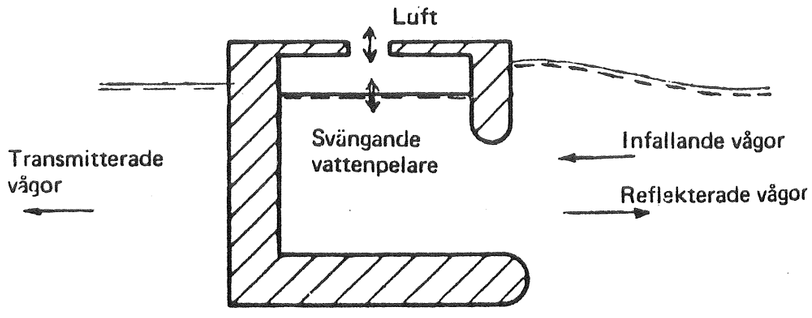
Figur 5.2.25 Cockerells contouring rafts.

Ingående studier har visat att de studerade varianterna ej kan bli ekonomiska, varför denna omvandlare numera är avförd ur vågkraftprogrammet.

NEL-OWC

National Engineering Laboratory (NEL) i East Kilbride utanför Glasgow utvecklar en typ av oscillating water column (OWC) dvs en omvandlare med svängande vattenpelare som utnyttjas för att åstadkomma en luftström genom en turbin som driver en generator.

Principen framgår av figuren

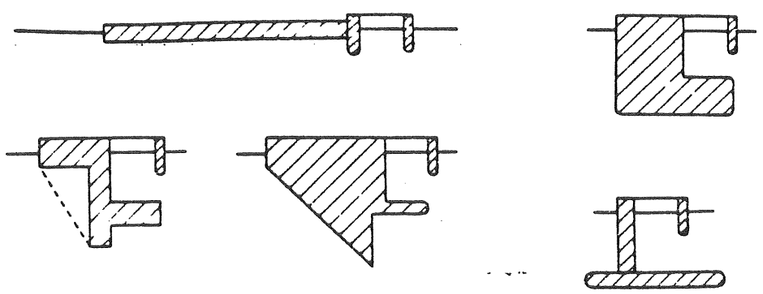


Figur 5.2.26 Princip för NEL-OWC.

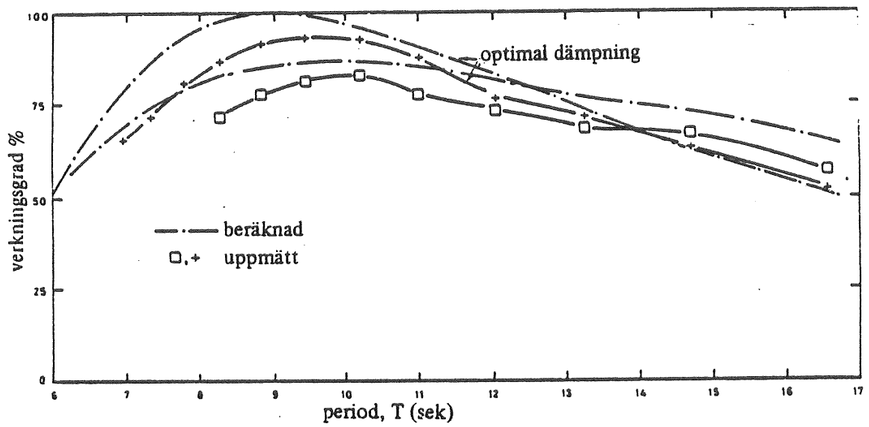
Huvudsakligen har antisymetriska omvandlare studerats, eftersom dessa kan uppnå höga verkningsgrader inom ett brett frekvensområde. Några av de undersökta formerna visas i figur 5.2.27.

Med hänsyn till tillverkning med idag beprövad teknik har varianter av denna utformning framtagits.

Undersökningarna har visat att ett OWC-kraftverk endera bör vara orienterat parallellt med vågorna (terminator) och bottenförlagt eller orienterat vinkelrätt mot vågorna (attenuator) och uppankrat på djupare vatten.

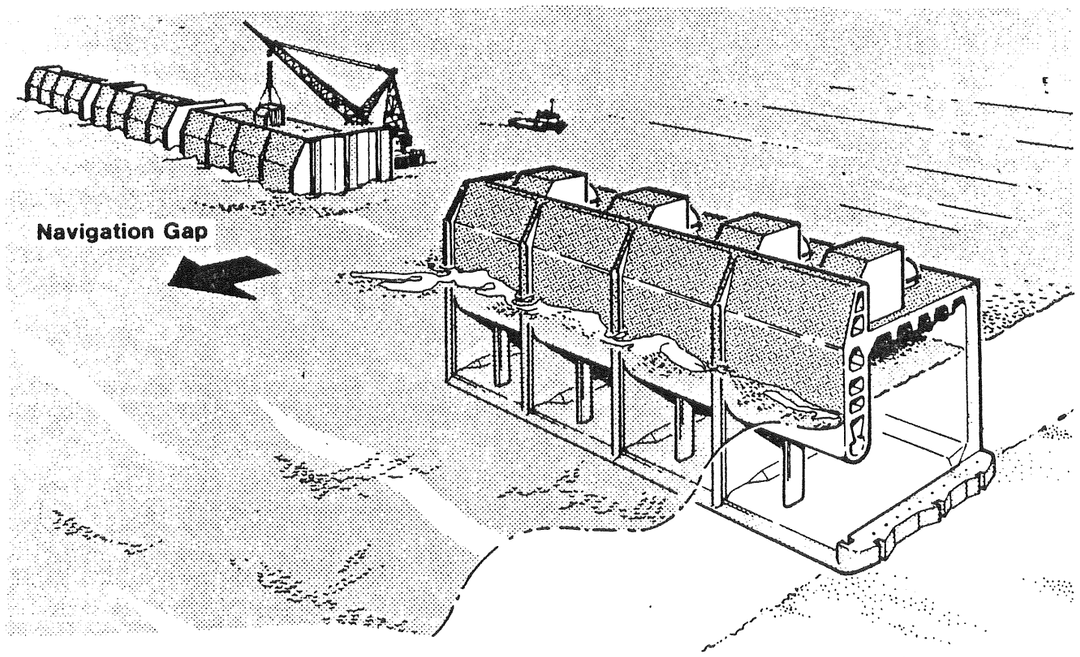


Figur 5.2.27 Utformning av OWC. Figuren längst ner till vänster anses som den bästa från hydrodynamisk synpunkt, (Meir, 1978).



Figur 5.2.28 Mätta och beräknade verkningsgraden för bottenförlagd OWC i regelbundna vågor, (Moody, 1979).

Figur 5.2.29 visar hur ett fullskalekraftverk är tänkt.

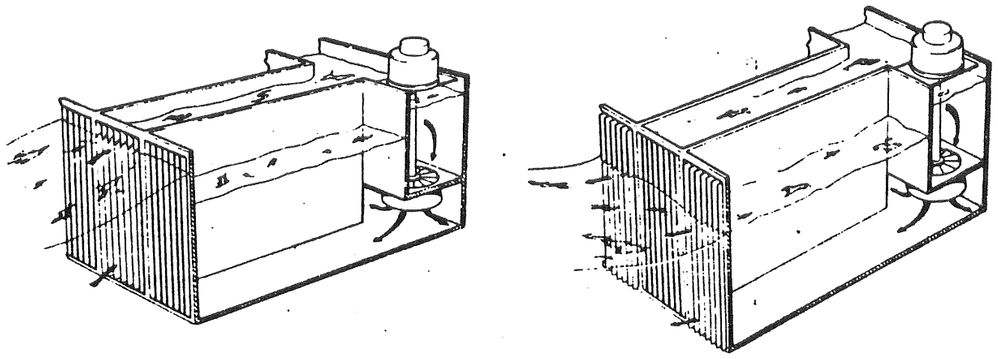


Figur 5.2.29 NEL:s bottenförlagda OWC (1980).

Russels rectifier

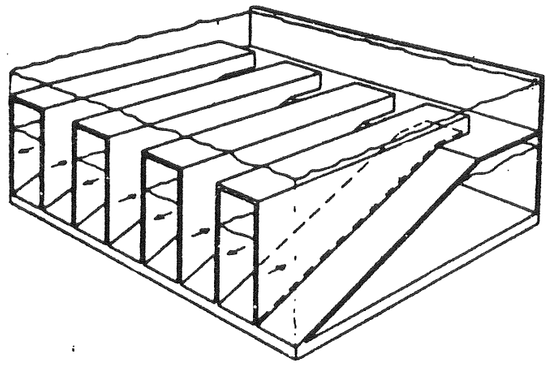
Russels rectifier som utvecklas vid Hydraulic Research Station i Wallingford är en sk passiv omvandlare. Omvandlaren består i princip av två stora reservoarer, som står på botten. Den sida

som vetter mot vågorna är försedd med vertikala klaffar som för den ena reservoaren öppnar sig inåt och för den andra utåt. När en våg kommer in mot kraftverket släpps den in i den övre reservoaren. Vatten flödar kontinuerligt från hög- till lågreservoaren via en turbin för låg fallhöjd. Principen framgår av figuren.



Figur 5.2.30 Russels rectifier (RR:9, 1978).

Bl a för att förhindra sedimentering i bassängerna har konstruktionen ändrats så att det insläppta vattnet får strömma uppför ett lutande plan, se figuren.



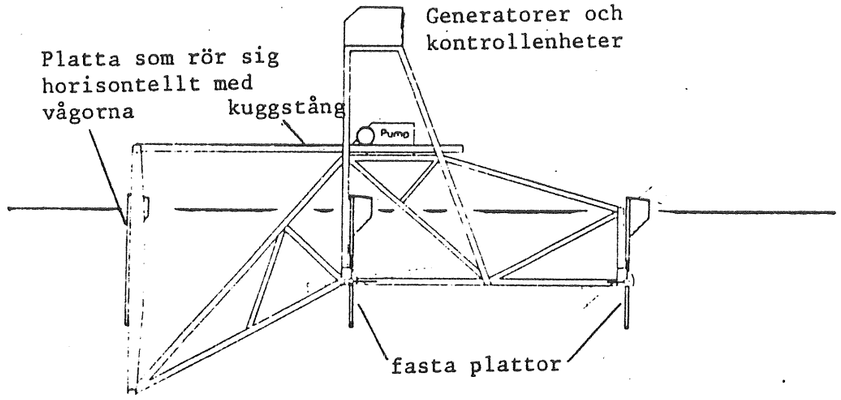
Figur 5.2.31 Russels rectifier med lutande plan (Rance, 1978).

I laboratoriet har verkningsgrader på ca 50% uppnåtts.

En fördel med kraftverket är att förankringsproblemet saknas. I gengäld är materialåtgången stor vilket ger en hög investeringskostnad. Av kostnadsskäl har denna omvandlare avförts ur det brittiska programmet.

The Triplate-Wave Energy Converter.

Vid The Royal Military College of Science i Shrivenham har under F.J.M Farleys ledning, en omvandlare utvecklats, som utnyttjar den horisontella rörelsen hos vattenpratiklarna i en våg. Omvandlaren består i princip av en främre rörlig platta som svänger fram och tillbaka med vågorna och därvid driver en pistong som är fäst i en bakre enhet bestående av två fasta vertikala plattor som är styvt sammankopplade, se figuren.



Figur 5.2.32 The triplate wave energy converter (Altman, 1979).

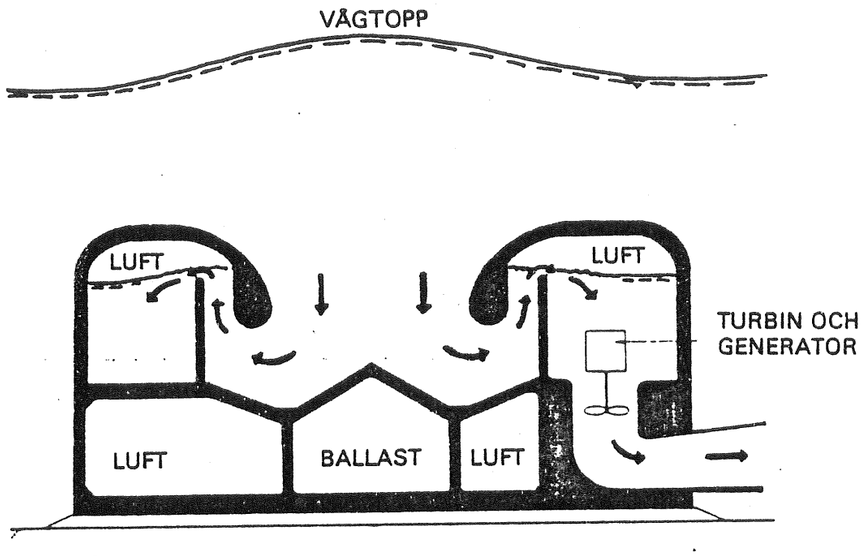
Om avståndet mellan de två bakersta plattorna är en halv våglängd kommer en stående våg att uppstå mellan dessa plattor och krafterna kommer att balansera varandra. På så vis erhålles en styv enhet mot vilken den främsta plattan kan arbeta. Bäst verkan erhålles när denna ligger en kvarts våglängd framför mittplattan. Energin tas ut genom en hydraulpump som via en kuggstång drivs av den främre plattan.

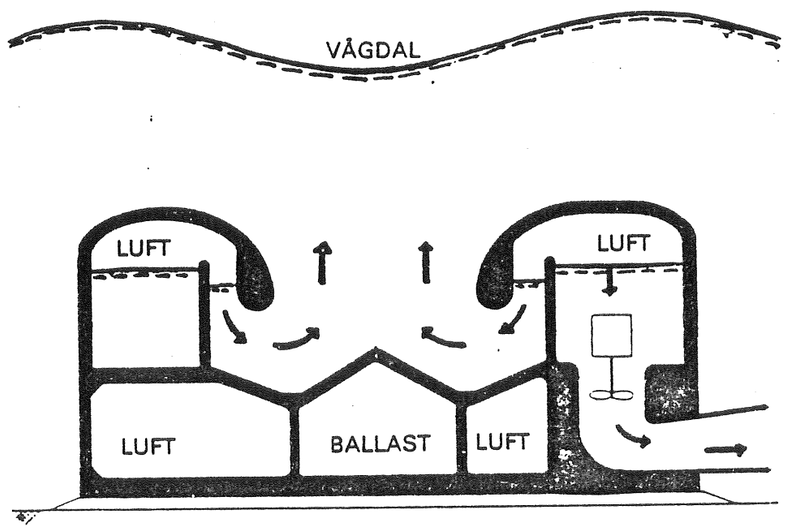
I fullskala uppkommer framför allt problem med knäckning i konstruktionens olika delar varför arbetet med idén lagts ner.

Vickers duct

Vickers Ltd har utvecklat en omvandlare som placeras på havsbotten och därigenom undviker de svåra förhållandena som kan råda på vattenytan. En annan fördel är att förankringsproblemet blir obetydligt. Bottenförlagda kraftverk är skyddade för sjöfart och is.

Principen går ut på att en vattenpelare bringas i svängning av den tryckvariation vågorna orsakar. Vattenpelaren avgränsas med en innesluten luftvolym. Vattnet rinner vid varje svängning över ett överfall (overtopping) varigenom det inkräktar på luftvolymen så att ett övertryck erhålles som utnyttjas för att driva en turbin.

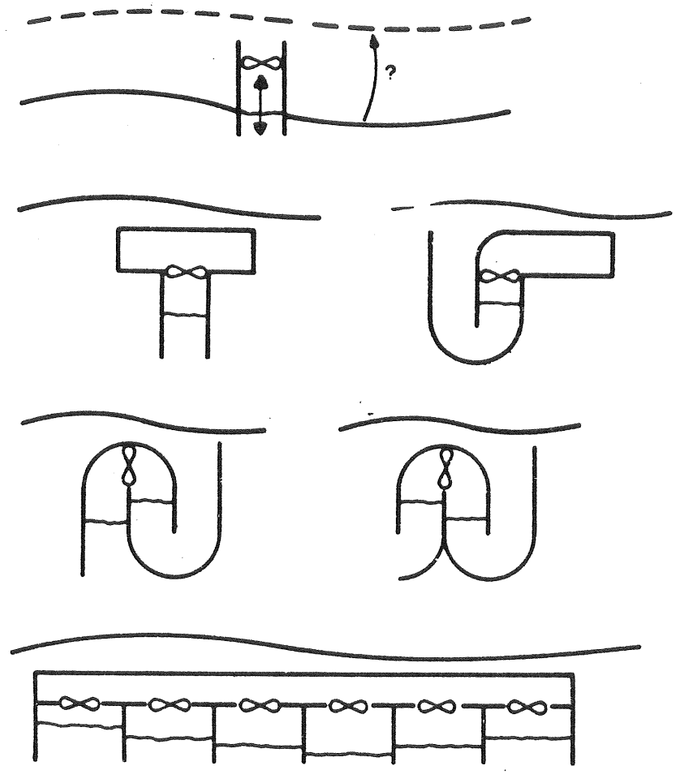




Figur 5.2.33 Princip för Vickers duct, (Wave Energy, 1979).

Ett flertal varianter studeras vidare.

Figur 5.2.34 visar några steg i utvecklingen.



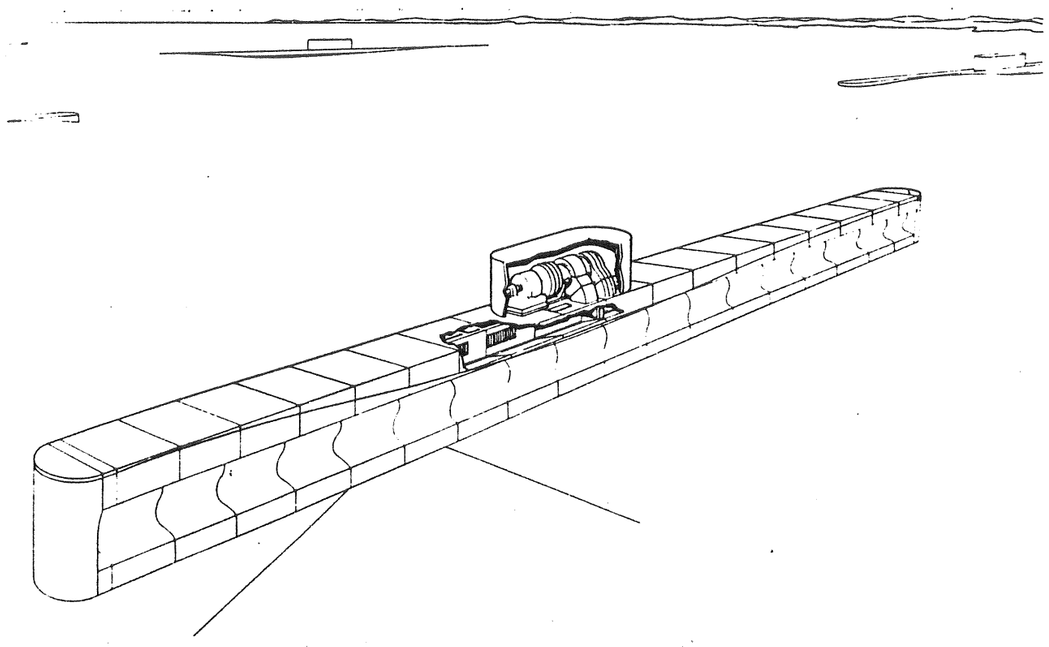
Figur 5.2.34 Utveckling av Vickers duct.

Lancaster Flexible Bag

Professor Michael French vid University of Lancaster har utvecklat en omvandlare kallad "flexible bags". Omvandlaren, figur 5.2.35 består av en lång kropp orienterad vinkelrätt vågkammarna, med ett antal separata luftsäckar längs kroppen.

Säckarna står via backventiler i förbindelse med två längsgående luftkanaler inuti kroppen, figur 5.2.35.

När genom vågrörelsen, vattenytan stiger omkring en säck pressas luften i den ut i en högtryckskanal och när vattenytan därefter sjunker fylls säcken åter med luft från en lågtryckskanal.



Figur 5.2.35 1979 års version av Lancaster Flexible Bag.

Sålunda arbetar luftsäckarna som oberoende bälgar vilka pumpar luft från "lågt" till "högt" tryck. Lufttrycksskilladen motsvarar ungefär halva våghöjden. Luftcykeln sluts via luftturbiner genom vilka luften återvänder från "högtrycks-" till "lågtryckskanalen". Man kan föreställa sig att luftsäckarna expanderar i vågdalarna som därignom fylls ut.

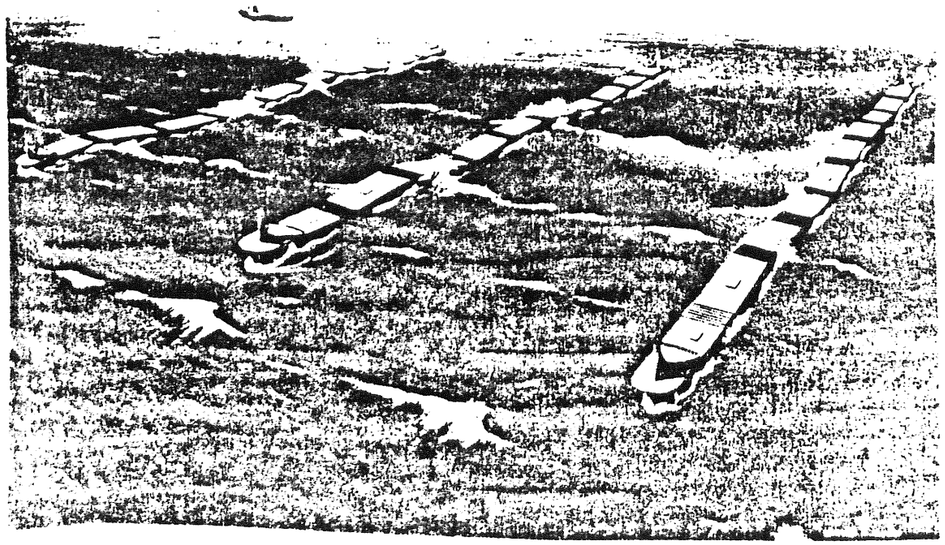
Ett fullskaleverk för farvattnen utanför Hebriderna skulle få längden 200 m, bredden 6,5 m och höjden 14 m. Säckarna görs av cordarmerat gummi och skrovet av betong. En modell i skala 1/40 är provad i laboratorium. En stor del av arbetet har ägnats åt att göra ventiler som fungerar för små tryckskillnader.

Omvandlaren anses fn som den mest lovande av de brittiska förslagen och nya versioner studeras. Matematiska modeller har även presenterats.

Purpoise

Vid the Royal Military College of Science har en idé med kopplade flottar studerats. Flottarna är utsatta för en yttre longitudiell tryckkraft och genom ändring av denna kan systemets resonans-egenskaper ändras. Energin tas ut med pumpar i lederna.

Figur 5.2.36 visar ett tänkt utförande: fullskala

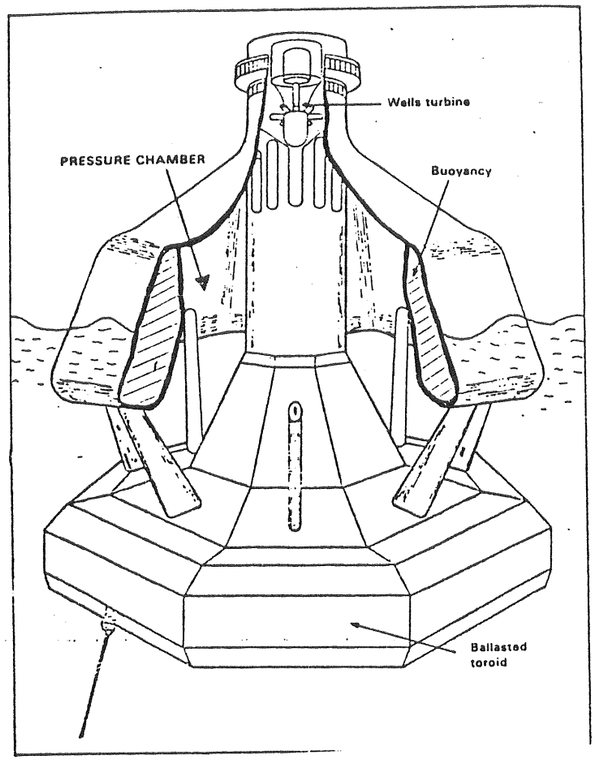


Figur 5.2.36 Purpoise-kraftverk i full skala. Projektet ingår ej i det brittiska programmet.

Belfast buoy

Queens University i Belfast har studerat en bojformad OWC. En prototyp provades i havet 77/78 men skadades vid en storm innan några prov hann göras. Inom projektet har en speciell och mycket enkel luftturbin utvecklats - Wells turbin - som har egenskapen att rotera åt samma håll oberoende av luftens rörelseriktning. Se vidare kapitlet om mellanled.

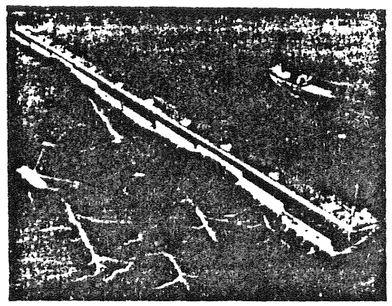
I figur 5.2.37 visas hur en fullskaleprototyp är tänkt.



Figur 5.2.37 Belfast Buoy.

Clam

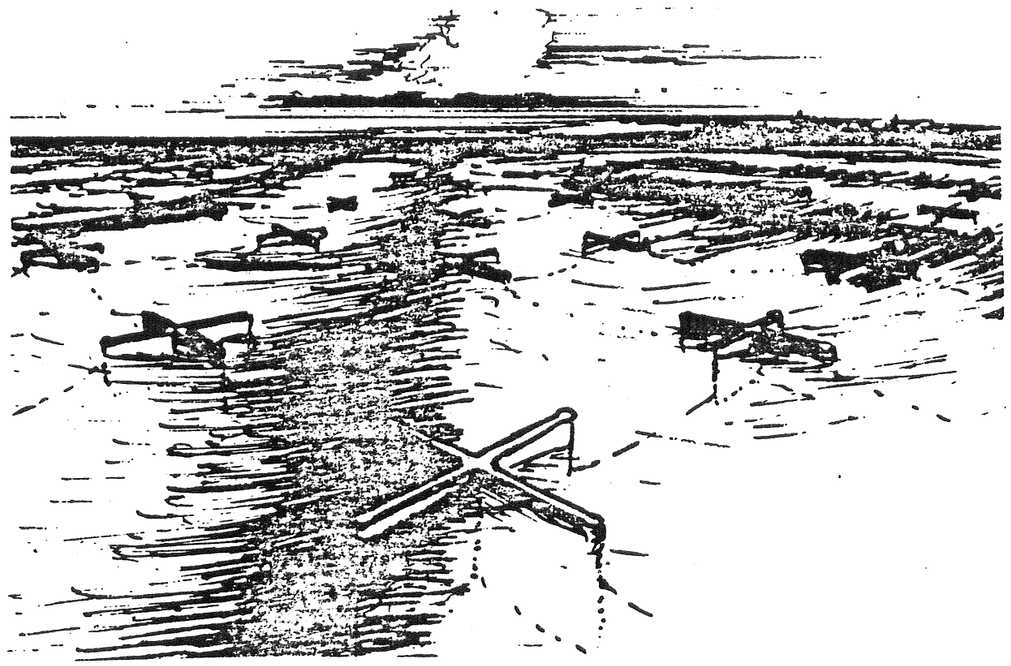
Stora luftkuddar mellan en flytande konstruktion och ledade flappar pumpar luft när flapparna påverkas av vågorna. Luften ingår i ett slutet system så att den återvänder till kuddarna när flapparna är i en vågdal.



Figur 5.2.38 Clam.

Sammankopplade kors

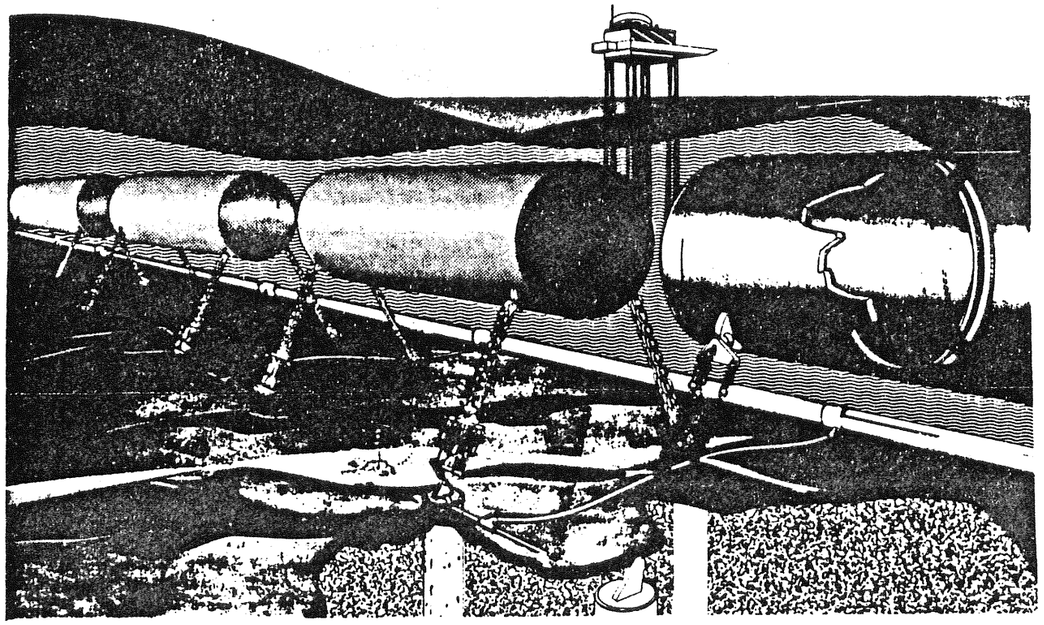
Lancaster University har även presenterat ett förslag som utnyttjar den horisontella partikulärrörelsen i vågorna. Ett antal stora kors med vertikala väggar se figur 5.2.39 förbindes med pumpelement som aktiveras när korsen rör sig i inbördes olika fas



Figur 5.2.39 Sammankopplade kors.

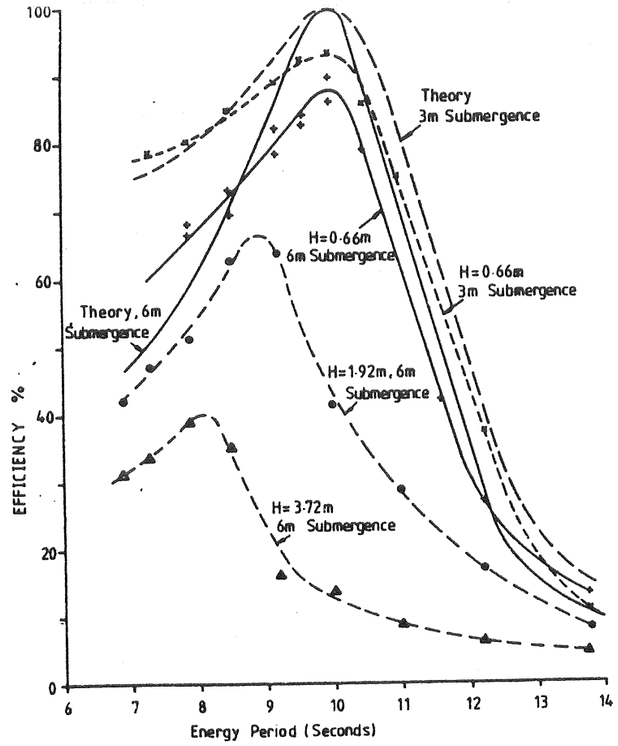
Bristol Oscillating Cylinder

Ett av de förslag som ingår i det brittiska programmet är den av D Evans utvecklade oscillerande cylindern. Denna är helt nedsänkt under avttenytan och förankrad i diagonaler till botten. Under vågornas inverkan beskrives cylinderns axel (utan att cylindern roterar) en sluten bana varvid förankringarna utsätts för pulserande last. Därvid drivs de hydraulpumpar som är placerade i förankringarna. Se figur 5.2.40.



Figur 5.2.40 Bristol Oscillating Cylinder.

I figur 5.2.41 visas teoretiska kurvor för en oscillating cylinder.



Figur 5.2.41 Teoretiska kurvor för en oscillating cylinder.

Norge

Budals och Falnes, point absorber.

Vid Norges Tekniska Högskola (NTH) i Trondheim pågår ett vågenergiprojekt som går ut på att producera energi mha resonansavstämda bojar. Projektet leds av Kjell Budal och Johannes Falnes. De har visat att sk point-absorbers vid resonans, genom antennverkan förmår ta upp energi på en större bredd än bojbredden samt att man med två parallella rader bojar teoretiskt kan ta upp all infallande energi.

En resonansavstämd cirkulärsymmetrisk boj som utför vertikala svängningar och som är optimalt dämpad kan i regelbundna vågor absorbera energi från en vågfront med bredden $L/2\pi$ där L är våglängden.

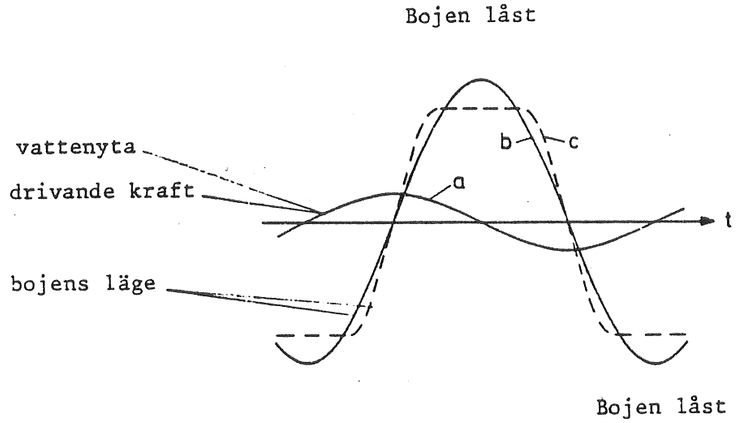
För att åstadkomma resonans för ett brett frekvensområde har Budal & Falnes valt att använda en relativt lätt boj som på ett önskat sätt kan hållas fast i vissa lägen.

Principen är följande: vid sinusformade vågor erhåller ett reso-

nansavstämt system en utsvängning (figur 5.2.42 kurva b) som ligger en kvarts period efter den hydrodynamiska kraften (kurva a). Denna kraft, som vågorna utövar på bojen, är därmed i fas med svängningshastigheten hos bojen. Därför blir det under hela svängningsperioden en inmatning av energi till svängningssystemet från vågen. Denna energiinmatning är orsaken till att utsvängningen blir så stor i ett resonansavstämt svängningssystem. Om systemet inte är i resonans förlorar systemet energi under en viss bråkdel av perioden.

I stället för att justera bojens massa till resonans kan man använda en boj med lätt massa och därför kort egenperiod, och som låses och släpps på ett sådant sätt att dess hastighet så nära som möjligt kommer i fas med den hydrodynamiska kraften från vågen.

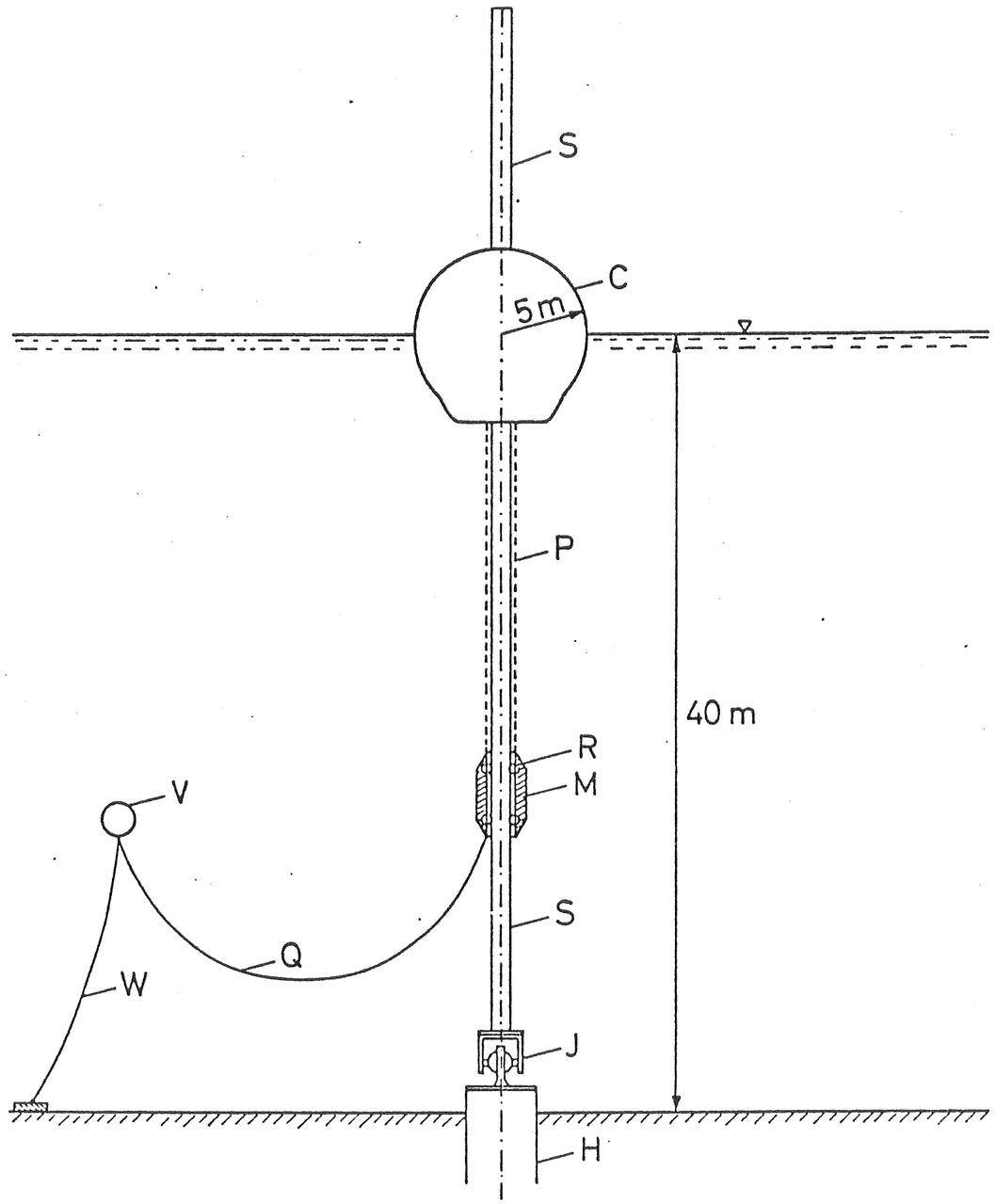
Bojens fasthållning måste styras mha en dator. Principen fungerar även för oregelbundna vågor.



Figur 5.2.42 Ökning av bojens egenperiod genom fastlåning.

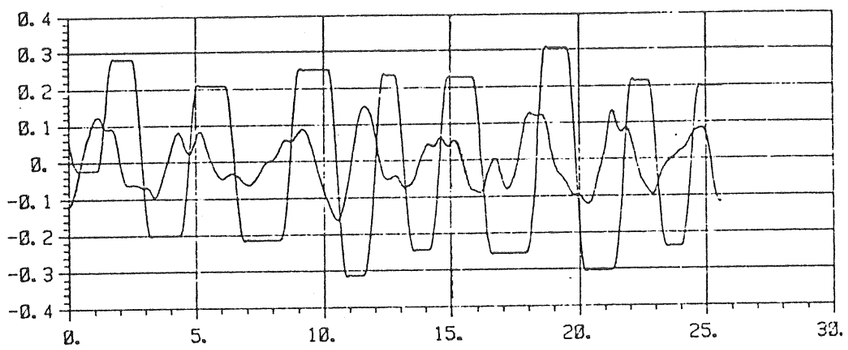
En studie av olika bojtyper har lett till en design enligt figur 5.2.43. Omvandlaren består av en sfärisk boj som löper längs en stel stång vilken är ledat infäst vid botten. Sfären flyter på sitt ihåliga skal. Botten är öppen så att det finns en inre vätskeyta. Denna verkar som en kolv (jfr OWC) och driver ut eller suger in luft genom en turbin. En låsmekanism håller fast sfären i dess översta respektive nedersta läge så att största energiupptagning erhålles enligt den princip som beskrivits ovan.

Bojen har byggts i liten skala (1m diameter) för försök i Trondheimsfjorden. Försök i vågränna har gett uppmuntrande resultat.



Figur 5.2.43 Budals och Falnes' point absorber.

Figur 5.2.44 visar en registrering från försök i oregelbundna vågor där vågrörelsen kan jämföras med bojrörelsen (trapetsformade kurvor).

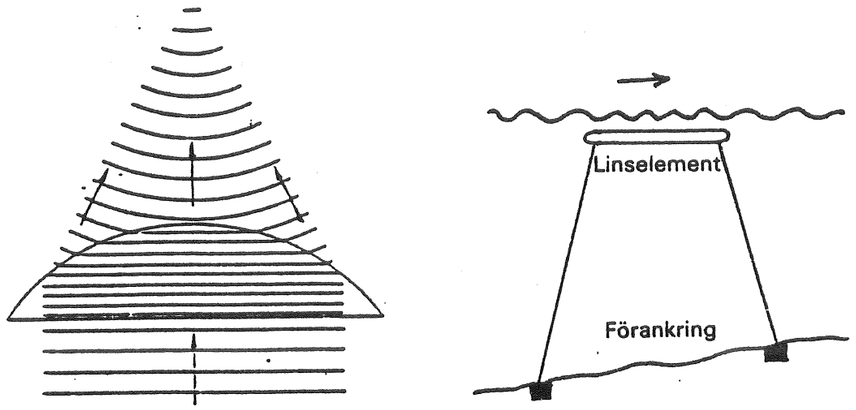


Figur 5.2.44 Illustration av hur resonans åstadkommes genom fasthållning av bojen.

Mehlums våglins

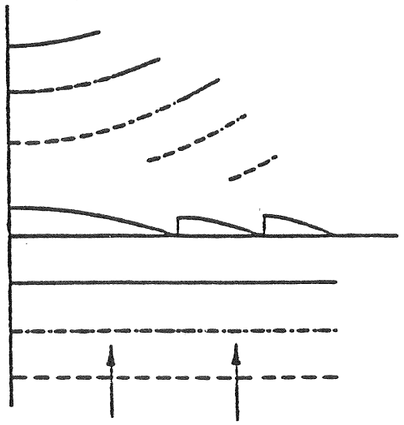
Vid Sentralinstitutt för industriell forskning (SI) i Oslo pågår ett projekt som går ut på att fokusera havsvågor. Vågenergin på en bred front kan härigenom koncentreras till ett litet område där den utvinnes på något lämpligt sätt.

Fokuseringen åstadkommes med hjälp av "våglinser", vilka utgörs av under vattenytan nedsänkta speciellt utformade kroppar. Dessa fungerar som konstgjorda grund vilka bromsar vågorna på ett sådant sätt att de bryts ihop, se figuren.



Figur 5.2.45 Princip för fokusering av vågor, (Mehlum, 1977).

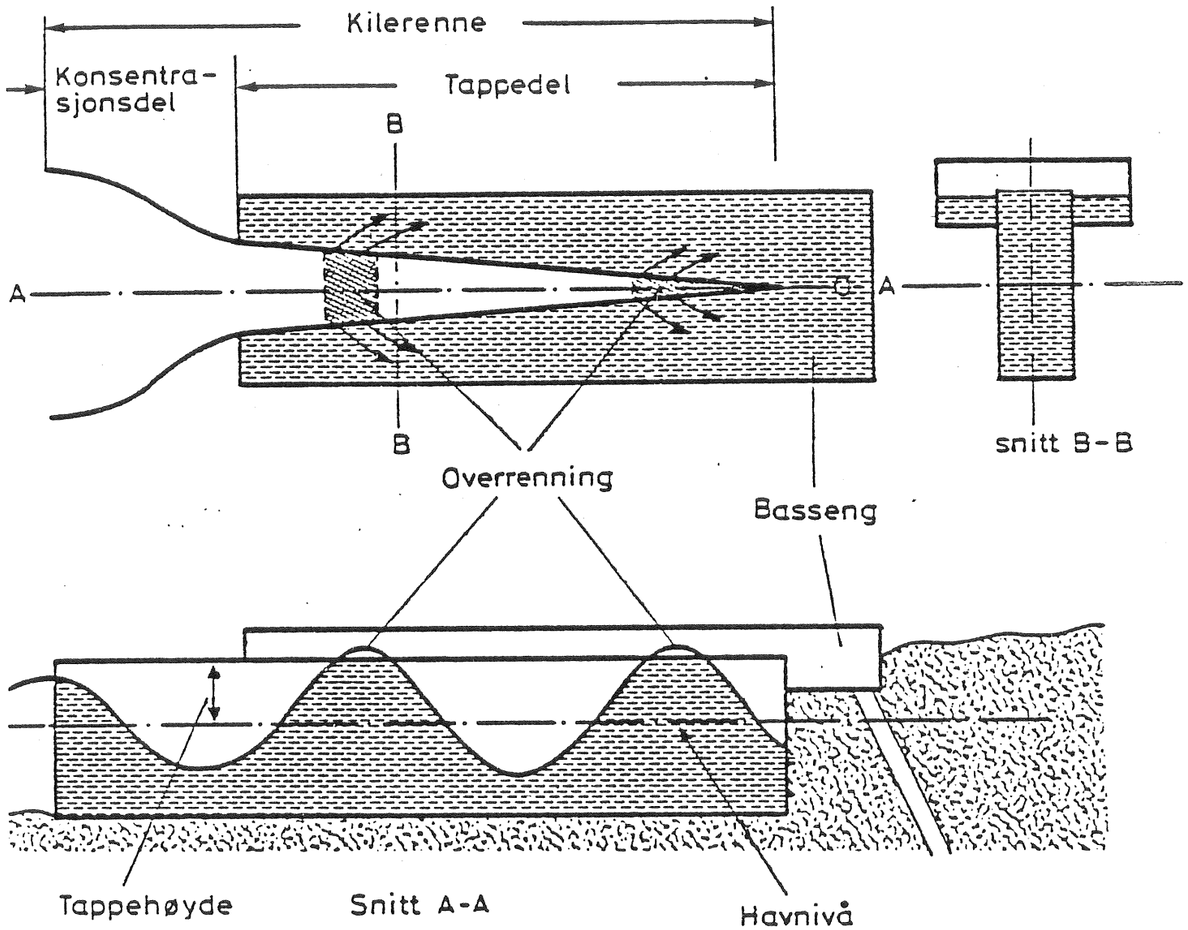
Eftersom linsens bredd skulle kunna uppgå till 10 km skulle linsen bli alltför materialkrävande om den utformades på konventionellt sätt. Even Mehlum har utnyttjat principen för fresnelfokusering för att klara detta problem. Genom att linsen styckas upp i lagom stora segment, väsentligen tagna från linsens krökta del, kan man skapa ett nytt vågsystem av konvergerande vågor där varje våg är sammansatt av stycken härrörande från olika ursprungliga vågor. Härvid fås brytning av fresneltyp, se figur 5.2.46.



Figur 5.2.46 Princip för uppdelning och sammanställning av nya vågfronter, fresnelfokusering, (Mehlum, 1977).

Metoden lämpar sig bäst för regelbundna vågor t ex dyningar. En normal våghöjd på 2-4 m skulle i fokalområdet kunna bli 15-30 m.

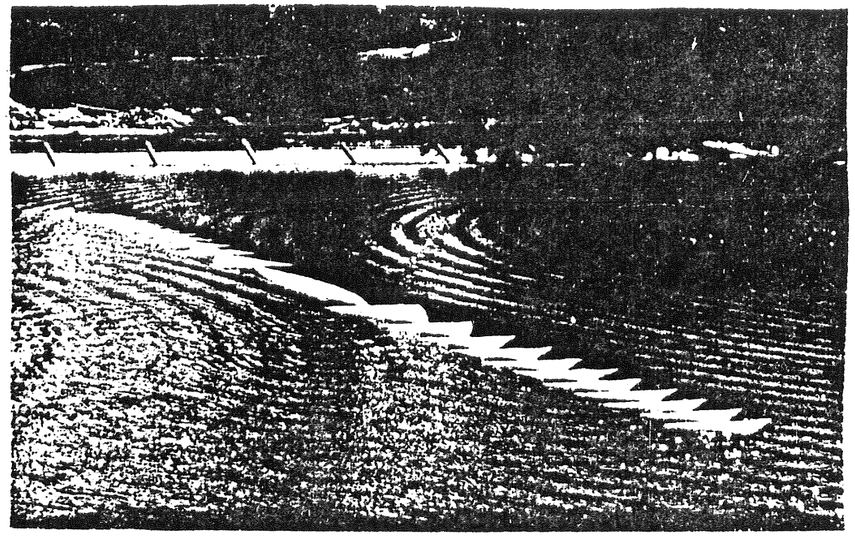
I vågor med sådana amplituder kan flertalet av hittills föreslagna vågkraftverk ej arbeta. En möjlig metod att utnyttja denna teknik, är att låta fokalområdet ligga i inloppet till en konvergerande ränna. I denna stiger vattnet och får rinna över kanten till en reservoar varifrån vattnet sedan tappas genom konventionella turbiner. Figur 5.2.47 åskådliggör denna idé.



Figur 5.2.47 Konvergerande ränna.

På SI har teorierna med fokusering studerats genom omfattande matematiska kalkyler. För att verifiera dessa genom experiment har en experimentanläggning byggts norr om Oslo.

Inledande försök har genomförts och preliminära utvärderingar visar att teori och praktik stämmer överens. Figur 5.2.48 visar vågorna vid ett experiment.



Figur 5.2.48 Våglins med inkommande och utgående cirkulära vågfronter (RR:20).

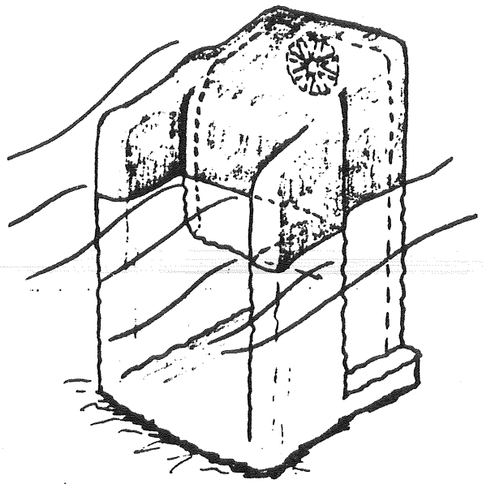
Försöken i bassängen kommer att pågå under några år. En begränsning med metoden är att lämpliga vågor bara förekommer på vissa platser. Om kraftverk skall anläggas på föreslaget sätt är branta höga stränder en förutsättning.

Kvaerners "Svingende vannsøyle".

Kvaerners Brug A/S har utvecklat en bottenfast OWC vars princip är densamma som för NEL:s OWC, se dito.

Skillnaden mellan de båda är för det första att den norska konceptet har en yttre, öppen kammare varigenom två resonansfrekvenser och därmed större bandbredd erhålles och för det andra att omvandlarna står med mellanrum och sålunda verkar som point absorbers.

Utformningen av omvandlarna framgår av figur 5.2.49.



Figur 5.2.49 Kvaerners "Svingende vannsøyle".

USA

Scripp's omvandlare

Professor John D ISaacs vid Scripps University of Caifornia utvecklade en omvandlare som arbetar genom att pumpa vatten genom en turbin.

Valet av omvandlare bygger dels på iakttagelser av resonans av vatten i rör (Isaacs & Weigel, 1949), dels på följande av Isaacs formulerade filosofi:

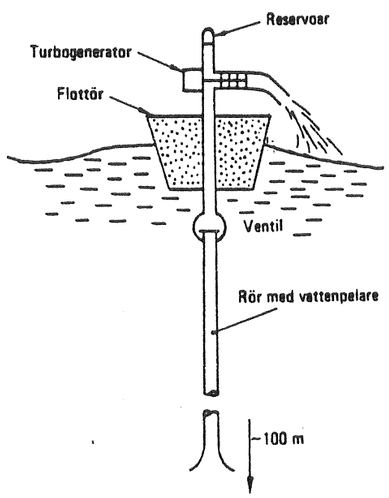
- omvandlaren måste kunna förstärka den relativt låga tryckhöjd som svarar mot våghöjden
- den måste ha ett bredbandigt gensvar för vågamplitud och vågfrekvens dvs vara "non-resonant"
- den måste kunna arbeta i små vågor samt utstå påfrestningarna i stormvågor

FOR-pumpen (FOR=Foundation for Ocean Research, San Diego) utgör ett flytande enkelt förankrat system som i sin nuvarande utformning lämpar sig för energiupptagning på djupt vatten. Omvandlaren arbetar genom cyklisk växelverkan mellan vattenpelaren i ett långt vertikalt rör med en backventil och en boj på ytan,

på ett sådant sätt att vare sig vattenpelaren eller bojen kommer i resonans med vågorna, se figuren.

En möjlig utformning av en kraftverksenhet kan bestå av ett antal perifera omvandlare som under högt tryck pumpar vatten till en huvudturbin som sitter på en central flotte.

Försök med bojar har utförts utanför Californiens kust. Längden på rören har varit 61 resp 92 m.



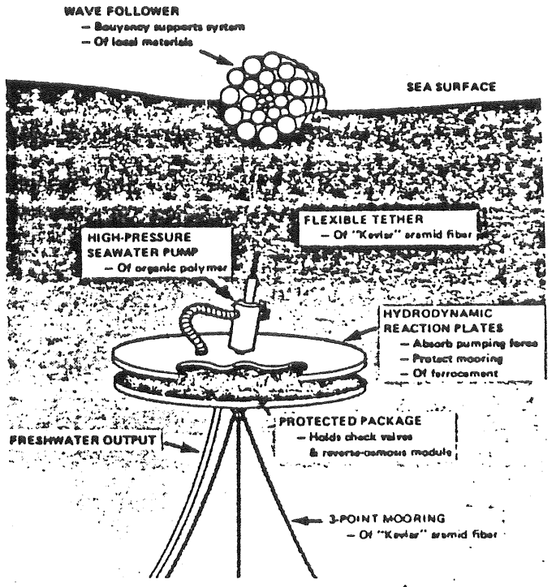
Figur 5.2.50 Scripps omvandlare, (Isaacs, 1972).

Pleass´omvandlare för avsaltning

C M Pleass vid University of Delaware, USA, har föreslagit att utnyttja vågkraft för direkt avsaltning av havsvatten genom omvänd osmos. Se även kapitel 4. Med hjälp av en vågdriven pump pressas vatten genom ett membran som ej släpper igenom Na^+ eller Cl^--joner. Nya typer av membran gör denna teknik ekonomiskt intressant. Figur 5.2.51 visar ett tvärsnitt av ett modernt system med membran i form av tunna rör.

En av idéns grundtankar är att stor enkelhet skall möjliggöra användning i U-länder, där sötvattenproduktionen från havet skulle vara värdefull. Figur 5.2.52 visar en föreslagen utformning.

Figur 5.2.51 Jonselektivt membran (PLeass, 1972)

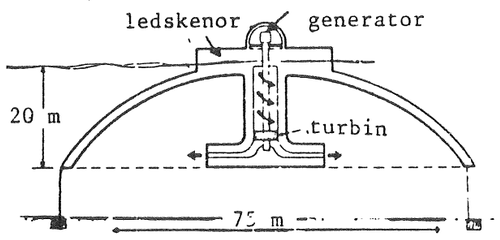


Figur 5.2.52 Enkelt vågkraftverk för sötvattenproduk. (World fishing, 1978)

En anläggning på 1 MW beräknas kunna ge 1.68 x 10 m^4 sötvatten per dygn vid trycket 5.5 MN/m^7. Omvandlingsgraden är ca 30% vilket ger ca 5 · 10^3 sötvatten per dag.

Lockheeds Dam-atoll

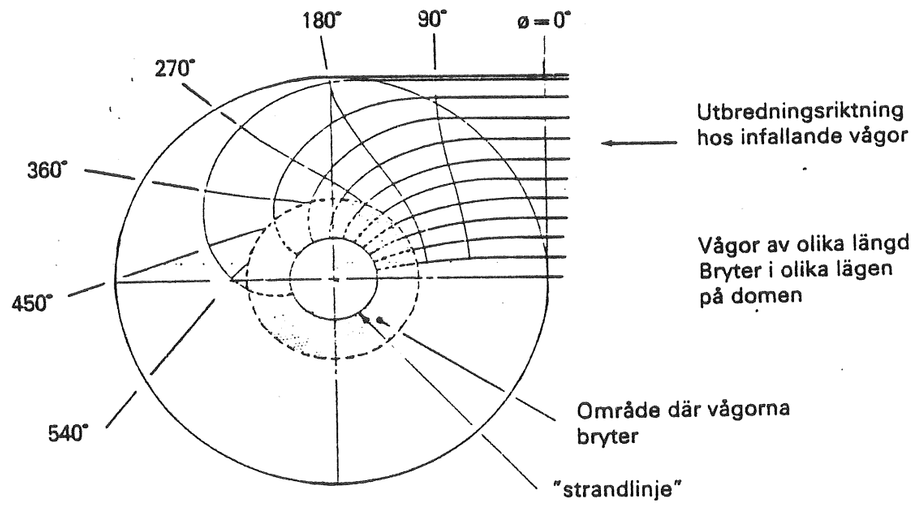
L Wirt och D Morrow vid Lockheed-California Laboratory har patenterat en idé till ett vågkraftverk som har formen av en flytande ö. Idén härrör från iakttagelser av vågrefraktion omkring ön Arthur Island i Stilla havet. Kraftverket består av en bottenförankrad linsformig rotationsdom ca 75 m i diameter och 20 m djup.



Figur 5.2.53 Lockheeds Dam-Atoll, (Isaacs, 1979).

Kraftverket fungerar pa följande sätt: Vågorna fokuserar mot centrum genom refraktion. Kraftverket är försett med konvergerande radiella ledskenor, figur 5.2.55 som styr flödet tangentiellt in i en central cylindrisk brunn som fungerar som ett vätskesvänghjul vilket utjämnar korttidsvariationerna av den infallande energin.

En överhöjning av vattnet i brunnen bidrar till att driva den roterande vattenpelaren genom en speciellt utformad turbin i botten av brunnen. Vattnet som lämnar turbinen flödar ut genom en diffusor så att rotationsmomenten släcks ut. Totalt uppskattad verkningsgrad i modellen är ca 50%.



Figur 5.2.55 Refraktion enligt den sk "Arthur Island Principen", (Isaacs, 1979).

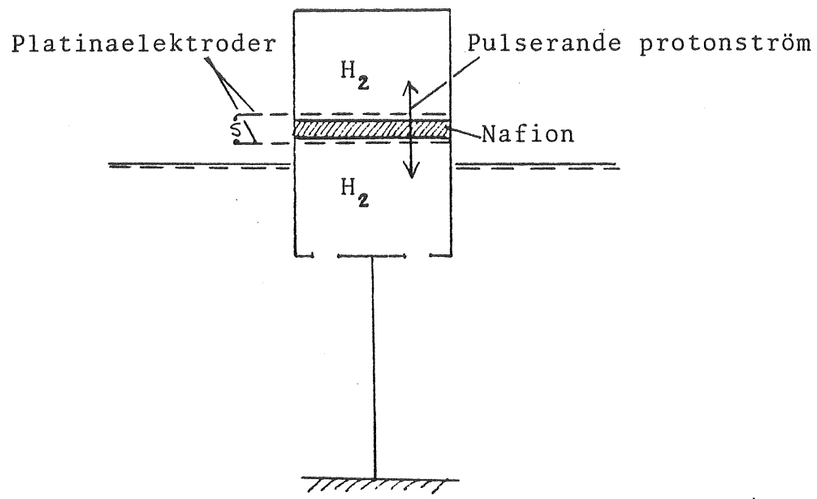
Modellförsök har givit lovande resultat.

Gaskoncentrationscell

Vid Temple University, Philadelphia har man utvecklat en metod för generering av elektrisk ström från vågorna mha en gaskoncentrationscell (Salomon 1978).

Principen framgår av figur 5.2.54. En något nerdragen boj inrymmer två vätgaskammare åtskilda av en syntetisk polymer (Nafion) som släpper igenom protoner. Detta sker när trycket är olika på båda

sidor om polymeren. Genom att ha en konstant volym på ena sidan och en pga vågorna varierande volym på den andra sidan erhålles en växlande tryckskillnad. Upp till 20% verkningsgrad har erhållits. Systemets stora fördel är att rörliga delar saknas.



Figur 5.2.54 Gaskoncentrationscell.

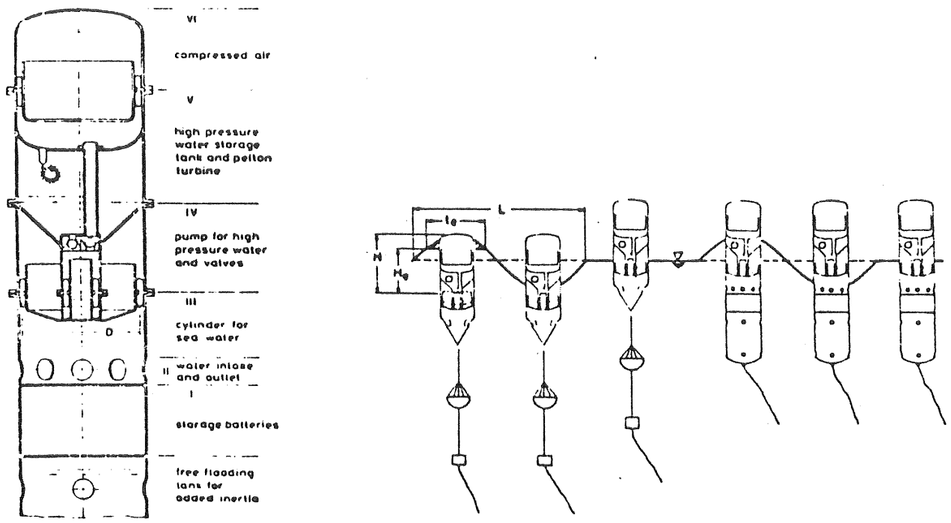
Västtyskland

Kaysers boj

En av de mest namnkunniga inom vågenergiforskningen är dr Harald Kayser, Västtyskland, som bl a föreslagit omvandlare av bojtyp.

Principen för bojen är att tryckvariationerna i vattnet på grund av vågorna driver en kolv med stor area. Denna i sin tur driver en kolv med liten area varigenom trycket ökar. Det förhöjda trycket utnyttjas till av via en vattenstråle driva en pelton-turbin.

Bojens principiella utformning framgår av figuren.

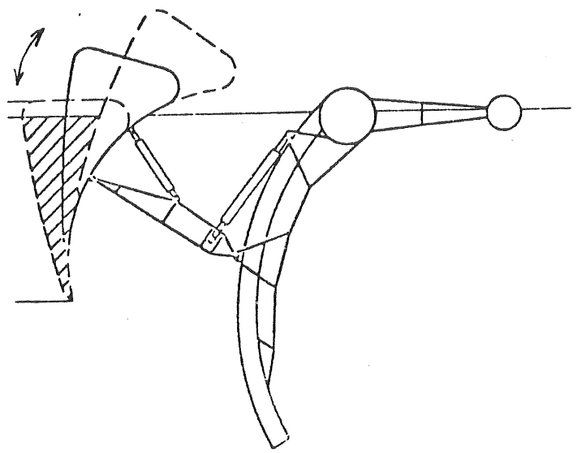


Figur 5.2.56 Kaysers boj, (Kayser, 1979).

Finland

Törnkvists omvandlare

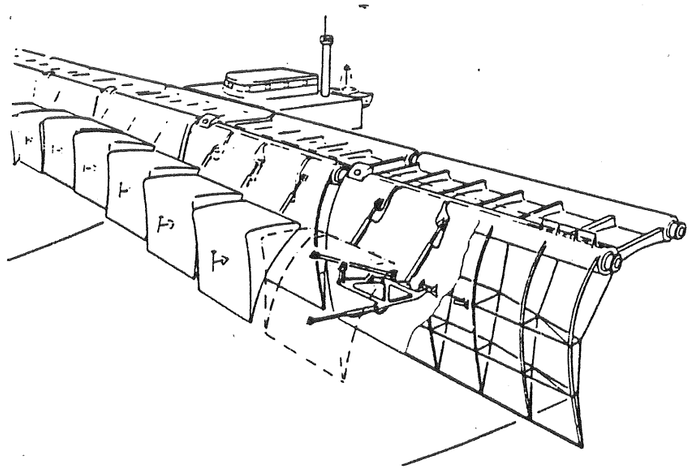
I Finland har uppfinnaren dr Rolf Törnkvist undersökt en typ av omvandlare som i princip består av en svängkil som rör sig med vågorna och en dämpare som ligger relativt stilla, se figuren.



Figur 5.2.57 Törnkvists omvandlare, (Törnkvist, 1979).

Den relativa rörelsen mellan svängkil och dämpare påverkar en hydraulcylinder som driver en hydraulmotor med generator. Försök med en modell i laboratorium har gett lovande resultat. Svängkilen avses mha ett datorkontrollerat system styras så, att optimal

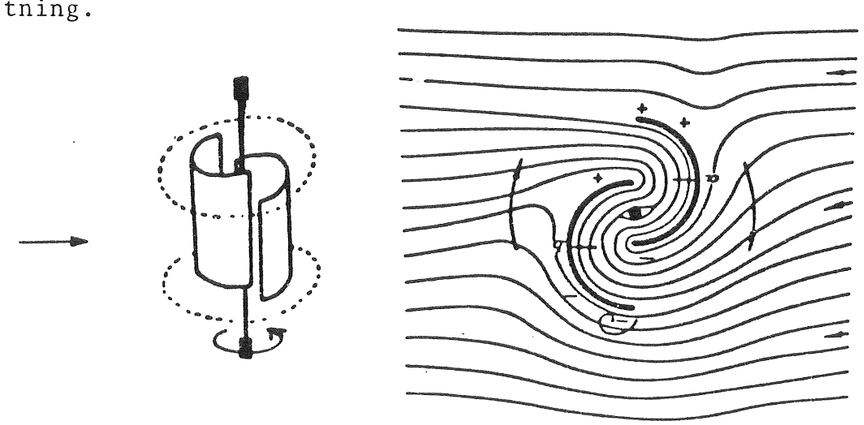
Figur 5.2.58 visar hur ett fullskalekraftverk skulle se ut.



Figur 5.2.58 Fullskalekraftverk enligt Törnkvists idé, (Törnkvist, 1979).

Savoniusrotor

J Savonius (1931) rapporterar om ett vågkraftsaggregat byggt på principen med Savoniusrotorn. Aggregatet installerades av Institut Océanographique i Monaco och utnyttjades för att pumpa upp vatten till Museé Océanogrphiques akvarier. Lyfthöjden var ca 50 m. Savoniusrotorn roterar åt samma håll oberoende av strömmens riktning.

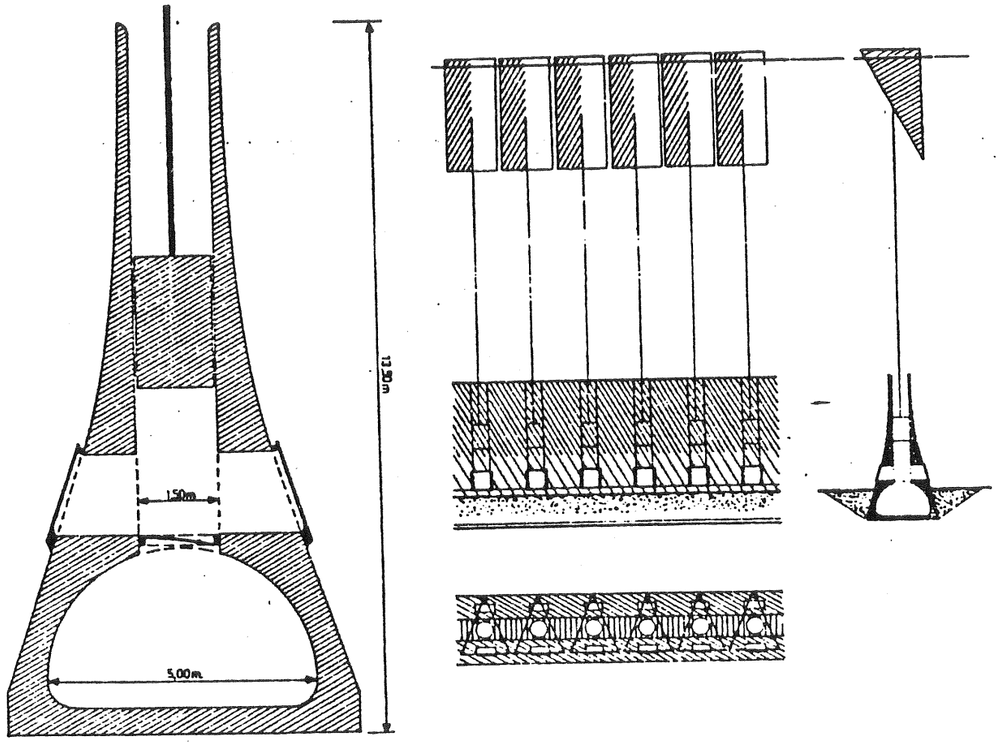


Figur 5.2.59 Princip för savoniusrotor samt strömnings- och tryckbild.

Danmark

Vågpump

Kim Nielsen vid Danmark Tenkniske Højskole har presenterat en idé till vågpump (Nielsen, 1980). Principen framgår av figur 5.2.60.

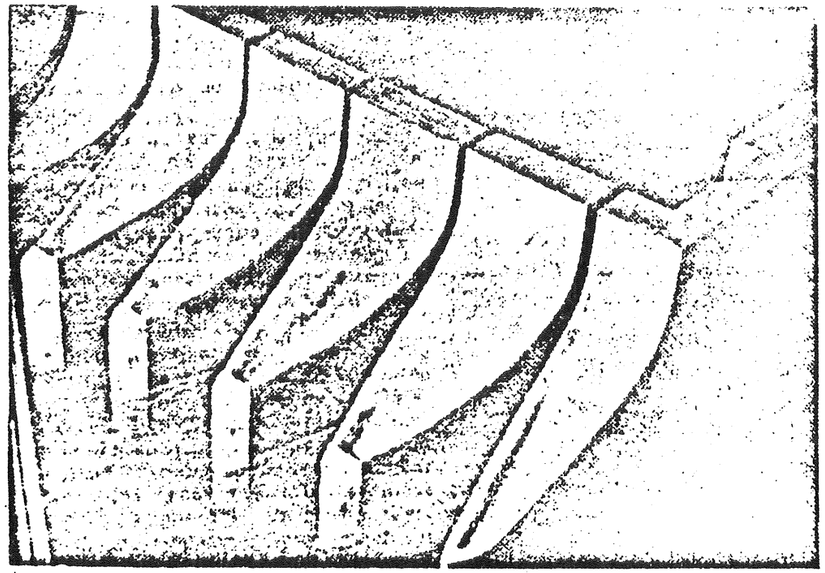


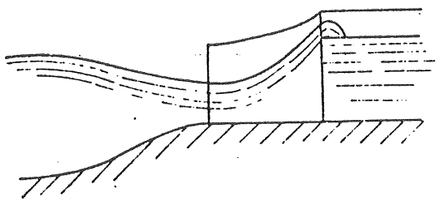
Figur 5.2.60 Kim Nielsens förslag till vågpump.

Frankrike

Konvergerande kanaler

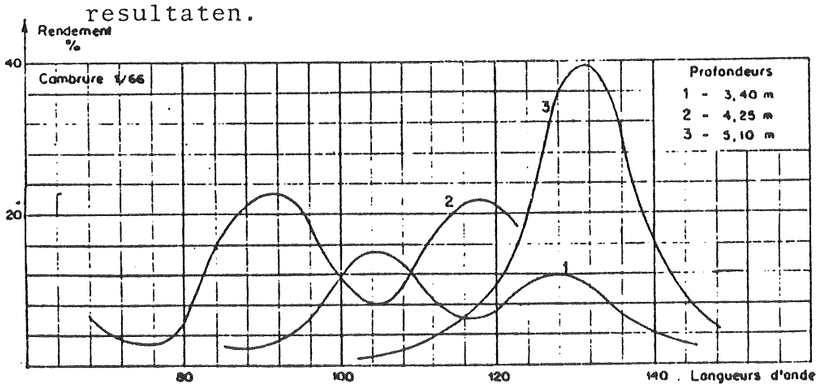
R Dhaille (1956) redovisar modellförsök från 1944 med konvergerande kanaler, se figur 5.2.61.





Figur 5.2.61 Konvergerande kanal.

Verkningsgrader på uppemot 40% noterades i försöken. Se figur 5.2.62. Teoretiska beräkningar överenstämde väl med försöksresultaten.



Figur 5.2.62 Verkningsgraden hos "dièdre" som funk. av våglängden vid olika vattendjup.

Undersökningarna fortsattes inte pga svårigheter med tidvattnet samt pga att möjligheten för lönsamhet bedömdes för låg.

Försök har även gjorts med hydraulisk ramm (Remenieras 1956).

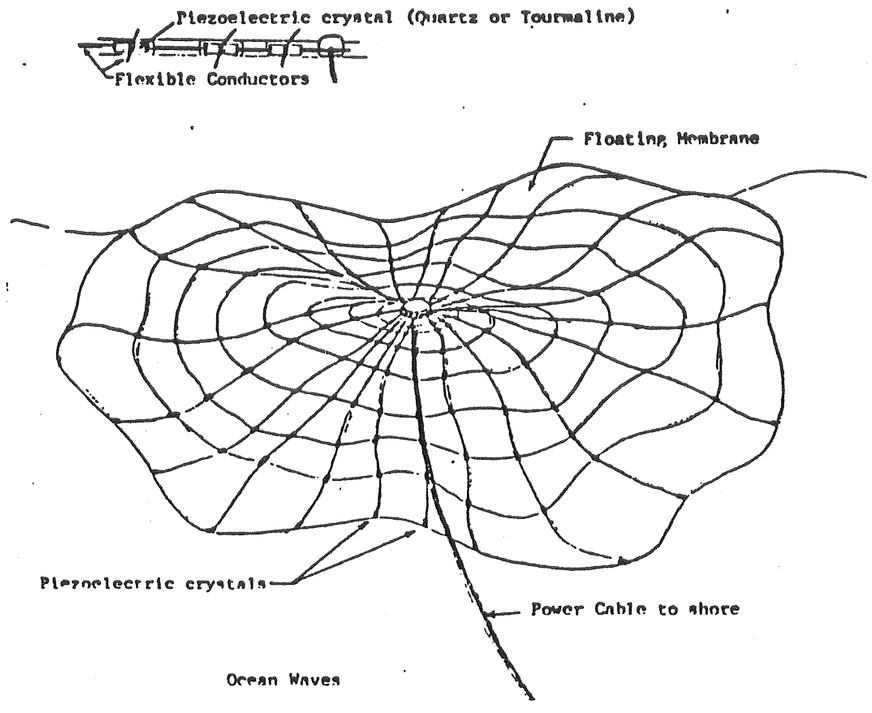
Mauritiusprojektet

Redan i mitten av 1950-talet undersöktes möjligheten att förse ön Maruritius med vågenergi. Den studerade principen gick ut på att låta vågoran rutscha upp över kanten på ett lutande plan som byggdes på ett naturligt rev och med i en högre belägen bassäng. Ur denna skulle energin sedan toppas endera direkt genom konventionella turbiner avsedda för låg fallhöjd eller indirekt genom uppumpning tills en högreservoar varifrån vattnet släpptes genom en normal turbin. Uppumpningen skulle ske med turboramm pumpar som väl närmast är att karakterisera som vädur En fördel med det senare alternativet var att det gav mer prima energi.

Patent

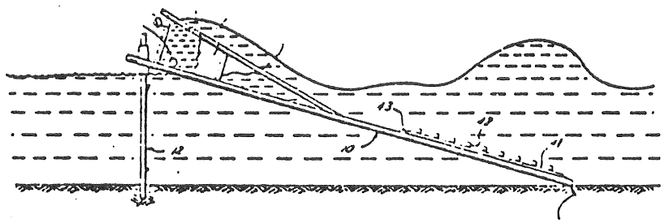
Givetvis är flertalet av ovan beskivna omvandlare patenterade men floran av patent är betydligt mer omfattande och torde kunna räknas i tusental. Det äldsta är från 1897. Nedan visas ett par exempel som ytterligare viasr vilken mångfald av principer som är tänkbara.

Den första figuren visar en idé som bygger på utnyttjande av piogoelektriska kristaller. I knutpunkterna en "spindelväv" av ett flytande membran finns krisller monterade. Vid vågrörelser utsätts nätets olika delar för mekaniska krafter så att kristallerna aktiveras.



Figur 5.2.63 "Vågkraftverk" med piezoelektriska kristaller.

Ett annat kanske mer realistiskt förslag går ut på att låta vågorna rusa uppför ett lutande plan som ger efter för vattenmassan och sedan återfjädrar. Ur rörelsen hos planet tas energi ut, se figur 5.2.64.



Figur 5.2.64 Lutande plan med återfjädring.

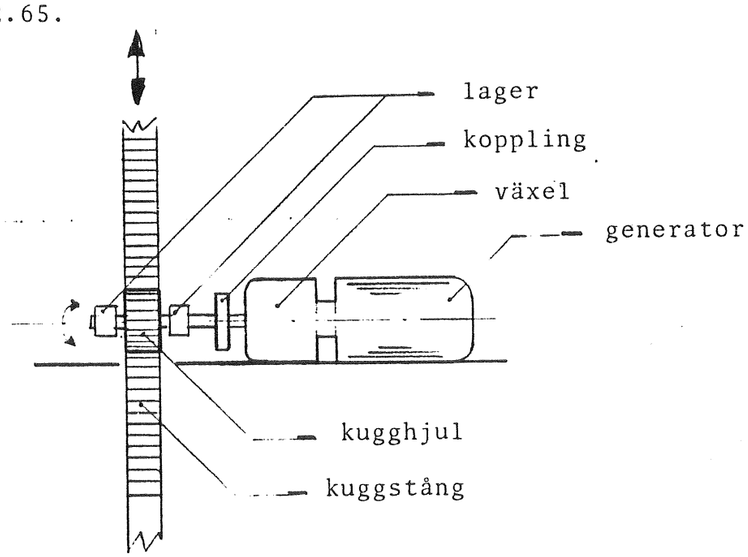
5.2.3 Mellanled

Mekanisk omvandling

Mekaniska system för omvandling av vågenergi till roterande och eller linjär rörelse anpassad till konventionella generatorer eller pumpar ingår i en del typer av vågkraftverk.

Eftersom vågenergin kännetecknas av stora krafter i kombination med relativt långsamma hastigheter krävs att de mekaniska systemen dels skall klara av stora påkänningar och dels transformera rörelsen antingen linjärt eller roterande.

Mekanisk omvandling kan åstadkommas t ex genom att en relativrörelse som uppkommer mellan två svängande system, överförs via en kuggstång eller kuggrem ett kugghjul, växel och generator, se figur 5.2.65.



Figur 5.2.65

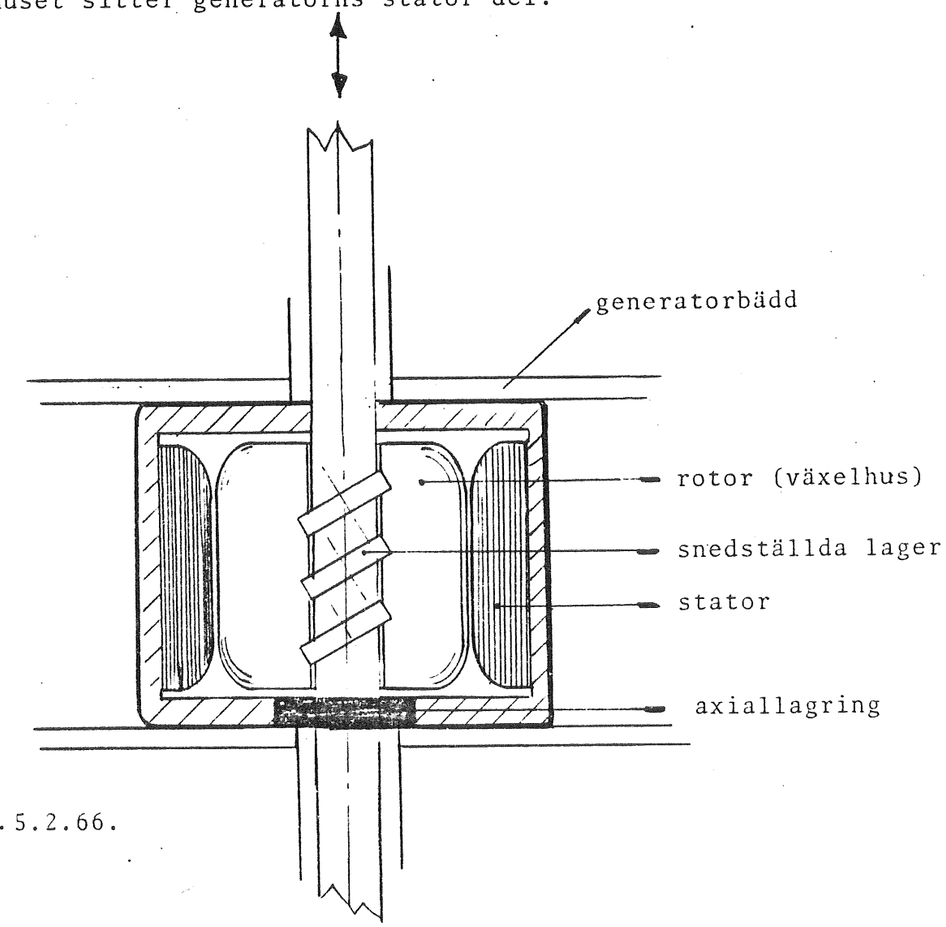
I detta system, som för övrigt använts vid försöken med IPS-bojen till havs, har man en relativt långsam fram och återgående rörelse, vilket medför att växel och generator växlar rotationsriktning. Detta är i och för sig ingen nackdel för elproduktionen eftersom den varierande spänningen likriktas. Dock kan livslängden hos generator och växel påverkas.

Resultaten från försöken har visat på tre problemområden i samband med det beskrivna mekaniska systemet:

- val av material i kuggstång och kugghjul
- noggrannheten i kuggingrepp och styrning av kolvstången. Detta gäller både vid tillverkning och montering
- en amplitudbegränsning hos kolvstångens rörelse.

Det visade sig att även om hastigheterna är låga så uppstår mekanisk nötning till följd av oexakthet i lagring och styrning av kolv och kolvstång.

Vid institutionen för elektromaskinlära har man i ett examensarbete undersökt en växel med generator för direkt omvandling av linjär rörelse till elenergi. Växeln som är en friktionsväxel är uppbyggd kring en slät cirkulär stång. Runt stången finns ett växelhus som samtidigt utgör en rotor. I växelhuset sitter ett antal snedställda kullager som ligger an mot stången. När stången rör sig axiellt genom växeln uppstår friktionskrafter som verkar tangentiellt och får växelhuset att rotera se figur 5.2.66. Runt växelhuset sitter generatorns stator del.



Figur.5.2.66.

Denna friktionsväxel med generator är tillämpbar i kraftverk där man har en linjär relativrörelse, typ IPS-bojen.

Hydrauliska mellanled.

Fördelen med hydrauliska system är att det är förhållandevis lätt att åstadkomma varje önskat varvtal på en utgående roterande axel som exempelvis driver en generator. Varvtalet kan också med enkel känd teknik hållas konstant eller regleras på annat sätt.

Trycknivån i hydrauliksystemet kan väljas mellan den låga nivå som vågorna åstadkommer i havet (några få meter vattenpelare) till höga tryck som användes i dagens hydraulsystem (30 MPa).

Vid de lägre trycken är vatten antagligen lämpligt medium medan de höga trycken kräver olja.

Kraftverket med petropumpar som tidigare behandlats i flera rapporter arbetar med vatten och en trycknivå på upp till ca 1.0 MPa. IPS-bojen som bl a provats vid Trubaduren sommaren 80 och 81 arbetar med en kolv som direkt påverkas av vattnet i vågen dvs trycknivån på ca 0.02 MPa.

Ett system med högtryckshydraulik har studerats i rapporten GR:29.

Man kan lagra den hydrauliska energin i accumulatorer. En sådan utgörs av en gasfylld behållare där trycket på gasen höjs genom att man pumpar in fluiden.

Ett annat alternativ är lagring som lägesenergi hos vatten i högt belägna dammar varvid energin utvinnes med konventionell vattenkraftteknik. Man kan också få fallhöjd mot en damm i ett bergrum på stort djup. Denna typ av energilagring har studerats i ett examensarbete vid institutionen för Vattenbyggnad, (Erenmalm, Mårtensson 1980).

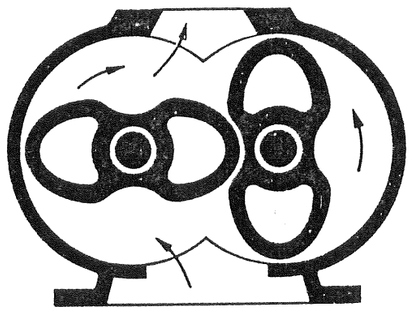
Pneumatiska mellanled.

Många av de idag pågående vågkraftsprojekten användes pneumatisk omvandling vilket innebär att vågenergin omsätts till lufttryck och luftflöde.

För att överföra vågenergi till pneumatisk energi kan man låta en fri vattenyta i någon form av luftklocka fungera som luftpump. Några exempel på sådan omvandlare är OWC (Oscillating Water Column) som studeras av NEL i Skottland, Kvaernaer och NTH i Norge. Samt JAMSTEC i Japan. En bottenfast OWC har även studerats i modellskala i ett examensarbete vid CTH, Jannesson (1980). Detta arbete visade god verkningsgrad hos omvandlaren men en relativt smal bandbredd. Amplitudförstärkningar som mättes var mellan 1 och 2.

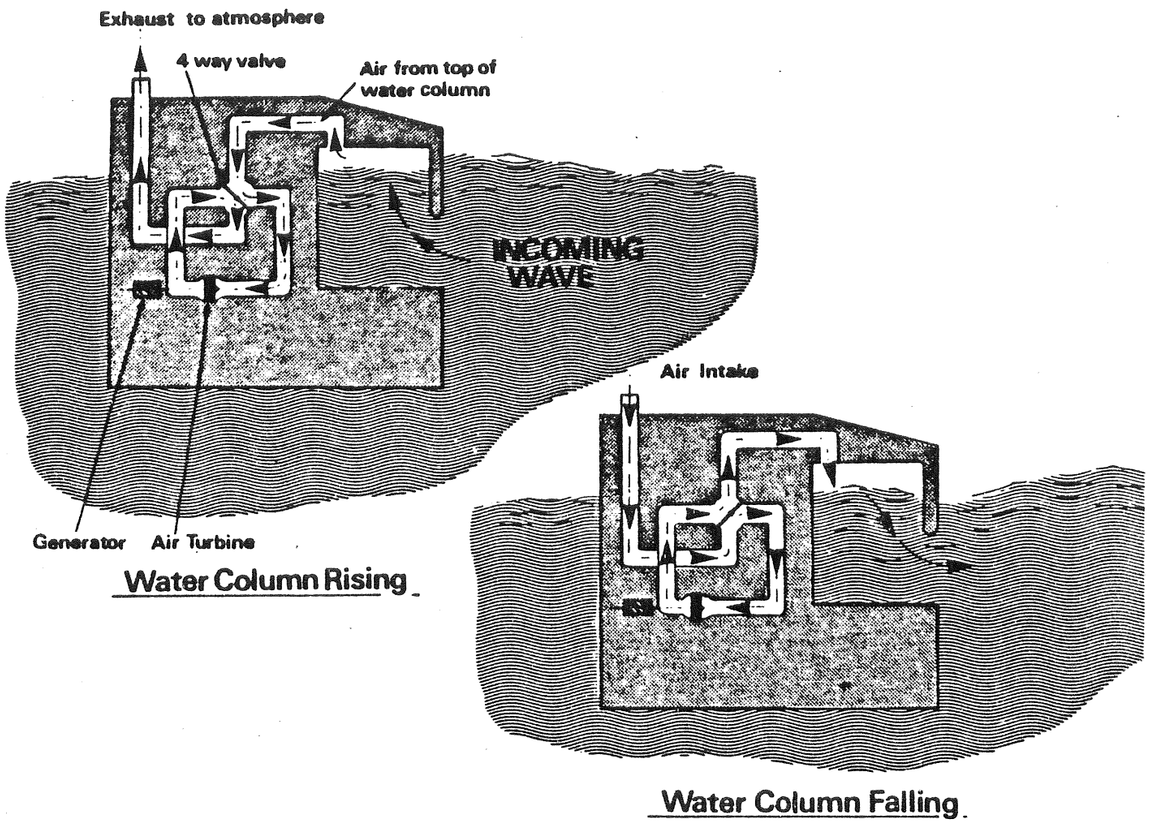
Vid högst uppmätta verkningsgraden motsvarande tryckskillnaden ungefär våghöjden.

Pneumatiska motorer kan indelas i aerodynamiska (ex v turbiner) och volymetriska. Exempel på volymetriska maskiner är kolvmotorer och rootsblåsmaskin se figur, körd så att energi tas ut på axeln.



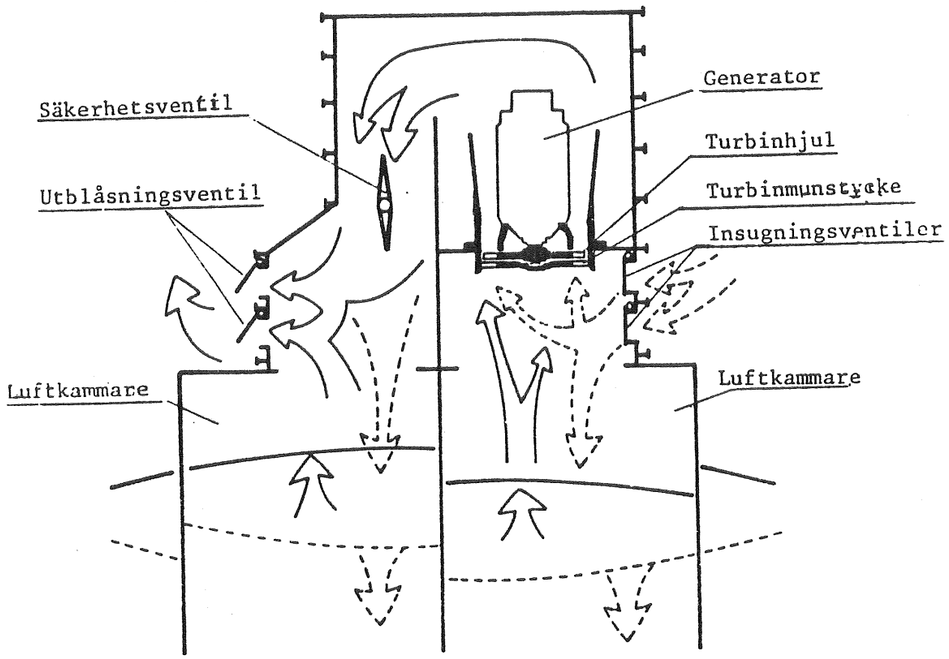
Figur 5.2.67 Principskiss av Roots blåsmaskin.

Luftströmmen som genereras av vågorna är vanligtvis fram och återgående. För att undvika att generatorn också blir det kan man ha ett system av ventiler som likriktar flödet över turbinen, se figur 5.2.68 och 5.2.69.



SCHEMATIC OPERATION OF NEL OSCILLATING WATER COLUMN

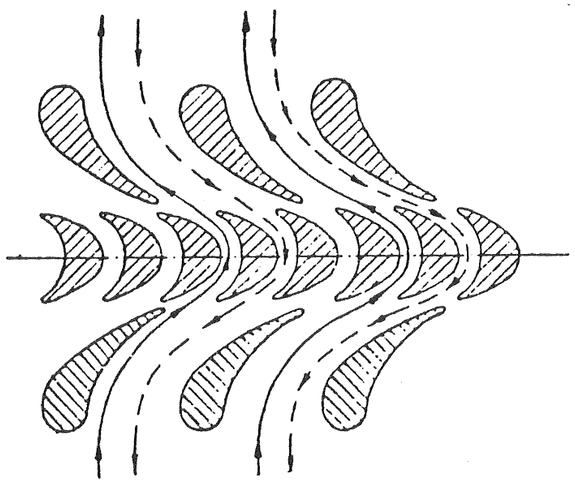
Figur 5.2.68 Likriktning av luftflöde med fyrvägsventil i applikation på NEL OWC.



Figur 5.2.69 Princip för dubbelventilsystem på KAIMEI (Hiramoto,1978)

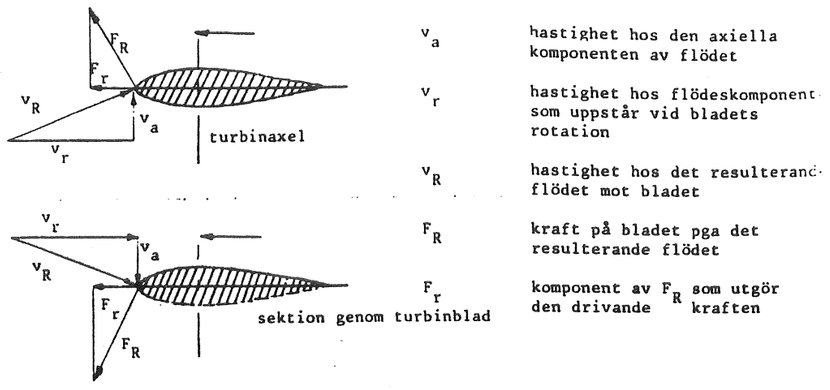
Det finns några typer av turbiner som roterar åt samma håll oberoende av anblåsningsriktningen. En sådan är Babintsevs turbin.

En radiell vy över skovlar och ledskenor finns i figur 5.2.70.



Figur 5.2.70 Principskiss över ledskovelsystem i Babintsevs turbin.

Wells turbin som också roterar åt ett håll oberoende av anblåsningsriktning har en enklare uppbyggnad. Dess rotorblad består av en symmetrisk inprofil enligt figur 5.2.71.



Figur 5.2.71 Principskiss av Wells turbin.

Pga rotationen anblåses alltid profilen snett framifrån vilket alltid ger ett possitivt moment. Turbinen är självstartande men har ett lågt startmoment.

Well's turbin har studerats i ett projekt vid CTH institutionen för Strömningsmaskinteknik (Johansson & Weenhuizen 1980). En dimensionering av en turbin och en teoretisk analys av dess verkningsgrad har gjorts. Relativt god verkningsgrad - ca 60% erhölls.

Energilagring i pneumatisk form.

Genom att komprimera luft kan man lagra energi i en tryckklocka. Denna kan sedan utnyttjas för att ta ut en jämn effekt på generatorn. Energilagring i högkomprimerad gas är förhållandevis energität.

Man kan i en lagringsvolym på en kubikmeter vid maxtrycket 0,2 MPa dvs 0.1 MPa övertryck lagra ca 50 kWs.

Om man arbetar med högre tryck lämpliga för oljehydraulik (ca 20 MPa) pumpar man in olja i en gasklocka och därvid höjes trycket på gasen. Man kan då i en kubikmeter lagra ca 2 kWh. System för lagring av stora energimängder där man använder ett bergrum som luftklocka har byggts.

5.2.4 Generatorer

Nya typer av rotorlindningsfria generatorer för användning i vågenergiomvandlare.

Följande avsnitt refererar rapporten GR:29 av Svante von Zweygbergk.

En elektrisk generator för överföring av vågenergi till elektrisk energi måste uppfylla extremt höga miljökrav. Generatorn skall arbeta i starkt salthaltig och fuktig atmosfär. Detta krav medför att generatorn bör vara helt sluten. Då generatorn skall placeras ute till havs måste man även tillse, att den är praktiskt taget service- och underhållsfri. Detta krav innebär, att generatorer försedda med släpringar och borstar måste uteslutas.
Då alla dessa krav beaktas återstår egentligen endast tre generatortyper :

- borstlösa synkrongeneratorer
- asynkrongeneratorer med burlindad rotor
- reluktansgeneratorer

Dessa generatorer kan utföras antingen som roterande maskiner eller som linjära generatorer.

I vissa konceptioner, om vågenergiomvandlaren exempelvis är en i flera riktningar rörlig bojkonstruktion, kommer generatorn att arbeta med en ständigt varierande hastighet och rörelseriktning. Härvid kommer även lagerbelastningen kontinuerligt att variera, såväl radiellt som axiellt.

Det är givetvis en väsentlig fördel om generatorn tål en hög grad av överbelastning utan att tillåten temperaturgräns överskrids. Eftersom kylning av den rörliga rotorn inte är ekonomiskt försvarbar är den borstlösa synkrongeneratorn i överbelastningshänseende mindre lämplig. Asynkrongeneratorn är bättre, men burlindningen kan inte uppvärmas över en viss gräns utan att skadas. Reluktansgeneratorn är ur överbelastningssynpunkt den lämpligaste, eftersom den rörliga delen är helt fri från lindningar.

Rapporten innehåller en grundläggande behandling av de flesta rotorlindningsfria generatorer, som kan vara aktuella för vågenergiomvandlare.
I det första avsnittet ges en exposition av äldre typer av sådana generatorer, såsom homopolära och heteropolära induktorgeneratorer, klopolsgeneratorer, Assar-generatorn och Simotron-generatorn.

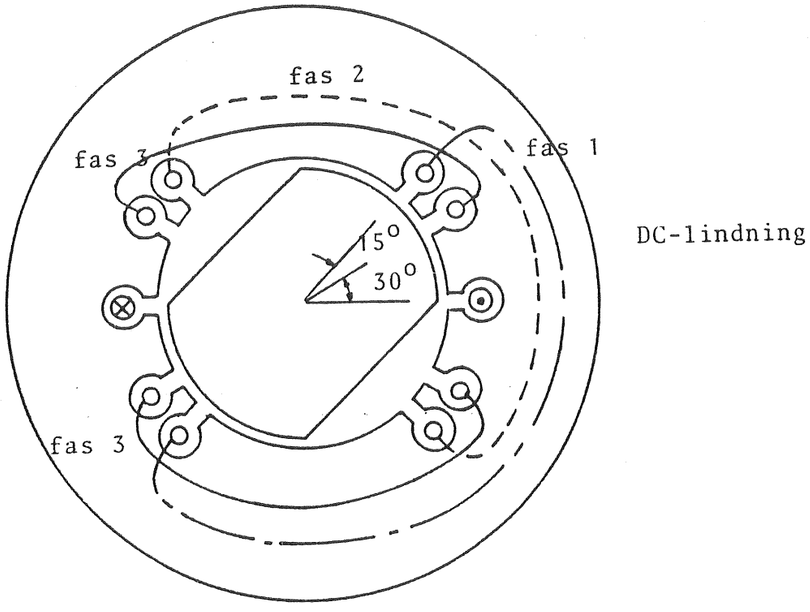
I de följande avsnitten presenteras olika varianter av nya, i huvudsak av rapportskrivaren framtagna reluktansgeneratorer. Ett gemensamt särdrag för alla dessa nya reluktansgeneratorer , till skillnad från de gamla induktorgeneratorerna, är att de genererar en spänning av kraftfrekvens (50 eller 60 Hz) trots det att varvtalet är relativt lågt.

Den trefasiga versionen, som är den mest attraktiva , kännetecknas av att lindningskonfigurationen är sådan, att spänningssystemet blir symmetriskt fastän de tre faslindningarna kan ha olika utseende. Genom optimeringsberäkning med dator har den beträffande materialmängd mest optimala lindningsfördelningen framtagits.

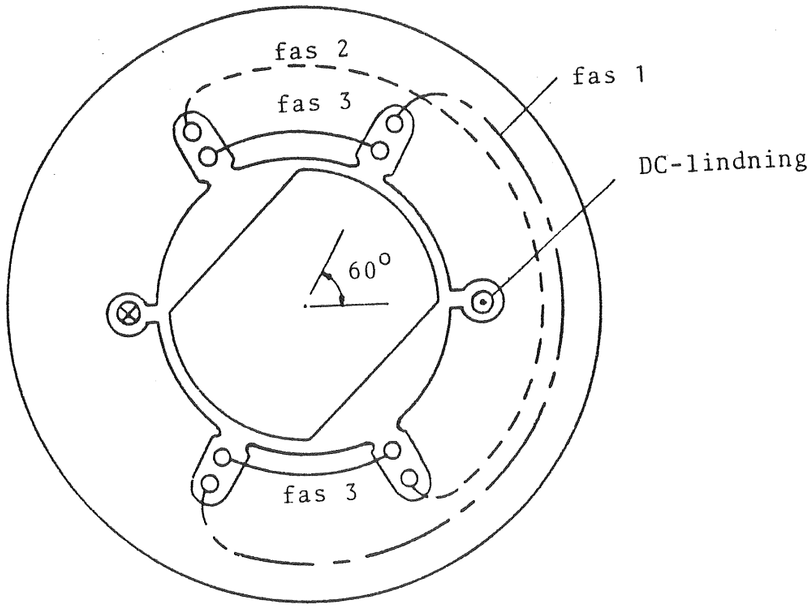
I rapporten behandlas i detalj olika konstruktiva utförandeformer i avsikt att belysa hur generatorn skall konstrueras för att den skall få minimala förluster och övertonshalt.
Beräkningarna omfattar bl.a.

- Bestämning av relationen mellan rotortandbåge och -lucka.
- Analys med beaktande av spåröppningarna.
- Analys med beaktande av rotortandsneddning.
- Analys av generator med fasad rotor.
- Utformning av luftgapet för erhållande av sinusformig emk kurva.
- Beräkning av ankarreaktionen
- Grundläggande dimensionering av en reluktansgenerator av ny typ.

I rapportens sammanfattning belyses fördelar och nackdelar med dessa nya reluktansgeneratorer.



Figur 5.2.72 Ny typ av optimerad reluktansgenerator, vars princip framställts av rapport författaren.



Figur 5.2.73 Förenklad version av ovan anförda generator, utförd med endast två spår per statorpol.

Den största nackdelen är att reluktansgeneratorer alltid kräver mera material än konventionella generatorer för samma effekt.
Fördelarna kan sammanfattas i följande punkter :

- Rotorn är helt lindningsfri, vilket gör maskinen synnerligen robust och stryktålig.
- Alla lindningar är förlagda i statorn och kan därigenom lätt plastinkapslas vilket ökar maskinens resistens mot salthaltig och fuktig luft.
- Generatorn kan termiskt överbelastas genom forcerad kylning av statorn. På grund härav kan generatorns märkeffekt väljas lägre än för en borstlös synkrongenerator.
- Fältkretsens responstid kan reduceras genom kraftig forcering av fältspänningen, vilket ökar reglersnabbheten.

Eftersom det finns vågenergiomvandlare av många olika typer och utföranden kan man inte generellt påstå att en viss typ av elgeneratorer är den bästa för alla omvandlare. Valet står emellertid mellan borstlösa synkrongeneratorer, burlindade asynkrongeneratorer och reluktansgeneratorer. I varje särskilt fall måste det slutliga valet ske genom att man väger för- och nackdelerna hos dessa typer mot varandra.

Linjära generatorn

Arbetet med den linjära generatorn (LG) har under etappen 78-81 dominerats av att framtaga ett dimensioneringsprogram, redovisat i GR:22 (80). När detta var klart skulle en utvärdering av LG ske. Men då ingen tillförlitlig metod för att bestämma energiupptagningen för en boj fanns, kunde ej heller en riktigt dimensionerad generator tas fram. Ej heller kunde meningsfulla jämförelser med andra kraftomvandlare till bojarna göras. För att möjliggöra en mer korrekt bedömning prioriterades därför arbetet med en energiberäkning. Under tiden arbetet med denna pågick utfördes dock några arbetsuppgifter med LG.

Den viktigaste av dessa var att bygga en liten modell av LG, för att kontrollera beräkningar och öka kunskapen om dess egenskaper. Detta visade sig dock bli för dyrt. Verktygskostnaden blir orimlig när bara ett exemplar skall byggas.

Därför avbröts arbetet med att ta fram ett konstruktionsunderlag. Det utförda arbetet redovisas här i 5 avsnitt.

1. Data för 50 W LG
2. Lindningsritning
3. Plåtprofiler med mått
4. Lagringsförslag
5. Hållfasthetsberäkning

Utöver arbetet med 50 W generatorn har tid nedlagts på en undersökning av alternativa konfigurationer för generatorn. Detta redovisas i en tabell där en 2 sidig, 4 sidig respektive rund generator jämförs.

Vidare har även energiberäkningsarbetet gett resultat som påverkar LG vid en dimensionering efter vågdata. För detta redogörs något noggrannare i det sista avsnittet om LG.

Data för 50 W LG.

Med ledning av erfarenheter från försök med bojar i Lygnern, valdes en generator på 50W (ineffekt, P_{in}) och en dämpkonstant (b_1) om 1000 Nm/s vid denna effekt. Dimensioneringsprogrammet modifierades så att denna specifikation kunde uppfyllas (tomgångsspänning fick uttryckas som funktion av hastigheten (v) istället för svängningsamplitud och frekvens, där $v=\sqrt{\frac{P_{in}}{b_1}}$). Efter ett flertal körningar valdes slutligen en generator med följande data:**

Ineffekt:	50,0 W	
Uteffekt:	27,3 W	
Magnetiseringseffekt:	213,3 W	
Tomgångsspänning:	44,4 V	(likriktad spänning)
Märkspänning	22,2 V	(likriktad spänning)
Märkström:	1,23A	(likström)
Magnetiseringsström:	2,99A	(likström)
Totalvikt:	38,2 kg	
Järnvikt:	25,4 kg	
Kopparvikt:	12,9 kg	
Statorns höjd:	0,47m	
Rotorns höjd:	0,87m	
Rotorns vikt:	20,9 kg	
Statorns vikt:	17,4 kg	

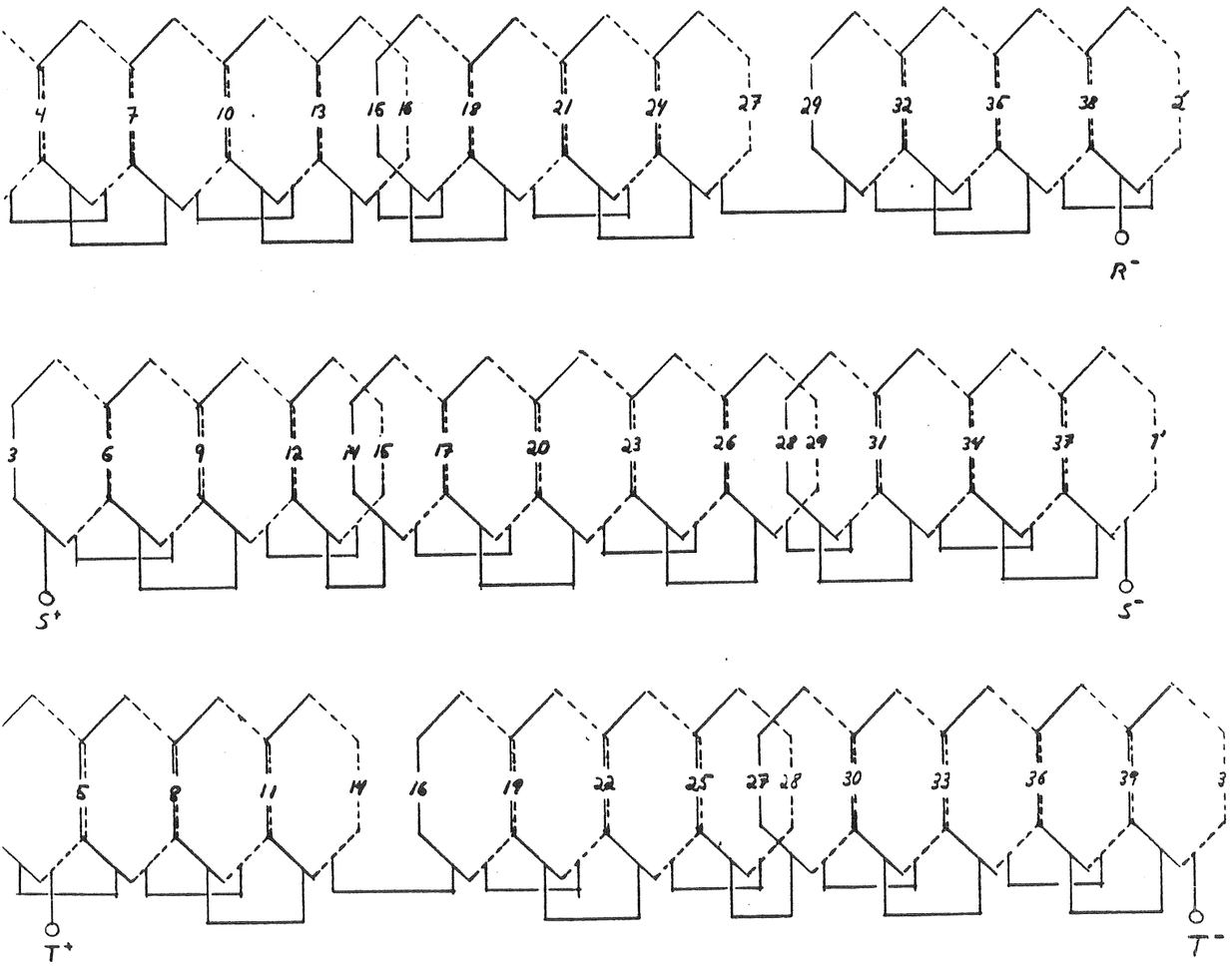
Som framgår av ovanstående data ger en så här liten linjär generator inget nettoenergiutbyte. Magnetiseringseffekten är ca 8 gånger så stor som uteffekten.

Lindningsritning.

För LG-modellen valdes att göra en delspårs-övergångslindning. Jämfört med lindningen i beräkningsexemplet i GR:22 ger denna lindning lägre övertonshalt. Lindningen karaktäriseras av följande parametrar

Antalet polpar	: p = 7 per statorhalva
Antalet spår	: Q = 39 " "
Antalet faser	: m = 3 " "
Härvsteget	: w = 3 " "
Antalet spår per pol och fas	: $q = \frac{13}{14}$

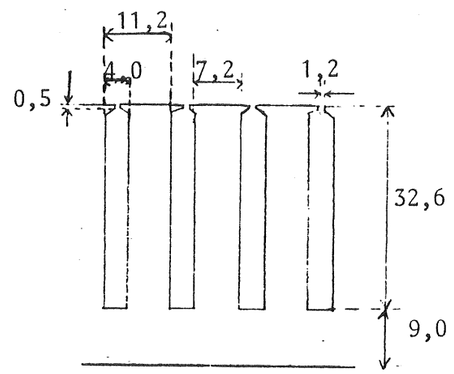
I figur 5.2.74 visas hur lindningsritningen ser ut. Varje siffra betecknar ett spår. Varje spår innehåller två härvor. Ett heldraget streck betyder att härvsidan ligger överst i spåret och ett streckat att den ligger underst. Faserna betecknas med R, S och T. Eftersom ändhärvorna ej kan förläggas till båda ändarna har tre extra spår tillagts.



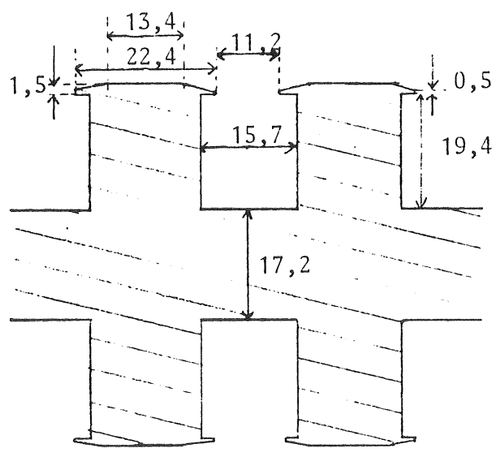
Figur 5.2.74 Lindning av linjär generator Q= 39+3, p=7, m=3.

Plåtprofiler

Figur 5.2.75 visar ett utsnitt ur statorns plåtprofil. Figur 5.2.76 visar ett utsnitt ur rotorns plåtprofil.



Figur 5.2.75 Statorns plåtprofil skala 1:1. Alla mått i mm.

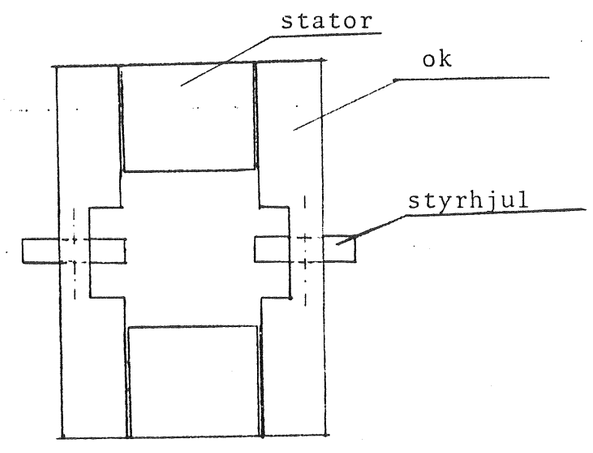


Figur 5.2.76 Rotorns plåtprofil skala 1:1. Alla mått i mm.

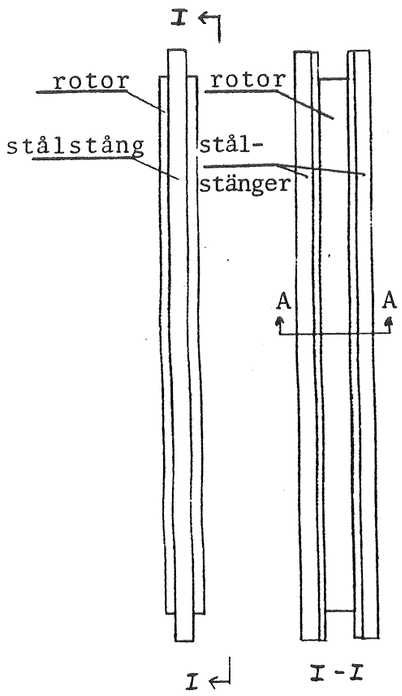
Lagringsförslag

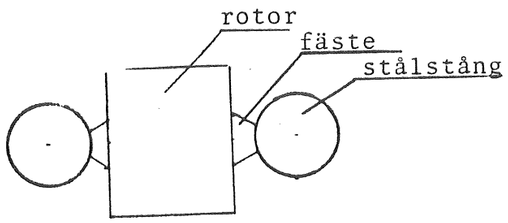
När arbetet avbröts med konstruktionen fanns två förslag till lagring av LG. Det ena med kulbussningar har tagits fram efter kontakter med SKF. Det andra förslaget är att använda glidlager.

Det senare förslaget presenteras bara med en figur av oket (se figur 5.2.77). Detta har till uppgift att fixera statorhalvorna i förhållande till varandra och styra rotorn med styrhjulen så att den ej glider ur åt sidan, mellan statorhalvorna. Rotorn har släta ytor som styrhjulen löper mot. Statorns luftgapsytor är plastbelagda så att rotorns polskor av homogent stål kan glida mot dessa. Glidlagerversionen av LG blir i övrigt lika med kulbussningsversionen. Denna presenteras i figur 5.2.78.



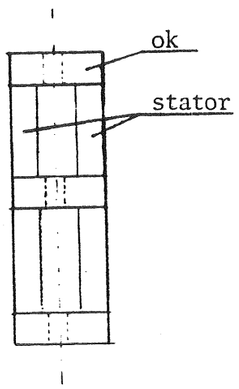
Figur 5.2.77 Ok med styrhjul skala 1:2,5.

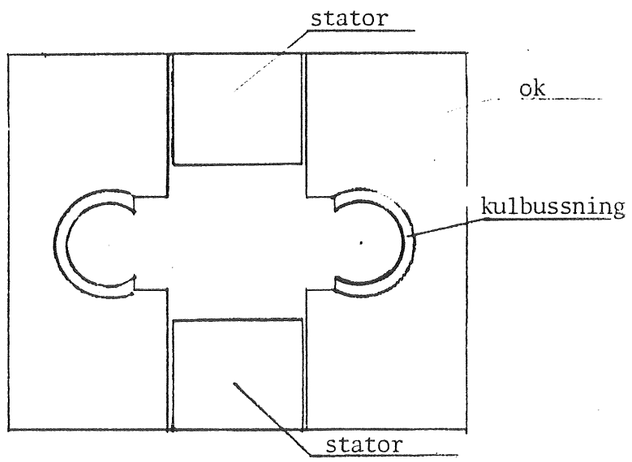




snitt A-A skala 1:2,5

Rotorstav skala 1:10





Stator skala 1:10

Ok med kulbussningar skala 1:2,5

Figur 5.2.78 Lagring av linjär generator med kulbussning.

Hållfasthet

För att bedöma de mekaniska påkänningarna tas hänsyn till två krafter. Dels en magnetisk kraft (F_m) som beror av den magnetiska energins (W_m) variationer med luftgapet, dels en kraft (F_{b1}) som beror av strömmen i ledarna och magnetiska flödestätheten (B) i luftgapet.

F_{b1} är den kraft som dämpar generatorns rörelse. Den kan då också uttryckas som $F_{b1}=b_1 \cdot v$, där b_1 är en dämpkonstant och v generatorns hastighet. Dämpkraften kan då också relateras till ineffekten P_{in} enligt $P_{in}=F_{b1} \cdot v$ $(=b_1 \cdot v^2)$. Denna kraft antages verka som en knäckkraft på rotorns ändytor. (I verkligheten ligger kraften utbredd längs med luftgapet vilket ger en lägre knäckrisk än i det antagna fallet).

F_m verkar som en attraktionskraft mellan stator och rotor och får därmed tas upp av generatorns lager. I det följande kallas den för lagerkraft (F_L).

F_{b1} kommer att ge en böjmomentvektor som blir parallell med plåttvärsnittens längsled. F_{b1} får ej överstiga rotorns knäckkraft F_k.

Bestämning av F_L

För att bedöma påfrestningarna på generatorns lager har följande formel för lagerkraften F_L framtagits

$$F_L = F_\delta^- - F_\delta^+ = Ha \cdot R_1 \cdot \frac{(N \cdot i)^2}{4} \cdot \mu_0 \left(\frac{1}{(\delta_0-\Delta\delta)^2} - \frac{1}{(\delta_0+\Delta\delta)^2}\right) \quad (1)$$

F_δ^- kraften mellan rotorn och den statorhalva mellan vilka avståndet minskar $\Delta\delta$ meter

F_δ^+ kraften mellan rotorn och den statorhalva mellan vilka avstånden ökar $\Delta\delta$ meter

Ha statorns höjd

R_1 generatorns rygglängd

μ_0 permeabiliteten i vacuum (luft)

$N \cdot i$ är den magnetomotoriska kraft som driver huvudflödet i generatorn

δ luftgapet

Tillämpat på 50 W generatorn erhålls en kraft F_L = 3,5 kN för en avvikelse om 20% av luftgapet. Denna kraft kan av tidigare nämnda skäl ses som en övre gräns för kraften. Varken för glidlager (trycket på glidytan blir < 14N/cm^2) eller kulbussningar kan detta vara något problem.

Bestämning av F_k

Ur Karlebo handbok (1977) erhålles för en stav med båda ändar fria men styrda i axelriktningen

$$F_k = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I}{L^2} \qquad (1)$$

E elasticitetsmodul
I yttröghetsmoment
L stavens längd

$$E = 200 \text{ GN/m}^2 \quad \text{(stål)}$$
$$I = \frac{n \cdot h \cdot b^3}{12} \quad \text{(rektangulärt tvärsnitt)}$$

b profilens bredd (plåttjockleken)
h profilens längd (längsta sida)
n antal plåtar i paketet

För 50 W generatorn gäller

b = 1,5 mm
h = 16,6 mm
n = 30
L = 0,874 m

Insatt i ekvation (1) ovan erhålles

$$F_k = 362 \text{ N}$$

En uppskattning av den kraft som maximalt belastar rotorstaven är att

$$F_{bi} < 1000 \text{ N}$$

Rotorn måste alltså göras styvare eller knäcklängden kortare. Eftersom plåtpaketet måste hållas samman av bultar kan knäck-

längden antagas reducerad till avståndet mellan bultarna. Om detta är 1 dm (L = 0,1 m) erhålles

Om förslaget med kulbussningar tillämpas kan även stålstängerna ta upp dämpkraften.

För dessa är yttröghetsmomentet vid cirkulärt tvärsnitt:

$$I = \frac{\pi d^4}{64}$$

där d = diameter

Antag d = 0,03 m. Ekv 1 och 2 ger då knäckkraften

$$F_k = 0,1 \text{ MN per stång}$$

Om plåtpaketet är så styvt inhopsatt att det kan betraktas som homogent erhålls

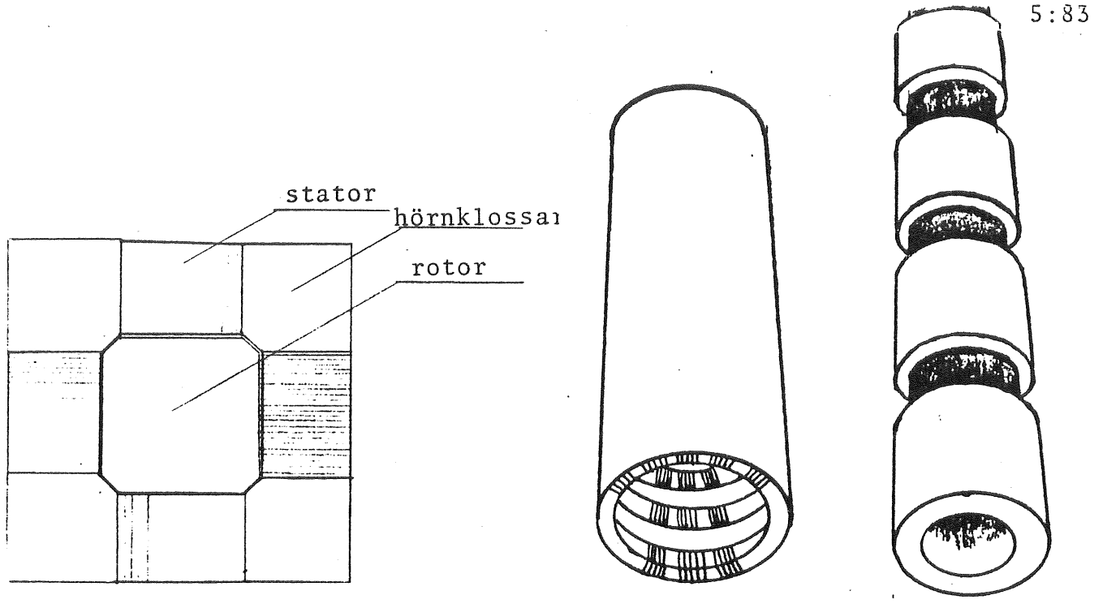
$$F_k = 49,3 \text{ kN}$$

Slutsatsen blir att för båda lagringsmetoderna är säkerheten mot knäckning av rotorstaven tillräcklig.

Alternativa generatorkonstruktioner

Den tvåsidiga LG har två fria sidor vilka ej utnyttjas. För att utröna huruvida en fyrsidig respektive rund generator bättre utnyttjar ingående material har en av vardera typen beräknats.

Utformningen framgår av figur 5.2.79.



Fyrsidig generator

Rund generator

Figur 5.2.79 Alternativa generatorkonstruktioner.

GR 22:s ekvationer har modifierats för dessa två fall och resultat enligt nedanstående tabell har erhållits. Inga säkra slutsatser kan dras av dessa preliminära räkningar, men resultatet antyder att den 4-sidiga och den runda inte är oomtvistligt mycket bättre än den 2-sidiga för dessa små effekter. Vad som talar emot dem är att rotorn kommer att kräva en stor MMK för att kunna ge acceptabel flödestäthet i luftgapet eftersom luftgapsytan är mycket större för dessa i förhållande till rotorryggsarean, jämfört med en tvåsidig. Flödestätheten kommer därför att bli mycket hög i rotorryggen.

Ytterligare ett skäl emot alternativen är att de blir dyrare per kilo att tillverka. Vad som talar för dem är att magnetiseringsbehovets relativa betydelse minskar med generatorns effekt, varför deras effektivare utnyttjande av magnetiseringen borde medföra att 4-sidiga och runda blir mindre materialkrävande än den tvåsidiga, vid större generatoreffekter.

	2-sidig	4-sidig	Rund
1 Ineffekt	50,0 W	53,8 W	49,9
2 Uteffekt	27,3 W	28,7 W	25,6
3 Magnetiserings effekt	213,3 W	246,7 W	167 W
4 Vikt	38,2 kg	22,5 kg	44,5 kg
5 Järn	25,4 kg	10,7 kg	35 kg
6 Koppar	12,9 kg	11,7 kg	9,5 kg

Dimensionering av linjära generatorn

Vid dimensionering av LG bör hänsyn tas till att generatorns termiska belastning bestäms av den medeleffekt som genereras under tidsperioder som är av samma storlek som generatorns termiska tidskonstant.

Energiberäkning enligt den statistiska metoden med linjär approximation av dämpningens olinjaritet (se kapitel 5.7) visar att medeleffekten är ca 50% av den maximala effekt (klippeffekten) generatorn tillåts generera, så fort tidsperioder längre än vågperiodtiden betraktas. Dessa är betydligt kortare än den termiska tidskonstanten för en generator. Tidigare har klippeffekten antagits vara så ofta uppträdande att den fått vara termiskt dimensionerande för generatorn. Med hänsyn till energiberäkningsresultat, kan klippeffekten alltså höjas betydligt, utan risk för termisk överbelastning. Det kan även finnas skäl att ifrågasätta om någon maximering av generatorns effekt alls behövs.

Ytterligare ett resultat av de senaste energiberäkningarna är att magnetiseringsbehovet utgör uppemot 50% av bruttoenergiproduktionen för en LG varför de idéer som finns om att reducera magnetiseringsbehovet bör utvärderas.

5.3 Elektriska system

5.3.1 Frekvensomriktarsystem

En översikt över sådana frekvensriktarsystem, som är lämpliga för överföing till ett kraftnät av effekt utvecklad av vågenergiomvandlare ges i det följande.

Avsnittet bygger på en rapport , Thorborg (1980), presenterad vid "First Symposium on Wave Energy Utilization" i Göteborg 1979.

Undersökningen förutsätter att vågenergin i ett antal omvandlare omvandlas till elektrisk energi, som likriktas i diodbryggor. Ett antal sådana enheter seriekopplas, varvid utspänningen blir en likspänning överlagrad med ett spektrum av växelspänningskomponenter.

Av stor betydelse för uppskattning av den till nätet överförda vågenergins ekonomiska värde är kvaliteten på den frekvensomriktade effekten. Vid bedömning av denna kvalitet måste följande synpunkter beaktas:

(1) Den reaktiva effektförbrukningen
(2) Övertonshalten i växelspänningen
(3) Modulation av den aktiva och reaktiva effekten
(4) Variation av den avgivna effekten

Reaktiva effekten

I rapporten påvisas först, att den reaktiva effektförbrukningen brant stiger, när likspänningens medelvärde sjunker, dvs då den av vågorna utvecklade energin avtar. För att reducera den reaktiva effektförbrukningen kan man vidtaga följande åtgärder:

a. Faskompensation med kondensatorer.

   Man kan till stor del eliminera reaktiva effektförbrukningen med ett oreglerat kondensatorbatteri, men den stora cirkulerande strömmen gör denna lösning mindre attraktiv.

b. Användning av en transformator med lindningskopplare.

   Genom inkoppling av en sparkopplad transformator med lindningskopplare mellan frekvensomriktaren och huvudtransformatorn kan tändvinkeln för tyristorerna hållas vid ett

minimalt värde, vilket innebär att den reaktiva effektförbrukningen kan minimeras.

För att reducera underhållskostnaderna bör man i stället för en mekanisk lindningskopplare använda ett elektroniskt switchorgan, vilket dock är relativt dyrbart.

c. Serie/parallell switchning av likspänningen.

I stället för att variera transformatorns primärspänning kan man tänka sig att medelst ett elektroniskt switchdon serie- och parallellkoppla likspänningen från de inkommande kablarna. Om man exempelvis har 4 inkommande kablar, kan man med en tyristorkopplare åstadkomma ett antal kombinationer av serie- och parallellkopplingar. Detta medför, att den till frekvensomriktaren inmatade likspänningen kan varieras inom rätt snäva gränser, vilket i sin tur resulterar i en avsevärd reducering av förbrukad reaktiv effekt.

d. Användning av självstyrd frekvensomriktare.

Reaktiva effektförbrukningen kan även reduceras, om man stabiliserar likspänningen genom att mellan den inkommande likspänningen och den nätstyrda frekvensomriktaren inkoppla en tyristorbaserad spänningsstabilisator jämte induktans och kapacitans, varvid stabilisatorn arbetar enligt on/off principen.

En vidareutveckling av detta system består i att ersätta den nätkommuterade frekvensomvandlaren jämte stabilisatorn med en självstyrd frekvensomvandlare. Den reaktiva effekten alstras härvid av en kondensator på likspänningssidan.

Övertonshalten i växelspänningen

Utspänningen från en självstyrd frekvensomriktare är en kvasikantvåg, som innehåller övertoner med amplituden 1/n (p.u.). Undersökningen i rapporten visar, att övertonerna av högre ordningstal reduceras på nätsidan av transformatorn, medan de lägre övertonerna dominerar. I en nätstyrd frekvensomriktare är strömmen i det närmaste en kvasikantvåg. Denna omriktartyp är i det närmaste en generator för övertonsströmmar, vars amplitud är γ_n/n (p.u.), där γ_n är en reduktionsfaktor mindre än 1, vilken beror av d.c. ripplet, styrvinkeln och induktansen på a.c. sidan.

Även i detta fall dominerar de lägre övertonerna på nätsidan av transformatorn.

För olika spänningsnivåer följer man i Sverige rekommendationer beträffande övertonshalten.

Rapporten anger hur övertonshalten i ett konkret fall beräknas.

Undertryckning av övertoner kan ske med tillhjälp av:

a. 12-pulskoppling
b. multipel puls teknik
c. filter

En tolvpulskoppling eliminerar praktiskt taget 5:e och 7:e övertonen, vilket avsevärt reducerar övertonshalten i spänningen. Ännu renare spänning erhålls, om man ökar pulstalet, men detta är en komplicerad och dyrbar lösning.

En annan möjlighet att reducera övertonshalten i en självstyrd omriktare är att införa extra kommuteringshack i rektangelvågen, varvid det är lätt att eliminera exempelvis 11:te och 13:e övertonerna.

Övertonsströmmar kan även undertryckas med hjälp av shuntfilter, som består av ett antal parallellkopplade LC-kretsar, en krets för varje överton man önskar eliminera. Principen är att shuntarna utgör kortslutningskretsar för övertonerna.

Modulation av aktiva och reaktiva effekten

Den inkommande likströmseffekten är inte konstant utan modulerad med en lågfrekvent växelkomponent, där modulationsfrekvensen ligger mellan en bråkdel av en Hz och några få Hz. Om inga åtgärder vidtas för att reducera a.c. komponenten, kommer den i en nätstyrd omriktare att överföras till växelströmssidan i form av en modulation av såväl den aktiva som den reaktiva effekten.

Den reaktiva effektmodulationen resulterar i en spänningsmodulation som kan ge upphov till ett ljusflimmer, för vilket ögat är mycket känsligt.

Om den aktiva effektmodulationens frekvens ligger i närheten av resonansfrekvensen hos nätets roterande maskiner kan instabil drift bli följden.

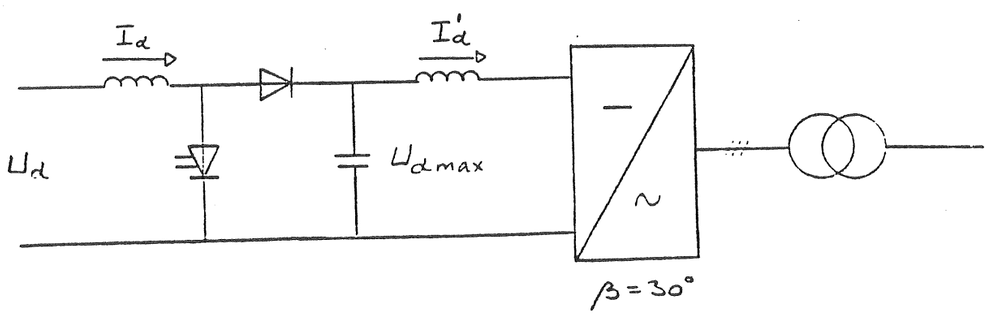
Modulationen kan undertryckas antingen genom att använda en d.c. tyristorstabilisator för stabilisering av likspänningen eller genom att styra den aktiva effekten med en nätstyrd frekvensomriktare och den reaktiva effekten med ett variabelt filter.

Variation av den avgivna effekten

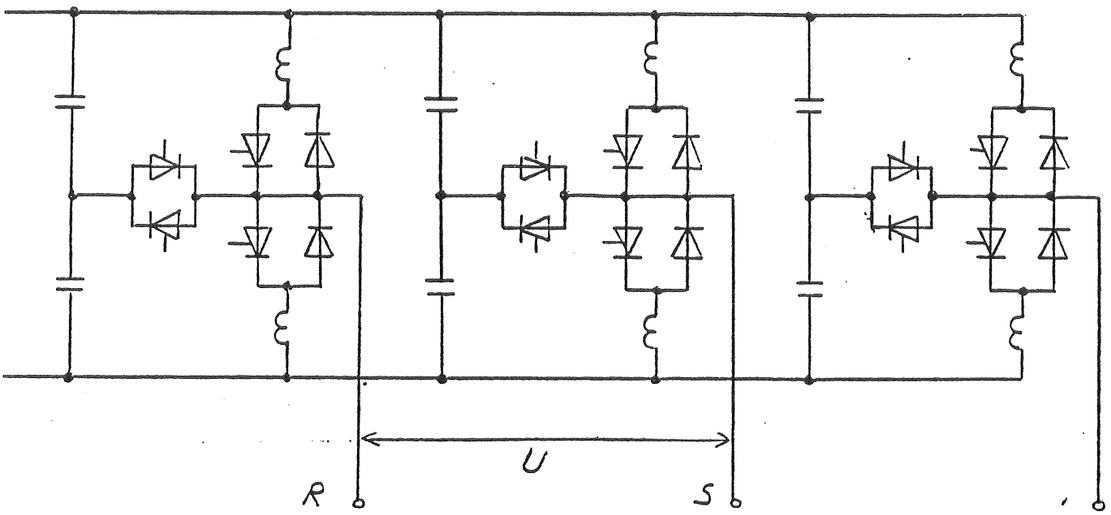
Effekten från vågenergiomvandlare varierar under dagen och under året. Så förhåller det sig även med den från nätet uttagna effekten. Effekttopparna sammanfaller i allmänhet inte.

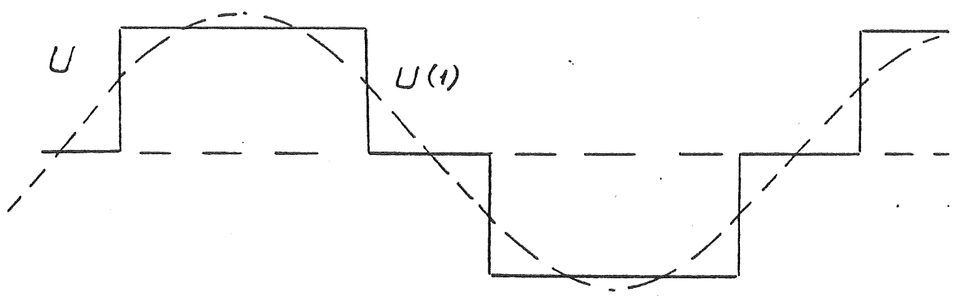
Effekten från vågenergiomvandlare måste därför samarbeta med andra effektkällor försedda med effektregulatorer, såsom vattenkraftstationer, så att tillräcklig redundans i fråga om effektproduktion uppnås.

Så länge vågeffekten utgör en liten del av den totala effekten uppstår inga svårigheter. Det är i allmänhet tillräckligt att systemet innehåller tillräckligt stora vattenmagasin för utjämning av variationerna i effektproduktion och konsumtion.

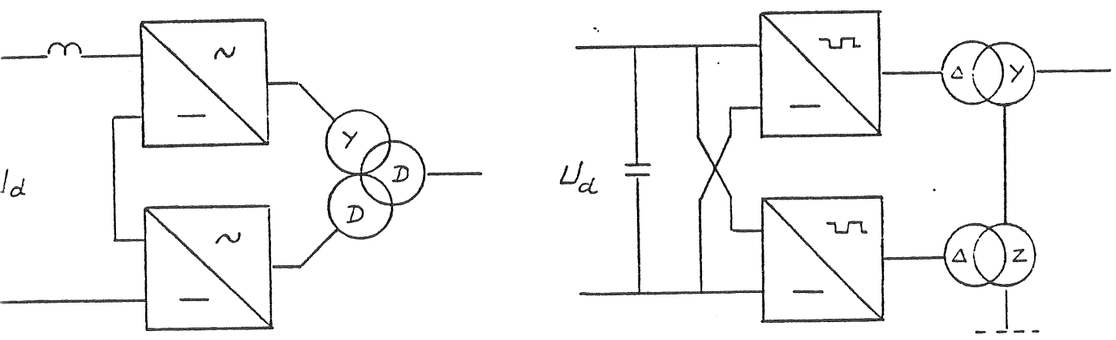


Figur 5.3.1 Princip för spänningsstabilisering i en DC/AC omriktare.





Figur 5.3.2 Självstyrd inverter samt spänningen fas-till-fas och dess grundton.



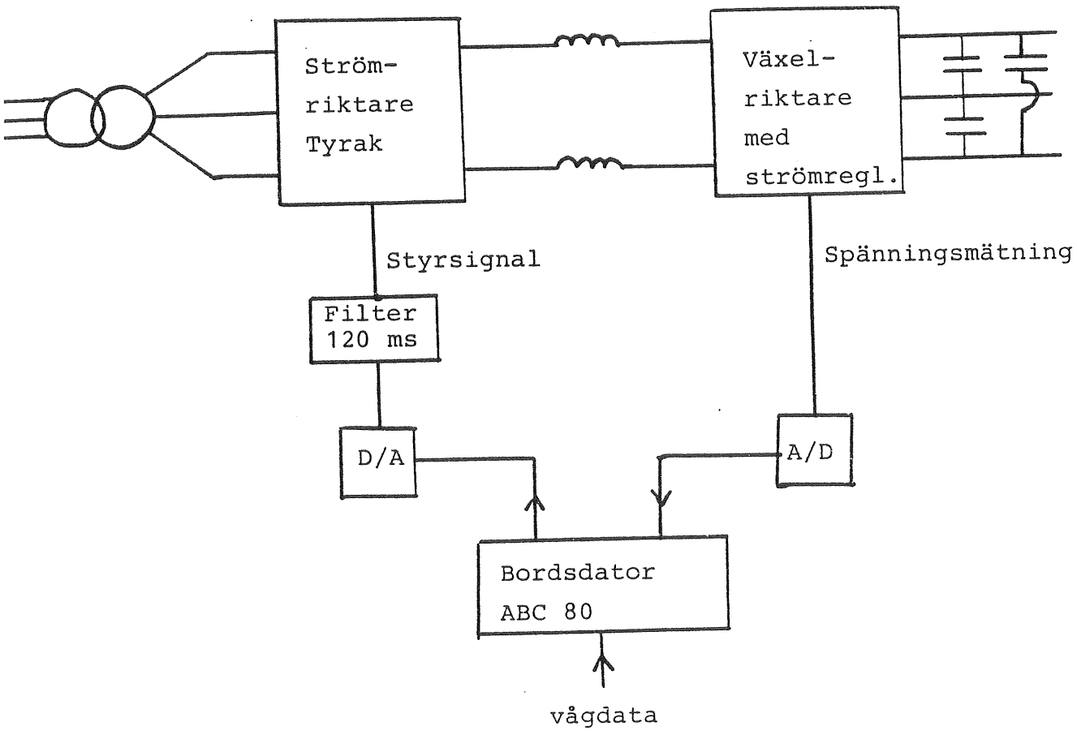
Figur 5.3.3 Nätstyrda omriktare i 12-puls seriekoppling och självstyrda omriktare i 12-puls parallellkoppling.

5.3.2 Exempel på system för simulering av vågkraftverk map elektriska systemet.

Studien är utförd som ett examensarbete 1980 av Lars Andréasson, Bengt-Olov Sjöström, elektromaskinlära CTH.

Sammanfattning

Systemet består av tre huvudbitar - en bordsdator och två strömriktare. Bordsdatorn används för mätning, sammanlagring och bearbetning av vågdata samt för styrning av den ena strömriktaren. Utspänningen från strömriktaren motsvarar den likspänning som fås från vågkraftverket. Den andra strömriktaren används för att likrikta spänningen så att den åter kan matas till nätet. Denna strömriktare är försedd med en strömregulator som håller strömmen konstant. För att mäta nätspänningsvariationer på nät med olika kortslutningseffekter kopplas induktanser in mellan växelriktaren och nätet. Med detta system kan vågkraftverk med godtyckligt utseende simuleras. Det som krävs är mätdata på spänningen från en boj.



Figur 5.3.4 Blockschema över simuleringssystemet.

Som ett exempel har ett 3MW vågkraftverk simulerats. Kraftverket består av 60 bojar. 4 stycken parallella länkar med 15 bojar i varje, se figur 5.3.5.

Data till sammanlagringen (figur 5.3.6) har tagits från en försöksboj placerad i Lygnern. Dessa data har skalats om med Froudes modellag så de motsvarar värden från en fullskaleboj. Som utgångspunkt vid skalningen har vågperiodtiden T_z använts. I Lygnern hade vågorna en periodtid på 1,67 s och i havet skulle detta motsvara ca 4,25S, detta ger en skalfaktor α=6,5.

Vågorna i havet får då värdena:

signifikant våghöjd H_s = 1,0 m

medelperiodtid T_z = 4,253

Bojarna får följande dimensioner:

diameter d = 4,9 m

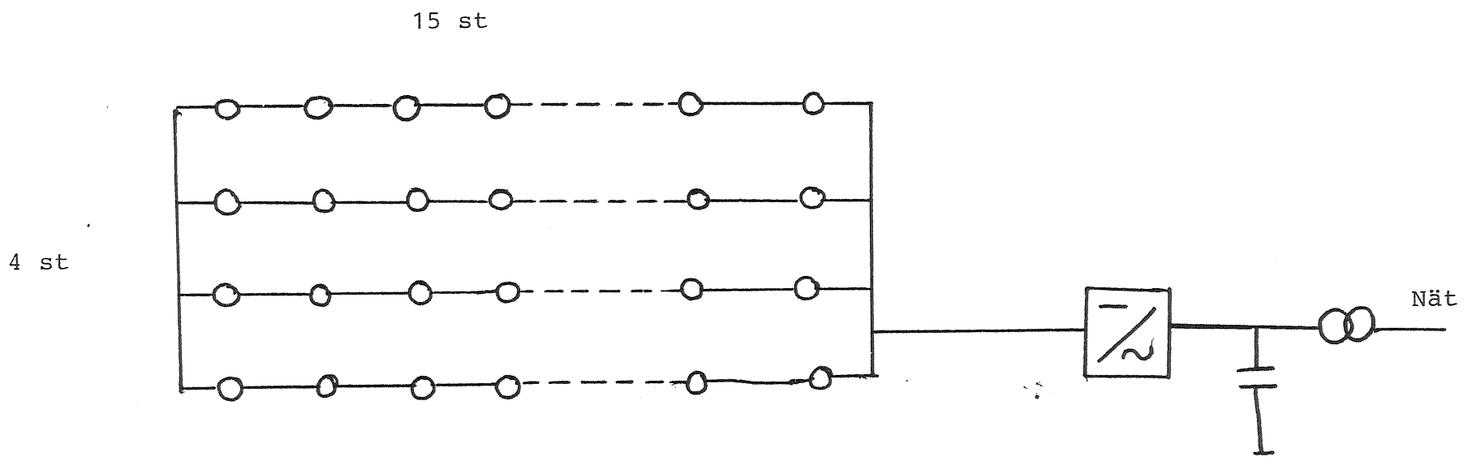
massa M = 27500 kg

medeleffekt P = 9,1 kW

På grund av effektens sannolikhetsfördelning bör man välja generatorns maximaleffekt flera gånger större än medeleffekten. Således bör maxeffekten väljas till.

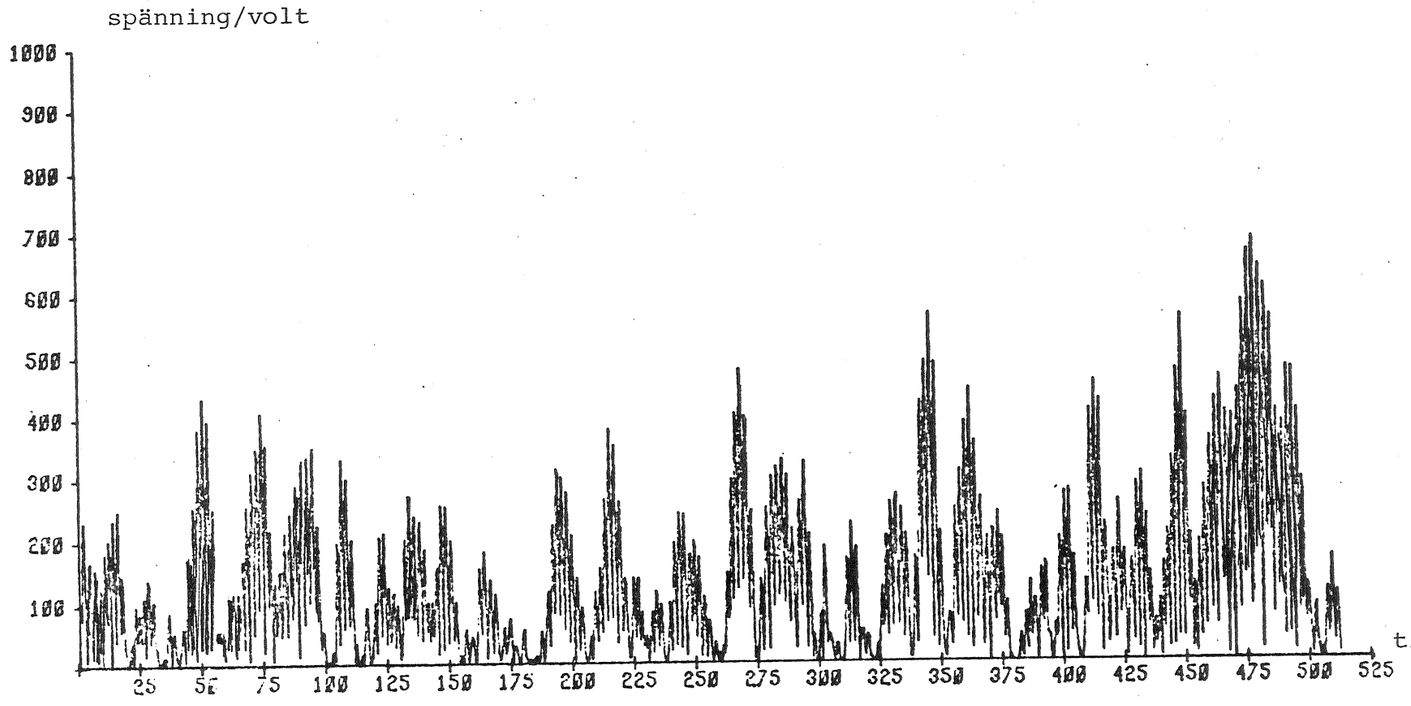
P = 50 kW

Bojarna är inte optimerade med hänsyn till kostnader eller producerad årsenergi.



Data:	Enskild Boj	Hela Systemet
	50 kW	3 MW
	500 V	7,5 kV
	100 A	400 A

Figur 5.3.5 Principiell uppbyggnad av vågkraftverket.



Figur 5.3.6 Spänningen från en boj.

Sammanlagringen har gjorts på tre olika sätt.

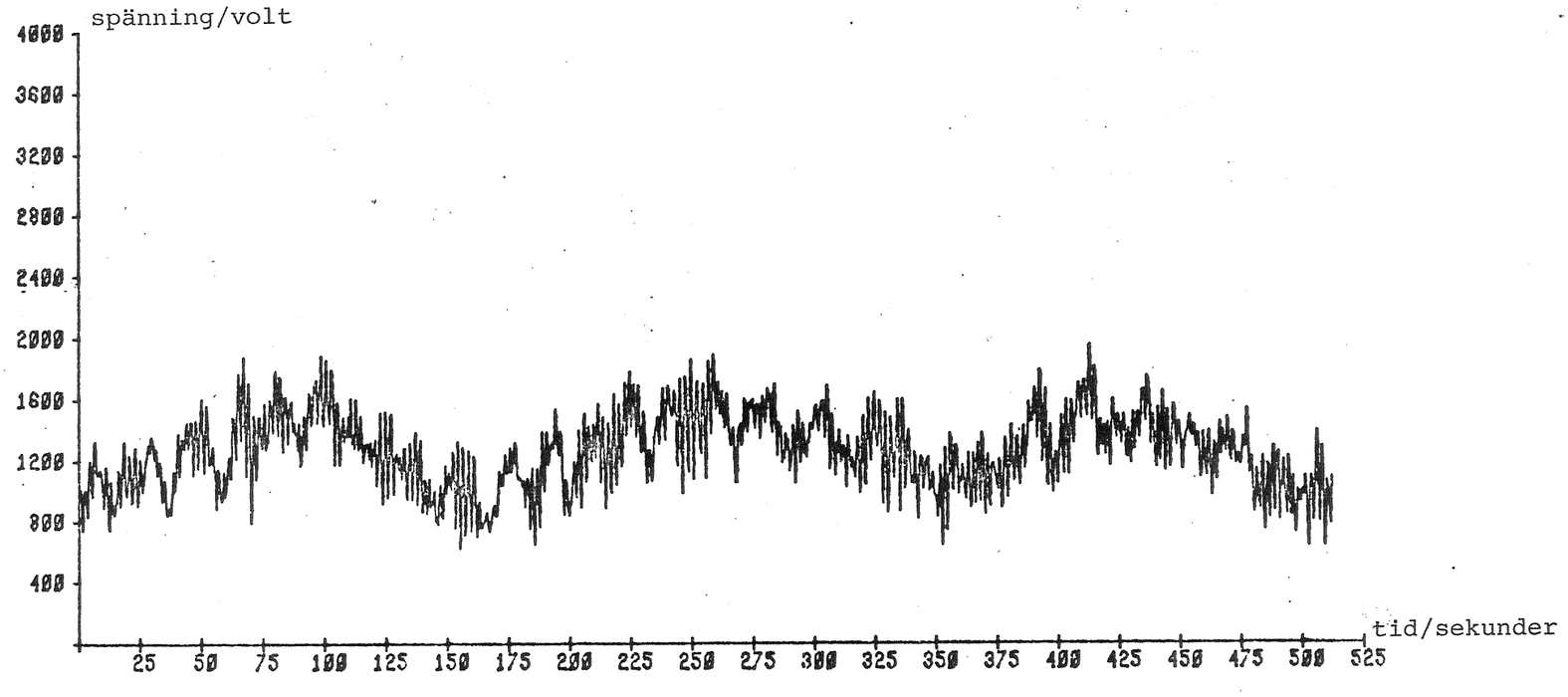
1. Slumpmässig sammanlagring med likadana parallellänkar, figur 5.3.7

2. Slumpmässig sammanlagring med olika parallellänkar, figur 5.3.8

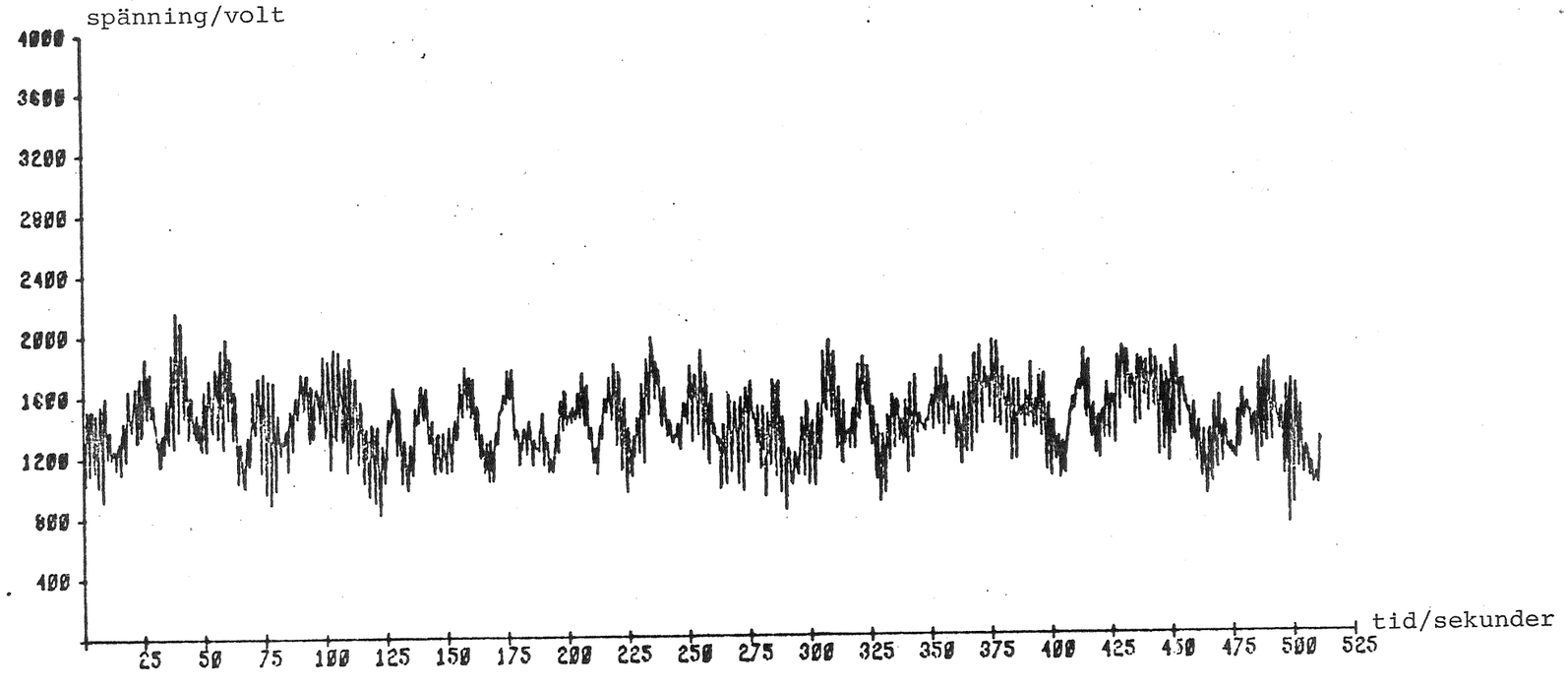
3. Sammanlagring med konstant stegförskjutning, figur 5.3.9

Det visade sig att sammanlagring med konstant stegförskjutning gav en spänningskurvform med stor periodicitet som måste bedömas som orealistisk. En viss periodicitet kunde även upptäckas i de slumpmässigt sammanlagrade vågdata. Denna periodicitet var mera utpräglad i fallet med likadana serielänkar.

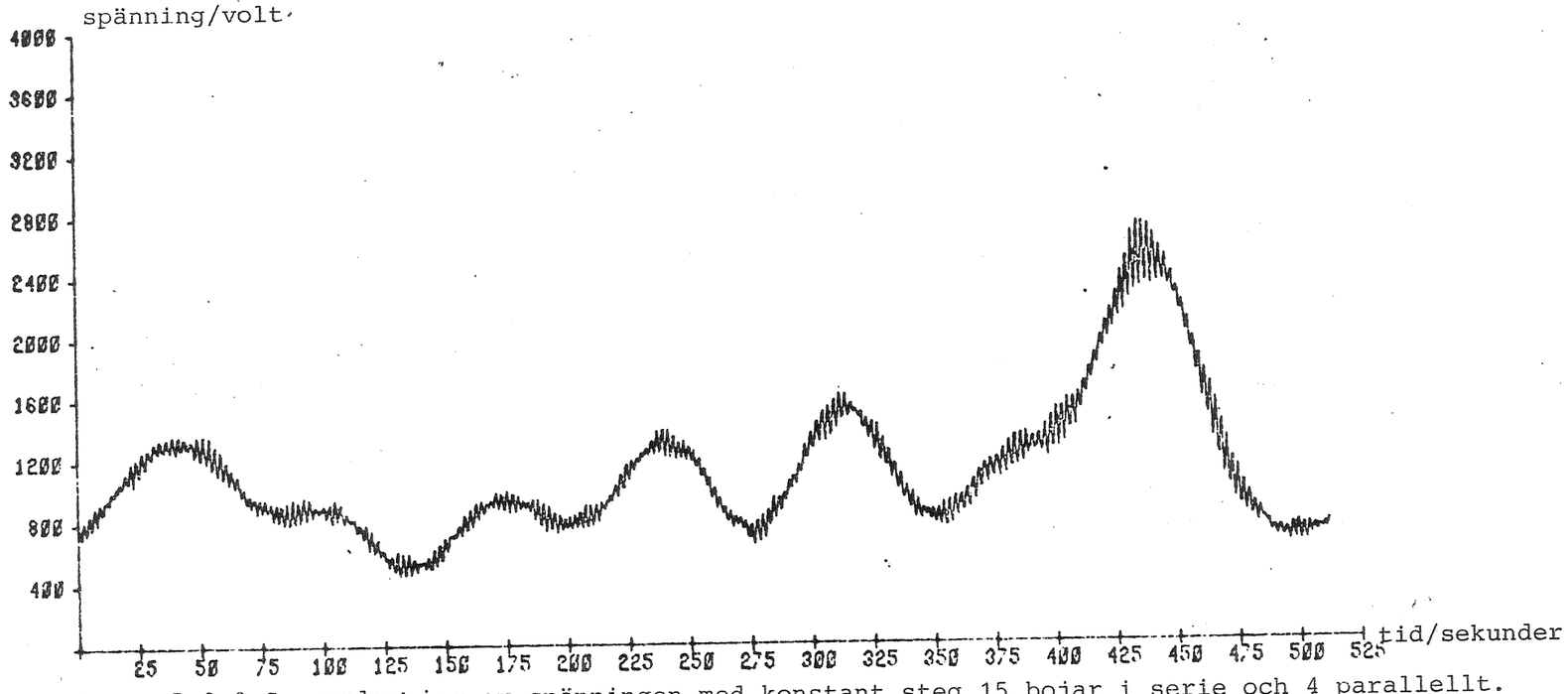
Undersökning av variansen för vågdata visade också att sammanlagring med konstant stegförskjutning var dålig. Om man har en normalfördelad funktion - våghöjd och vågperiod kan anses normalfördelade - skall efter sammanlagring variansen ha ökat med $\sqrt{n}$ där n är antalet sammanlagringar. Vid slumpmässig sammanlagring fås en rimlig ökning av variansen, se tabell 5.3.1.



Figur 5.3.7 Spänningen efter slumpmässig sammanlagring av 60 bojar.



Figur 5.3.8 Spänningen efter slumpmässig sammanlagring av 60 bojar.



Figur 5.3.9 Sammanlagring av spänningen med konstant steg 15 bojar i serie och 4 parallellt.

Tabell 5.3.1 Ökning av medelvärde och varians vid olika sammanlagringar.

$M_{SAM} = n \cdot M$ $V_{SAM} = \sqrt{n} \cdot V$

$n = 15$ $\sqrt{n} = 3,87$

	Medelvärdes-ökning	Varians-ökning
Slumpmässig sammanlagring likadana parallellänkar	15	3,76
Slumpmässig sammanlagring olika parallellänkar	15	3,30
Sammanlagring med konstant stegförskjutning	15	38,9

De sammanlagrade vågdata används för att med hjälp av en bordsdator och en D/A-omvandlare styra en strömriktare. Likspänningen från strömriktaren motsvarar den spänning som fås från det tänkta vågkraftverket. Strömriktaren är via två induktanser hopkopplad med en annan strömriktare, som används till att växelrikta spänningen. Denna strömriktare är försedd med en strömregulator som i detta fall håller likströmmen konstant. Det finns även möjlighet att styra så att den aktiva effekten maximeras. Mellan strömriktaren och nätet kopplas induktanser in för att simulera olika nät. Spänningsvariationerna mäts mha en A/D-omvandlare och bordsdatorn, mätningarna sker i samma program som styrningen.

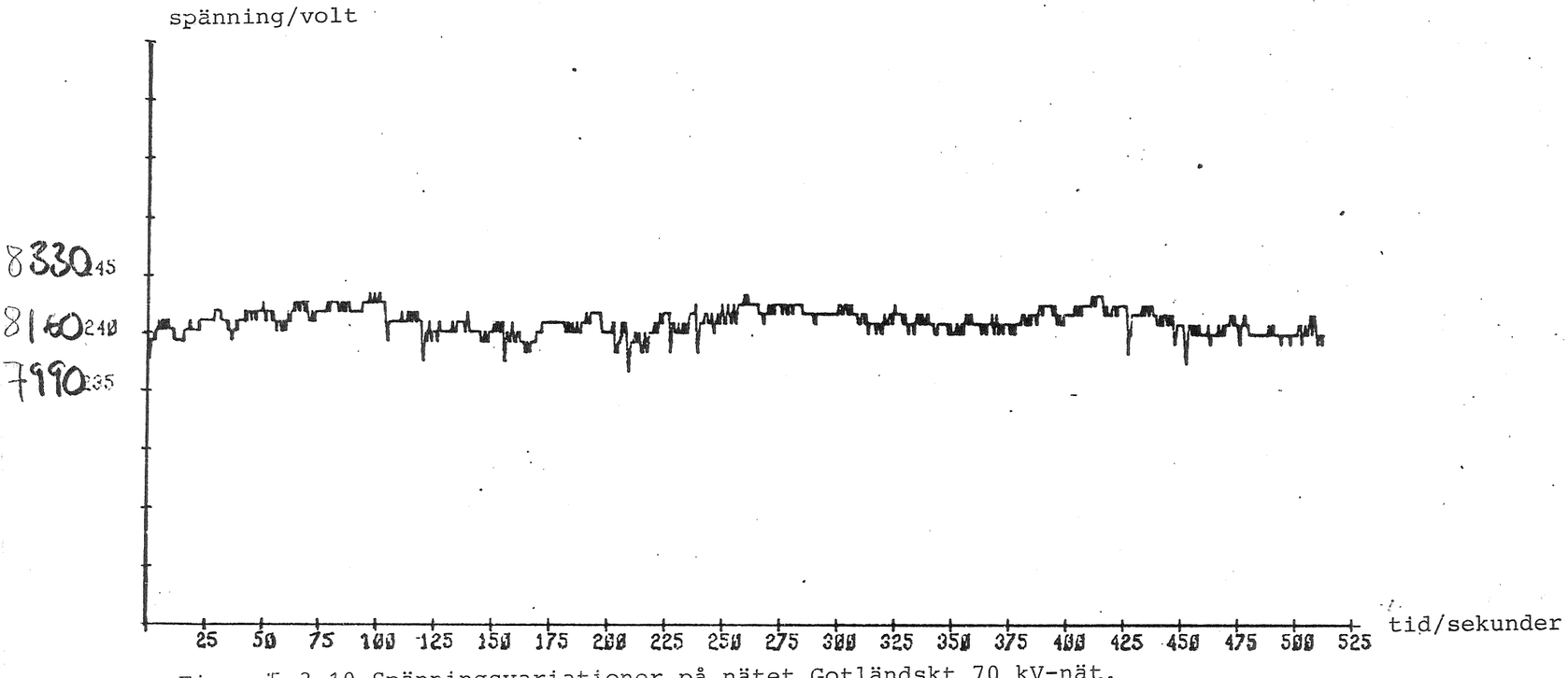
Induktanserna har beräknats så att Gotlands 30kV och 70kV nät simuleras, eftersom placering av ett vågkraftverk utanför Gotland är ett intressant alternativ. Exempel på spänningsvariationer ges i fig 5.3.10.

Vid simuleringen har ingen hänsyn tagits till inteferens mellan bojarna. På grund av vågornas komplicerade natur har bojarnas beteende betraktats, som mer eller mindre slumpartat.

Starkt nät, $S_k = \infty$ $\Delta U < 1\%$

70 kV-nät, S_k = 100 MVA $\Delta U < 1{,}3\%$

30 kV-nät, S_k = 50 MVA $\Delta U < 1{,}5\%$



Figur 5.3.10 Spänningsvariationer på nätet.Gotländskt 70 kV-nät.

5.4 Förankringssystem

5.4.1 Struktur och funktionssätt

För samtliga typer av vågkraftverk, med undantag för de som står på botten (betongkassuner), krävs att de förankras på ett driftsäkert sätt. De krav man bör ställa på ett förankringssystem kan sammanfattas i följande punkter

- livslängden bör vara 20-25 år
- reparationstillgängligheten bör vara god
- succesiv utläggning skall vara möjlig
- möjlighet att manövrera fartyg inne i hela kraftverket skall finnas
- systemet skall vara optimerat för det aktuella kraftverket
- bottenarealen som tas i anspråk skall minimeras

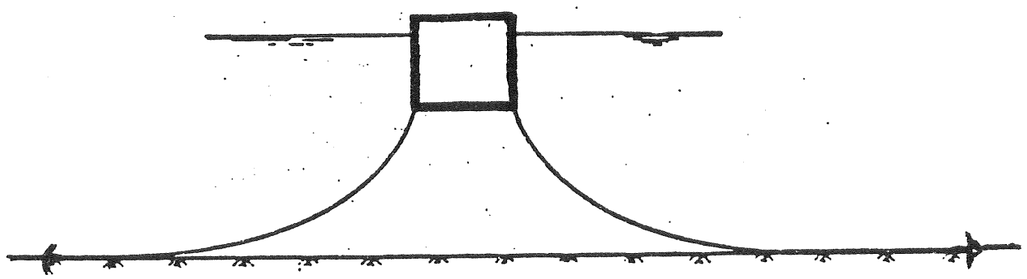
Man kan dela upp förankringssystemen i tre huvudkategorier.

1. Kedjelinjeförankringar (katenarieförankring)
2. Sträckta förankringar
3. Förankringar via bojar

Varje kraftverksenhet förankras enskilt till ankare på botten. Ett ankare kan betjäna flera enheter.

Kedjelinjeförankringar (Katenarieförankring)

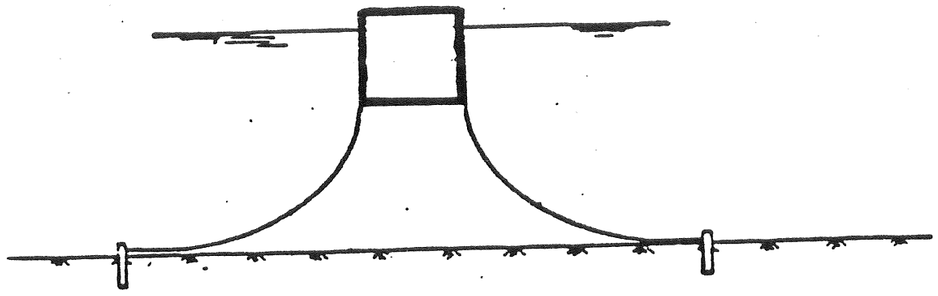
Dessa förankringar utgörs av fritt hängande linor. Egenskaperna hos förankringen är beroende av linans vikt. Se figur 5.4.1.



Figur 5.4.1. Kedjelinjeförankring.

Längden skall vara så lång att kraften alltid angriper ankaret horisontellt. Nackdelarna med denna typ av förankring är stort slitage vid anliggningen mot botten. Vidare tar denna förankring en relativt sett stor bottenareal i anspråk.

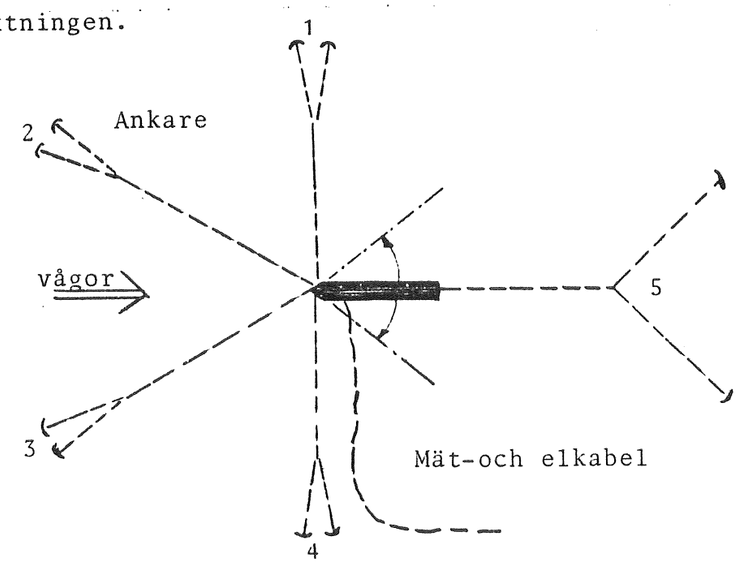
I figur 5.4.2 visas samma system men med kortare lina och fasta ankare. Systemet har en större styvhet och ankarna tar även upp vertikala laster.



Figur 5.4.2. Kedjelinjeförankring, styv.

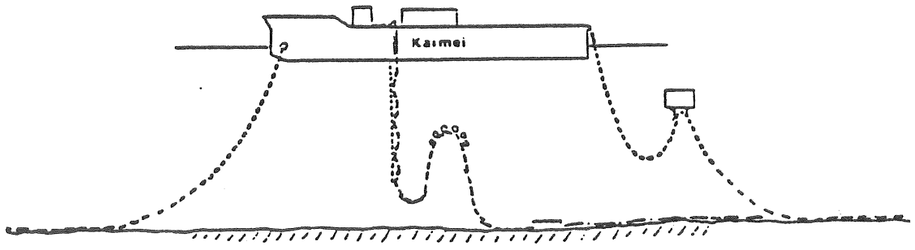
En kedjelinjeförankring kan förses med en eller flera vikter på linan som succesivt träder i funktion när belastningen ökar.

Det japanska kraftverket Kaimei är fempunktsförankrat med kedjelinjeförankringar, se figur 5.4.3. Förankringssystemet är uppbyggt med fyra förliga ankare och en förankring i aktern. Den akterliga har till uppgift att orientera kraftverket i olika vinklar genemot vågriktningen.



Figur 5.4.3b Förankringssystem för Kaimei.

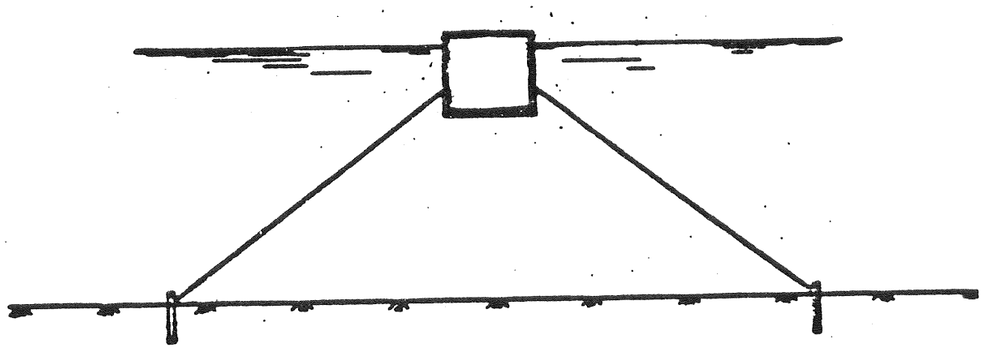
El- och mätkabeln är avlastad via bojar under vattenytan för att eliminera slitaget på kabeln vid kontakt med botten, se figur 5.4.3b.



Figur 5.4.3b Det japanska kraftverket Kaimei kedjelinjeförankrat. El- och mätkabeln avlastad via undervattensbojar.

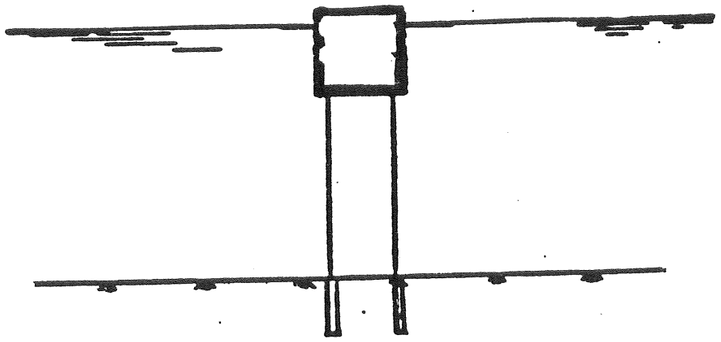
Sträckta förankringar

I system med sträckta förankringar är det tänkt att använda elastiska linor fiber - alternativt stållinor se figur 5.4.4. Elasticiteten ökar med längden på linan. En nackdel med fiberlinor är att vid högfrekventa lastväxlingar kan temperaturen i linkärnan bli så hög att denna smälter.



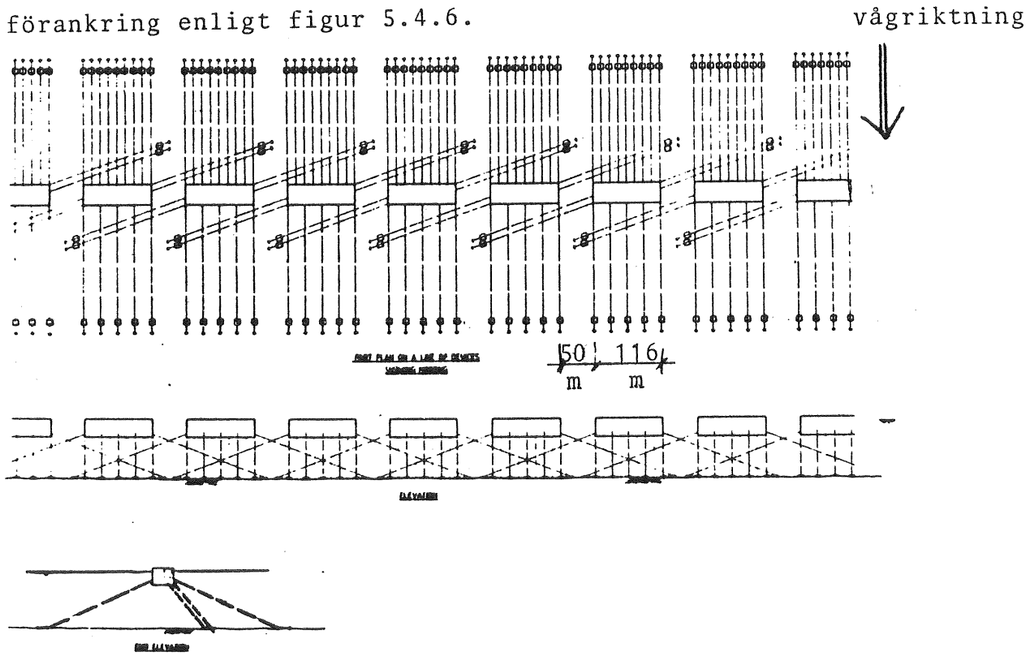
Figur 5.4.4 Sträckt förankring.

En annan typ av sträckt förankring är vertikalt förspänd vilket innebär att flytkroppen är nerdragen mer än sin egen vikt, figur 5.4.5.



Figur 5.4.5 Förspänd förankring.

Det engelska OWC-kraftverket är skisserat med en typ av sträckt förankring enligt figur 5.4.6.

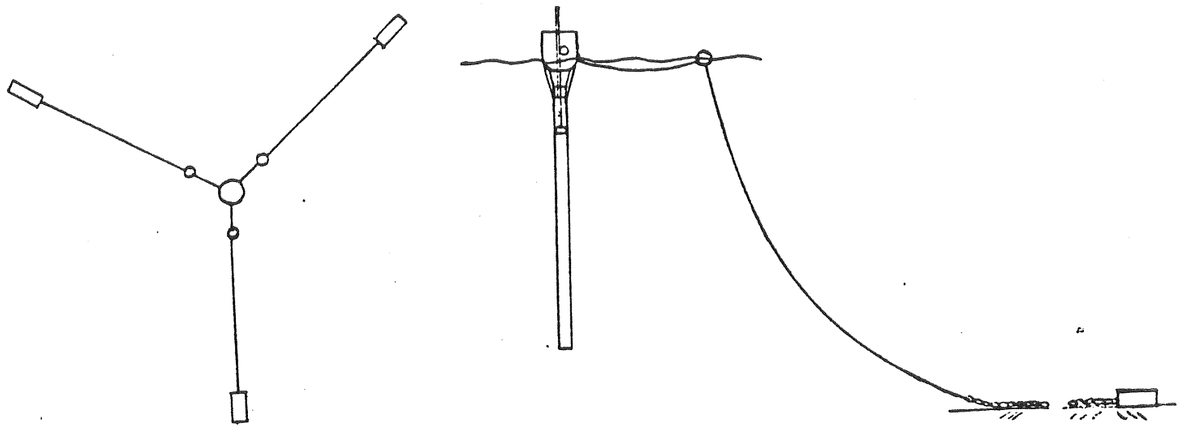


Figur 5.4.6 Förankringssystem enligt förslag från NEL för OWC-kraftverk.

Som framgår av figuren infaller de dominerande vågorna vinkelrät mot kraftverket. I denna riktning har man således den största andelen förankringar. Utläggning av detta relativt "täta" förankringssystem kräver en noggrån positionering hos det utläggande fartyget (ev jack up rigg).

Förankringar via bojar

Vid de i höstas avslutade försöken med IPS-bojen till havs användes en trepunktsförankring via bojar i vattenytan. Denna typ av förankring se figur 5.4.7 möjliggör en i det när närmaste ostörd vertikalrörelse hos bojen. De resulterande förankringskrafterna blir små på grund av att bojen tillåts ha en viss avdrift. Nackdelarna med system av denna typ är att de är utrymmeskrävande dels i ytan och dels på botten. Vidare begränsas manövreringsutrymmet i kraftverksområdet.



Figur 5.4.7 Förankringar via bojar i vattenytan.

För några kraftverkskoncept utgör själva förankringen en del i omvandlaren.

Den norska bojen av Budal-Falnes är "förankrad" via en stålstång till botten kring vilken bojen arbetar vertikalt. Detta sätt att utnyttja förankringen till en del i omvandlaren löser många problem i samband med utläggning och vid underhållsarbeten (lätt att ta sig fram i kraftverksområdet, endast en förankringspunkt). Även det svenska konceptet med petropumpen fungerar på samma sätt. Här är det pumpen i sig själv som utgör förankringen.

5.4.2 Komponenter

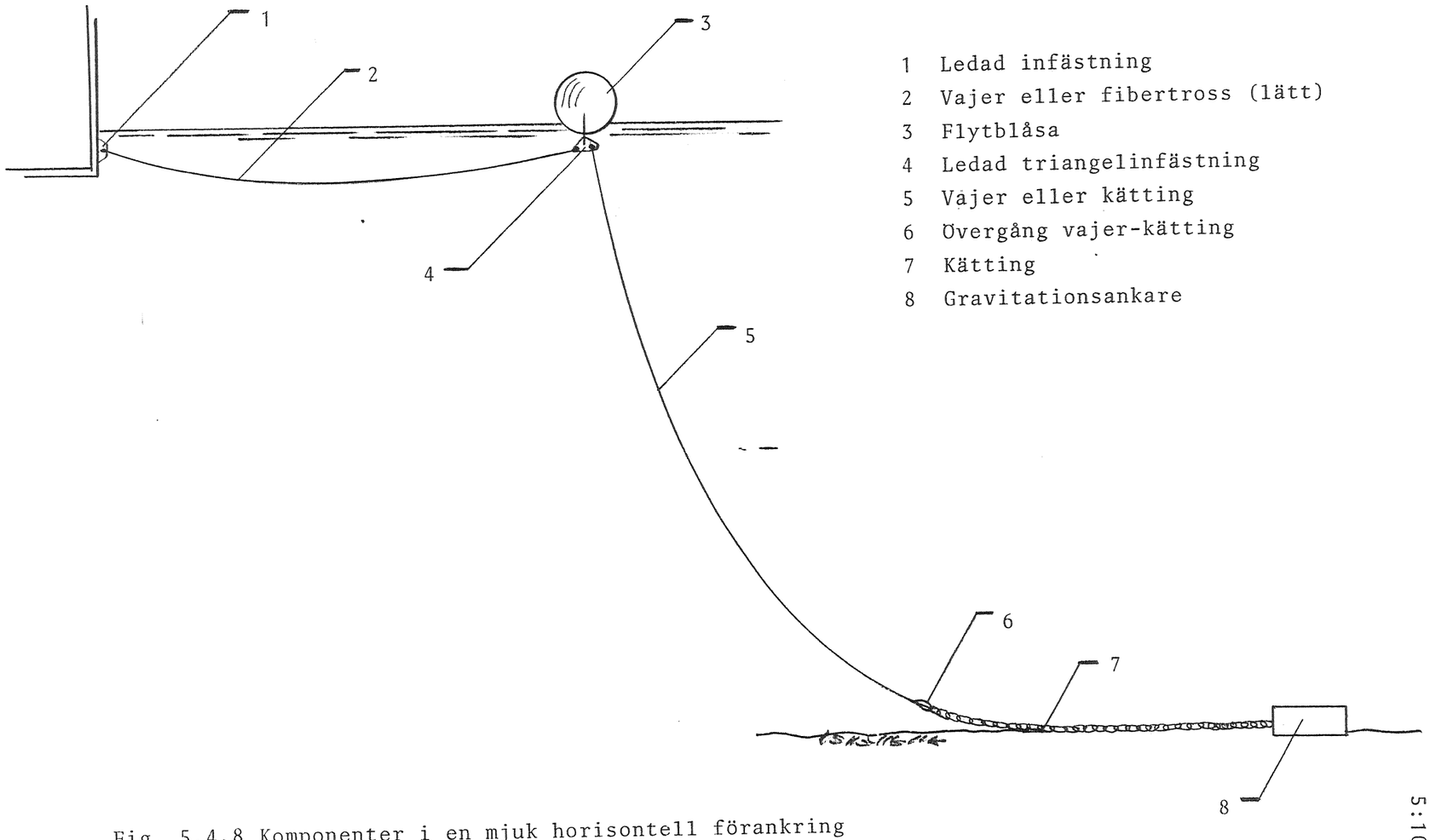
Det som har betydelse för materialval, dimensioner och den tekniska uppbyggnaden av ett förankringssystem är i huvudsak fyra faktorer nämligen:

- typ av system (en- eller flerpunktsförankring, fast eller mjuk förankring)
- krafter och rörelser
- korrosion, kemisk och biologisk aktivitet
- säkerhetsnivå mot brott i systemet

För vissa typer av kraftverk krävs att förankringen under drift ej nämnvärt får påverka kraftverkets rörelse i en viss riktning, med andra ord den får ej vara energiupptagande i denna riktning. Ett sådant exempel visas i fig. 5.4.8.

Att en kedja inte är starkare än sin svagaste länk är ett känt faktum. Detta gäller i hög grad ett helt förankringssystem. Således gäller det att göra komponentvalet så optimalt som möjligt, så att man erhåller en relativt sett jämnstark förankring. Att överdimensionera någon del i en förankring leder inte till någon starkare eller säkrare förankring. En överdimensionering kan dock vara motiverad för att ge ökad livslängd med hänsyn till korrosion.

De komponenter som studerats är konventionella förankringselement som idag används i marina sammanhang. Dessa torde i stor utsträckning kunna användas på vågkraftverk. Om man vill erhålla livslängder på omkring 25 år krävs dock att korrosions- och nötningsproblemen undersöks mera och motsvarande skydd förbättras. En viss forskning pågår i utlandet med syfte att undersöka och ta fram nya material till förankringar. Det är dels bättre stållegeringar med ökad brotthållfasthet och bättre



1 Ledad infästning
2 Vajer eller fibertross (lätt)
3 Flytblåsa
4 Ledad triangelinfästning
5 Vajer eller kätting
6 Övergång vajer-kätting
7 Kätting
8 Gravitationsankare

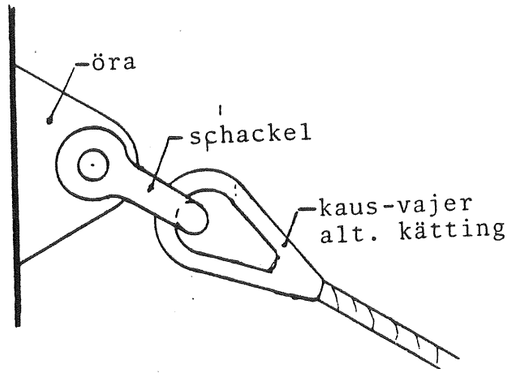
Fig. 5.4.8 Komponenter i en mjuk horisontell förankring

motstånd mot korrosion och dels höghållfasta fiberarmerade plaster.

I figur 5.4.8 visas schematiskt komponenter till en mjuk horisontell förankring.

Anordningar för fastledad infästning

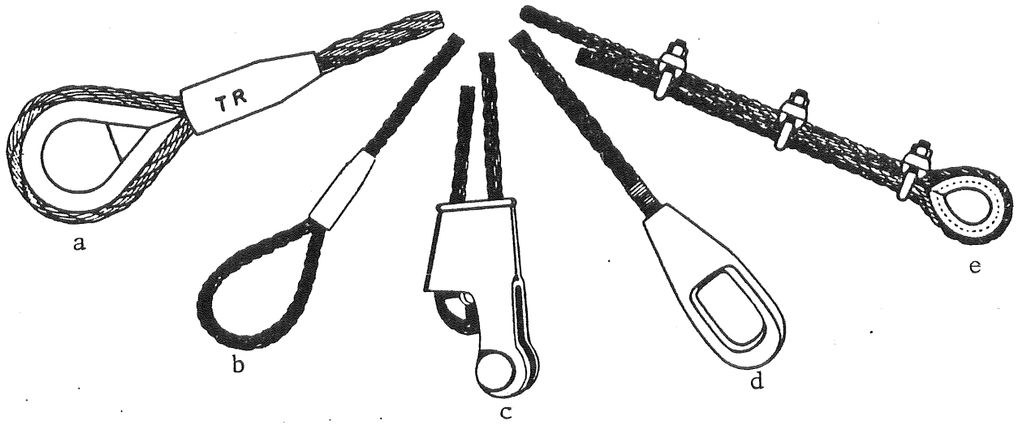
Dessa kan utgöras av schacklar och kauser på vajer- eller kättingsidan och öron eller byglar på kraftverkssidan, se fig. 5.4.9.



Figur 5.4.9 Ledad infästning.

Denna infästning är konventionell. Kraftupptagningsförmågan är god. Infästningen tillåter viss spridning av kraftriktningen. Dock kan den mekaniska nötningen med tiden kräva åtgärder.

För att erhålla en kraftöverförande ögla på en vajer finns en rad olika utföranden att välja på. I fig. 5.4.10 visas de vanligast förekommande ändbeslagen.



Figur 5.4.10 Ändbeslag.

Hållfastheten för olika ändbeslag brukar man ange i procent av linans hållfasthet (brottlast) se tabell 5.1.

Tabell 5.1 Relativ hållfasthet på ändbeslag.

Ändbeslag	vajer	fiberlina		
Handsplitsad	80-90	80-90		
Mek splitsad	90-95	90-92		
Kaus med talurit	85-95	85-95	figur	a
Sling med talurit	80-90	80-90	figur	b
Wedge socket	75-90	75-90	figur	c
Spelter socket	100	100	figur	d
Kaus med vajrelås	80-90	80-90	figur	e

Schacklar tillverkas idag för brottlaster motsvarande de grövsta kättingar och vajrar. Vikten på dessa schacklar kan uppgå till 500-600 kg vilket gör dem relativt svårhanterliga.

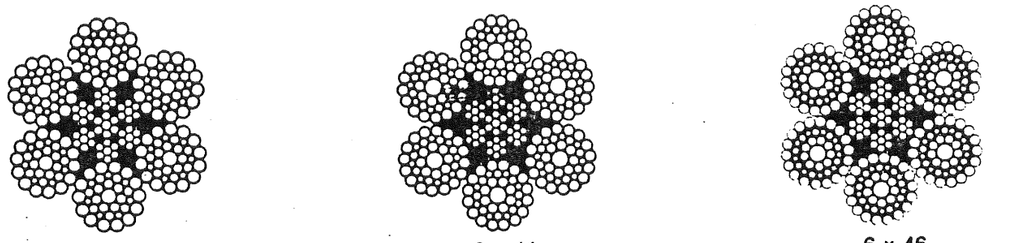
Stållinor

Dessa kommer till användning i en förankring när man vill ha en lätt och samtidigt stark förankring. Förhållandet mellan min brottlast och vikt/m (ton/kg/m) för tre typer av linor framgår av tabell 5.2. Värdena är ungefärliga och beror i hög grad på kvalitet.

Tabell 5.2 Brottlast/viktsförhållande för olika linor.

Typ av lina	minbrottlast/vikt per meter
Stållinor	14-16
Fiberlinor	20-30
Kjätting	4-6

Den mest använda typen av stållina i förankringar inom off-shore är den sk Warrington Seale se figur 5.4.11.



Figur 5.4.11 Stållina Warrington Seale.

Linor med en min brottlast av $13 \cdot 10^3$ kN tillverkas idag.

Nackdelarna med vajrar av icke rosttrögt stål är att de snabbt kan korrodera i hela tvärsnittet. Det normala rostskyddet för vajrar är galvanisering och eller infettning av varje enskild kardel. Detta görs i samband med slagningen. När en vajer belastas med varierande krafter kommer kardelarna att öppna och stänga sig i förhållande till varandra. Smutspartiklar och vatten strömmar in och ut och kan snabbt försämra rostskyddet.

Fiber linor

Elastiska och lätta förankringar kan utgöras av fiberlinor. Som framgick av tabell 5.2 är dessa viktmässigt sett ungefär dubbelt så starka som stållinor. Idag tillverkas fiberlinor med en min brottlast på upp till $3\text{-}4 \cdot 10^3$ kN. Materialet i dessa är vanligt-

vis nylon eller polypropylen.

Den största nackdelen med fiberlinor i förankringar är dess dåliga motstånd mot mekanisk nötning. Detta förhållande gäller speciellt vid infästningar.

Kätting

Kätting är ett relativt tungt förankringselement och används när man önskar en kraftdämpande och energiupptagande förankring. Vid förankringar med kätting som sträcks upp erhålles en relativt exakt positionshållning.

Brottgränsen för de vanligaste kvaliteterna ligger in intervallet 500 N/mm^2 - 900 N/mm^2. Numera sker en mycket noggrann tillverkningskontroll på varje enskild länk.

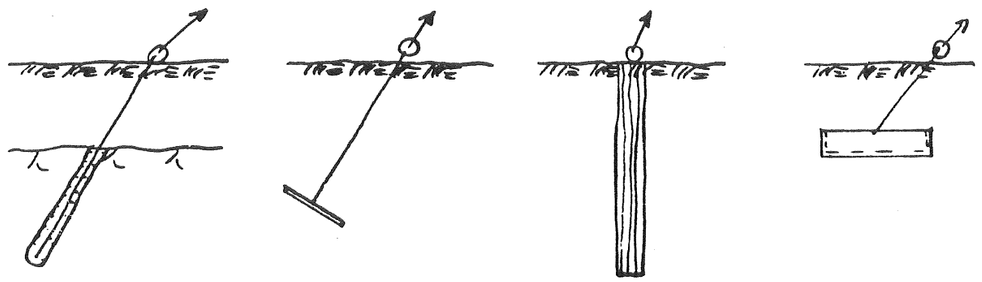
Ankare

Man kan skilja på tre typer av ankare nämligen

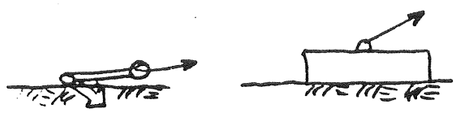
- gravitationsankare
- dragankare
- inborrade och fastgjutna förankrningar eller nedschaktade betong plattor.

Gravitationsankare kan vara av stål (konventionella typer) eller av betong. De senare kan gjutas till lämplig form och storlek.

Inborrade och fastgjutna förankringar kan utgöras av stållinor eller stålrör som borrats in och gjutits fast i berg. I figur 5.4.12 visas några typer av ankare.



Inborrat fastgjutet Nedschaktat Pålankare Nedschaktat



dragankare gravitationsankare

Figur 5.4.12 Olika typer av ankare.

5.5 Material

5.5.1 Allmänt

Konstruktionsmaterial och miljöpåverkan.

I de kostnadskalkyler över olika vågkraftverk som gjorts i utlandet och Sverige har man tänkt sig betong alternativ stål som konstruktionsmaterial. Olika plastmaterial ingår i komponenter i kraftverken.

Konstruktioner till havs utsätts för kraftig påverkan från den omgivande miljön, såsom korrosion, påväxt, mekanisk nötning och åldring till följd av solstrålning. Detta påverkar i hög grad livslängden hos konstruktionen.

Från offshoreverksamheten och varvsindustrin har man en relativt god erfarenhet av hur man på olika sätt kan minska eller förhindra korrosion, påväxt m.m.

Inom ramen för det norsk- svenska sammarbetet på vågenergiområdet hölls ett seminarium i Trondheim den 23-25 nov 1981 över ämnet "Materialteknik, korrosion och åldring map vågkraftverk". Fyra medlemmar ur forskningsgruppen deltog. En sammanställning över föredragen och diskussionerna, återfinns i GR:42. I det följande redovisas endast kortfattat vad som behandlades.

Tidigare erfarenheter av t ex konstruktion, byggande och drift av olika plattformar, fartyg, fyrar och även hamnanläggningar är i mångt och mycket tillämpbart på olika typer av vågkraftverk.

Materialtekniken inom offshoreverksamheten har under det senaste decenniet, utvecklats starkt, mycket beroende på de stränga krav det norska Oljedirektoratet och Det Norske Veritas ställt upp. Detta gäller krav på såväl hållfasthetsmässiga egenskaper som korrosionsbeständigheten hos konstruktionsmaterialet.

5.5.2 Stål

Stål är det vanligaste konstruktionsmaterialet i detta sammanhang.

Med stål avses här vanliga konstruktionsstål motsvarande SIS 1312, SIS 1412 eller fartygsstål MS [1] eller HTS [2]. Dessa stål har dålig korrosionsbeständighet. Stållegreringar med bättre korrosionsbeständighet finns men är dyrare.

Stål SIS 1312 SIS 1412 MS [1] HTS [2]	Lågt pris	Dålig korrosionsbeständighet.
Rostfrittstål SIS 2332 SIS 2342	Högt pris	God Korrosionsbeständighet vid hög vattenhastighet.
Kopparlegerade stål	Högt pris	God korrosionsbeständighet vid låg vattenhastighet.
Titan eller Titanlegerade stål		Mycket god korrosionsbeständighet.

1) MS= Ordinära fartygsstål
2) HTS= Höghållfasta fartygsstål

Obehandlat stål korroderar kraftigt i havsvatten.

De miljö faktorer som orsakar korrosion i havsvatten kan delas upp i tre grupper:

1. Kemiska faktorer	Salthalt (klorid och natrium) Syrehalt (varierar pga biologiska aktiviteter)
2. Biologiska faktorer	Bakterier (sulfatreducerande, sulfat→sulfit, starkt korroderande) Påväxt (minskar syrehalten ⇒sulfatred bakterier)

3. Fysikaliska faktorer

- temperatur
- strömningshastighet
- elektrisk ledningsförmåga
- tryck

Korrosion är en elektrokemisk process, vilket innebär att när stålet korroderar sker kemiska reaktioner samtidigt som en elektrisk ström alstras, korrosionsströmmen, med den korroderade ytan som anod. För att korrosion skall kunna uppstå krävs två kemiska reaktioner, nämligen oxidation som utgörs av järn upplösning:

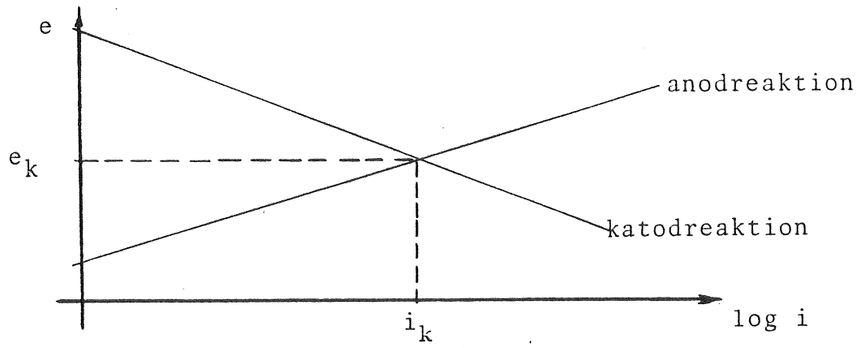
$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$$

och reduktion av något ämne vanligen syrgas eller vätejoner:

$$H_2O \rightarrow OH + H^+$$

Oxidationen kallas anodreaktion och reduktionen katodreaktion.

När stålet korroderar, antar det en viss elektrisk potential i förhållande till det omgivande vattnet. Denna kallas korrosionspotentialen och dess värde bestämms av anod och katodreaktionerna. Korrosionspotentialen och tillhörande strömtäthet brukar åskådliggöras mha ett sk Evans diagram.



i_k = korrosionsströmtäthet (mA/m^2)

e_k = korrosionspotential (mV)

Figur 5.5.1 Evans diagram.

För att kunna skydda stålets yta mot korrosion finns för närvarande två huvudgrupper av skydd.

- olika typer av rostskyddsmålning (inkl galvanisering)
- katodiskt skydd, galvaniskt eller elektrolytiskt.

Ett tredje alternativ kan vara att gummibekläda ytan. Detta är ännu ej utprovat i detta sammanhang.

Rostskyddsmålning

Syftet med rostskydds målning är att åstadkomma ett elektriskt isolerande skikt på stålytan för att förhindra kemiska reaktioner.

Den svenska Rostskyddsnormen (S+BK-N4) ger anvisningar om olika typer av rostskyddssystem. Systemen är uppgjorda för olika miljöklasser, se tabell 5.3, 5.4 och 5.5. För vägkraftverk torde system R10 vara ett lägsta krav.

Tabell 5.3 Rostskyddssystem enl svensk Rostskyddsnorm.

Miljö-klass	Rostskydds-system	Förbehandling enligt SIS 05 59 00	Grundbeläggning Färgtyp enligt tabell 3:2 b	Skikttjocklek µm	Täckbeläggning Färgtyp enligt tabell 3:2 b	Skikttjocklek µm	Systemets totala skikttjocklek µm
M0[1])		—	—	—	—		
M1[2])	Rs1	St 2	B	40	G	40	80
	Rs2	Sa 2	C	40	G	40	80
	Rs3	Sa 2½	E, F	40	—	—	40
M2	Rs4	St 2	A	40 eller 80	G	80 eller 40	120
	Rs5[3])	St 2 eller Sa 2	B	80 eller 40	G	40 eller 80	120
	Rs6	Sa 2½	E, F	40	H, I, K	40	80
M3	Rs7	Sa 2½	B	80	G	80	160
	Rs8	Sa 2½	D, E, F	60	H, I, K	80	140
	Rs9	Varmförzinkning klass A enligt SMS 2950					70
M4	Rs10[4])	Sa 2½	D, E, F, I	80	H, I, K	80—200	160—280
	Rs11[5])	Varmförzinkning klass A enligt SMS 2950			H, I, K	80—200	150—270
	Rs12[5])	Metallsprutning enligt SMS 2972		80	H, I, K	80—200	160—280

Tabell 5.4 Färgtyper.

Färg Avsedd för	Typ	SIS	Beteckning enligt Statens Vägverk	Färgtyp
Grund-färg	A	18 52 xx[1])	AY 410	Blymönja-linolja
	B	18 52 xx	AY 411	Blymönja-alkyd
	C	18 52 xx	AY 412	Blymönja-alkyd
		18 52 xx	AY 420	Zinkkromat-alkyd (gul)
			AY 421	Zinkkromat-alkyd (röd)
	D	18 52 01	AY 425	Tvåkomponent, epoxi eller uretan
	E	18 52 04[2])	AY 426	Zink-epoxi[3])
	F	18 52 xx	—	Zink-silikat[3])
Täck-färg	G	18 52 xx	AY 530	Alkydlack
			AY 531	Alkydlack
			AY 532	Alkydlack
	H	18 52 02-03	AY 540	Två komponent, epoxi eller uretan
	I	18 52 05[2])	AY 541	Tjärepoxi[3])
	K	18 52 xx	AY 545	Klorkautschuk

Tabell 5.5.

Miljöklass	Omgivningens aggressivitet	Miljöexempel
M0	Ingen	Inomhus i torr luft
M1	Obetydlig	Inomhus i luft med växlande temperatur och fuktighet, t ex i ej uppvärmd lokal och industribyggnad
M2	Måttlig	Inomhus vid fuktpåverkan och kondens. Utomhus i inlandet, dock ej i industriområde med aggressiv luft eller i större tätort
M3	Stor	Över hav eller i närheten av kust, inom industriområde med aggressiv luft eller i större tätort
M4	Mycket stor	I vissa oventilerade bergrum, gruvor och kemiska industrier. Konstruktion i vatten eller jord

Katodiskt skydd

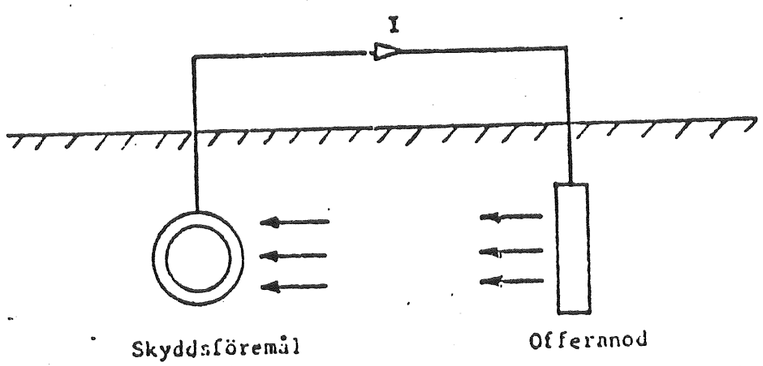
Vid korrosionen flyter som nämts en positiv ström ut från den korroderade ytan till omgivande medium. Genom att sända en elektriskström i motsatt riktning kan korrossionsströmmen minskas och fås att i det närmaste helt avta, om en tillräckligt stor skyddsström användes. När skyddsströmmen ökar och således korrosionsströmmen minskar, sjunker stålets potential. När den sk jämnviktspotentialen uppnåtts mellan stålytan och dess joner i vattnet, säger man att stålet är fullständigt katodiskt skyddat.

Som potential kriterium för katodiskt skydd av olika metaller anges vanligen följande potentialer i mV relativt Cu/Cu SO_y elektroden.

Stål	-850 mW
Bly	-600
Koppar	-500
Aluminium	-950

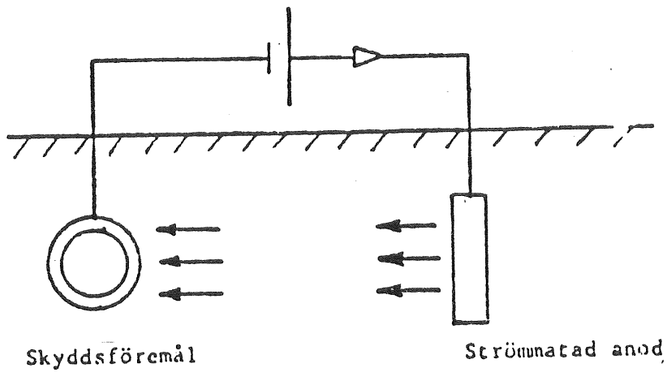
Den erforderliga skyddströmmen för uppnående av katodiskt skydd kan alstras på två skilda sätt, nämligen dels genom galvaniskt och dels genom elektrolytiskt katodiskt skydd. Vid galvaniskt

skydd se figur 5.5.2 alstras den erforderliga skyddsströmmmen i den elektrokemiska process som uppstår när två metaller med skilda korrosionspotentialer sammankopplas elektriskt i en gemensam elektrolyt. Metallen med den mest negativa potentialen (oädlast) blir anod och korroderar, medan den ädlaste (stålet i detta fall) blir katod och skyddas. Eftersom anoden korroderar och således förbrukas brukar den kallas för offeranod. Vanliga material som används till galvaniska anoder för skydd av stål, utgörs av magnesium, zink eller aluminium.



Figur 5.5.2 Galvaniskt katodiskt skydd.

Vid elektrolytiskt katodiskt skydd se figur 5.5.3 alstras den erforderliga skyddsströmmen med en yttre likströmskälla (påtryckt spänning) vars minuspol ansluts till det föremål som skall skyddas och pluspol till en eller flera anoder. Materialet i anoden väljs från fall till fall.



Figur 5.5.3 Elektrolytiskt katodiskt skydd.

5.5.3 Betong

Konstruktioner av betong i havsmiljö har normalt mycket god beständighet mot miljöangrepp, under förutsättning att betongen proportioneras rätt, dvs har en för omständigheterna riktig sammansättning (cement, ballast, vatten + ev tillsatsämnen) samt att gjutning och efterbehandlingen gjorts enligt gällande normer.

Det finns idag en lång erfarenhet av betongkonstruktioner som varit utsatta för långvariga miljöangrepp. Som exempel kan nämnas kajanläggningar som efter 50 år fortfarande är i det närmaste helt intakta.

Givetvis förekommer det skador på betongkonstruktioner. Skadeorsakerna är i huvudsak av tre typer nämligen:

- korrosion på armering
- kemisk nedbrytning
- frostskador

Armeringskorrosion

Normalt utgör betongen i sig själv ett mycket gott skydd mot korrosion på armeringen, pga sitt höga ph-värde 12.6- 14 vilket passiverar stålet i en elektrolyt.

Om betongen innehåller kloridjoner kan emellertid passiviteten nedbrytas lokalt, och resultera i hög korrosionshastighet. Härvid tycks närvaro av syre ha en avgörande betydelse för korrosionshastigheten. Eftersom syre i gasfas har en avsevärt högre diffusionshastighet än syre i vätskefas kan man förstå att de delar av en betongskonstruktion som befinner sig i den sk skvalpzonen utsätts för större korrosionsrisk är de delar som ständigt är helt omgivna av vatten. I denna zon kan diffusion av syre fram till armeringen ske i gasfas via sprickor och porer i betongen.

Generellt kan sägas att korrosionsriskerna ökar med ökande, kloridhalt i betongen, ökande porositet, samt ökande förhållandet ballastmaterial/cement.

För offshorekonstruktionerna utförda i betong har man genom stränga regler försökt att minska korrosionsriskerna bl a genom ökande täckskikt för armeringen.

- 50 mm täckning på medelpåkända konstruktioner.
- 70 " " " de mest kritiska delarna på konstruktionen.
- 100 " " " förspända linor.
- Sprickor får vara maximalt 0,2 mm vida och 30 mm djupa

Ett speciellt problem med framförallt offshorekonstruktioner av betong utgör den galvaniska korrosionen på stålkonstruktioner som är belägna i vattnet utanför betongen men i elektrisk kontakt med armeringen i betongen. Eftersom det passiva stålet i betongen kan ha en elektrodpotential som är flera hundra mV mer positiv än stålet i vattnet, är förutsättningarna för galvanisk korrosion goda.

Som skydd mot korrosion på armering kan nämnas följande metoder:

- Katodiskt skydd
- Diffusionshindrande membran
- Polymerimpregnerad betong
- Galvanisering av armeringen
- Organisk beläggning av armeringen

Av dessa metoder anses katodiskt skydd ha de bästa förutsättningarna att ge ett effektivt skydd.

Kemisk nedbrytning

En kemisk nedbrytning av betongen kan antingen vara ämnen som löser upp betongen eller ämnen som tränger in i betongen och reagerar under volymökning och spränger sönder betongen. Avgörande för graden av dessa angrepp är:

betongens täthet vilken inverkar på hastigheten med vilket angreppet sker.

betongens kemiska uppbygnad dvs sammansättningen hos ballastmaterialet och cementen.

Sura angrepp dvs oorganiska syror (saltsyra, svavelsyra) löser ut kalken i cementen även vid låga koncentrationer.

En annan form av kemiskt angrepp är när betongen påverkas av sulfatjoner. Dessa angriper kalken och aluminaterna i cementen, vilket resulterar i att nya ämnen bildas med större volym och utövar därmed en inre sprängverkan (svällning) av betongen.

Tabell 5.6 visar en förteckning över kemiska angrepp och motåtgärder.

Som bl a framgår av tabellen är ett lågt vattencenemttal och därmed en tätare betong en avgörande faktor för att erhålla en resistent betong. Detta gäller speciellt för konstruktioner i marin miljö.

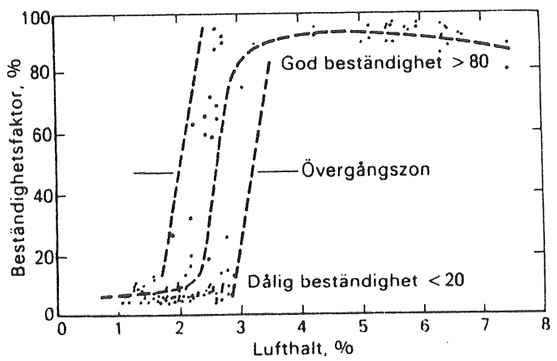
Tabell 5.6 Kemiska angrepp och motåtgärder.

	Grad av angrepp				
	Ingen	Svag	Måttlig	Stark	Mycket stark
Syror, pH	> 6,5	6,5 — 5,5	5,5 — 4,5	4,5 — 4,0	< 4,0
Kolsyra mg CO_2/l	< 15	15 — 30	30 — 60	60 — 100	> 100
Ammonium mg NH_4^+/l	< 15	15 — 30	30 — 60	60 — 100	> 100
Sulfat mg SO_4^{2-}/l	< 200	200 — 600	600 — 3000	3000 — 6000	> 6000
	Åtgärder med hänsyn till sulfatangrepp				
Typ av cement	OC	OC	SRC	SRC	SRC
Max vct	—	0,50	0,50	0,45	0,45
Cementhalt, kg/m³	—	330	330	370	370
Extra åtgärder	—	—	—	—	Erfordras
	Åtgärder med hänsyn till övriga angrepp				
Typ av cement	OC	OC	OC	OC	OC
Max vct	—	0,55	0,50	0,45	0,45
Cementhalt, kg/m³	—	300	330	370	370
Extra åtgärder	—	—	—	—	Erfordras

OC: Vanligt cement
SRC: Sulfatresistent cement

Frostangrepp

Betong som utsätts för fukt och kyla måste ta hand om den volymökning hos porvattnet som uppstår när detta fryser till is. Under volymökningen pressas is och vatten undan till omgivande luftporer. Vid denna undanpressning uppstår inre spänningar. som om inte tillräkligt med luftporer finns kan orsaka sprickor och brott i betongen. Normalt används tillsatsmaterial i betongen som åstadkommer en minsta erfoderlig lufthalt. Figur 5.5.4 visar exempel på frostbeständigheter vid olika lufthalter.



Figur 5.5.4 Frostbeständigheter som funktion av lufthalt.

5.5.4 Plaster

Med plast avses ettmaterial uppbyggt av olika polymerer och med tillsatser av olika slag såsom, stabilisatorer, fyllnadsstoff, olika typer av armering, fibrer etc. Detta medför att plaster kan ges de mest skiftande egenskpaer från mjuka elastiska plaster till höghållfasta fiberplaster. Polymera material är mer eller mindre viskoelastiska, vilket medför att dess mekaniska egenskaper i större eller mindre utsträckning är tids- och temperaturberoende.

Utvecklingen av nya plaster (mineral- och fiberkompositer) har på de senaste tio åren varit mycket expansiv. Huvudorsaken till detta har varit ett starkt önskemål om bättre materialegenskaper.

De nya plastmaterial man har fått fram har ej långtidsprovats i önskvärd omfattning framförallt map utmattning och åldring.

Plastmaterialens mekaniska egenskaper (egenskapsprofil) hänför sig oftast från sk korttidsförsök med en ofullständig och ej tillräcklig bild av materialets hållfastegenskaper.

Det för närvarande största problemet med just plaster är de mekaniska långtidsegenskaperna.

Polyesterplaster är de vanligast förekommande plasterna vid större konstruktioner, framförallt inom båtindustrin. Plastskalen är uppbyggda av polyesterplast och en armering, glasfibermatta eller glasfiber, som läggs på i olika antal skikt. I vissa fall används fyllnadsmaterial för att erhålla större konstruktionshöjd.

Eftersom plasten inklusive armering i sig själv ej är helt tät, en viss vattenabsorption förekommer pga porositet, måste plastytan tätas.

Tabell 5.7 visar de vanligast förekommande polyesterplasterna.

Tabell 5.7 Olika polyesterplaster.

Benämning	*Karakteristisk beståndsdel*	*Användning exempel*
Orto-polyester	Ortoftalsyreanhydrid	Båtar, paneler, formgods
Iso-polyester	Isoftalsyra	Tankar, rör m m med vissa krav på kemisk beständighet. Gel- och topcoat.
Vinyl-ester	Vinylpolyester	Produkter med höga krav på kemisk beständighet
Bisfenol-polyester	Bisfenol A-baserad polyester	
Hetsyra-polyester	Hexaklormetylentetrahydroftalsyra	Produkter med krav på kemisk resistens, högre användningstemp än ortopolyester, viss brandhärdighet.
Imid-polyester	Polyimid modifierad polyester	Produkter för hög användningstemperatur

Som armering i armerade plaster används i huvudsak glasfiber. Glasfiber är relativt billigt och förbättrar främst materialets mekaniska styrka, styvhet, seghet och dimensionsstabilitet och höjer dessutom den övre användningstemperaturen.

Andra armeringsmaterial förekommer (se tabell 10) fast då i mera speciella konstruktionsmaterial t ex inom flygindustrin.

Genom att orientera armeringen i de riktningar som påkänningarna är störst kan materialet utnyttjas optimalt.

Tabell 5.8 Armeringsmaterial till polyesterplaster.

Material	*Fiberdiam. (μm)*	*Densitet (kg/m³)*	*Dragbrott-gräns (MPa)*	*Elasticitetsmodul (MPa)*	*Specifik Dragbrotts-gräns (MPa/kg/m³)*	*Specifik E-modul (MPa/kg/m³)*	*Relativt pris*
Polyamid	10—40	1 170	1 300	6 300	1,1	5,4	2
Polyester	10—30	1 400	~ 550	800	0,4	0,6	3
Sisal	25—500	1 450	850	—	0,6	—	0,5
Kvarts	9	2 200	1 000—4 000	71 000	0,5—1,8	32	100
E-glas	3—20	2 590	1 000—4 000	75 000	1,2—1,6	29	1
S-glas	3—20	2 480	4 000—5 000	90 000	1,6—2,0	36	3—30
Cellulosa		1 000	300	130 000	0,3	130	0,1
Aramidfiber	12	1 450	3 000	130 000	2	90	15—30
Asbest (krysotil)	0,02—0,2	2 550	1 300—3 000	160 000	0,5—1,2	62	0,15
Stål-wire	5—250	7 800	2 000—3 000	210 000	0,3—0,4	27	6—150
Polyeten	—	960	700	160 000	0,7	160	—
Polyvinylalkohol	—	1 000	700	250 000	0,7	250	—
Kolfiber							
HS	5—10	1 750	3 200	240 000	1,8	137	} 100—900
HM	5—10	1 950	2 300	330 000	1,2	170	
Grafit whiskers		2 250	21 000	700 000	9,3	311	—
Borfiber	100	2 650	2 000—3 000	400 000	0,75—1,1	150	1 000
Kiselkarbidfiber	100	3 400	3 000	450 000	0,9	132	1 000
Si_3N_4 whiskers	1—10	3 200	14 000	385 000	4,4	120	—
SiC whiskers	0,5—10	3 200	20 000	500 000	6,3	156	13 500
Al_2O_3 whiskers	0,5—10	4 000	28 000	700 000	7	175	24 000

5.5.5 Gummi

Gummi tillhör även gruppen polymerer, men man brukar i praktiskt bruk skilja på gummi och övriga plaster, pga gummits speciella egenskaper.

Naturgummi är ett högpolymeriserat kolväte med mycket långa molekyler vilket gör det till en utpräglad termoplast. Som andra termoplaster är rågummi temperaturkänsligt och lättlösligt i organiska vätskor, men genom behandling med svavel (vulkanisering) får gummit ökad hållfasthet och elasticitet samt större resistivitet mot organiska vätskor.

Utöver naturgummi finns en rad syntetiska gummisorter.

I vågkraftverk kan gummi vara ett utmärkt alternativ som skyddsbeläggning mot korrosion och slitage.

En avgörande egenskap hos mjukt naturgummi är dess mycket goda beständighet mot mekanisk nötning. Som exempel kan nämnas beklädnad av flaken till malmdumpers med gummiduk.

Genom att belägga en stålyta med en gummiduk (naturgummi alternativt ett syntetiskt gummi) uppnås ett mycket bra och varaktigt skydd.

Tekniken för att belägga stålytor med gummiduk finns.

Inom industrier där man hanterar aggresiva ämnen av olika slag beläggs cisterner, rör mm med olika typer av gummiduk. Inom gruvindustrin och industrier där man har problem med mekanisk nötning används gummi i många fall som den enda acceptabla lösningen.

I förankringssammanhang kan gummibelagda vajrar och kjättningar vara en tänkbar lösning på korrosions- och nötningsproblemen.

Kostnadsmässigt är gummibeläggningar relativt dyrt jämfört med andra skyddsmetoder. Men väger man in livslängd och underhåll kan gummibeläggning vara ett realistiskt alternativ.

5.6 Realisering av vågkraftverk

5.6.1 Tillverkning

Valet av tillverkningsstrategi beror dels av omvandlarnas storlek och utformning dels av hur snabb och omfattande utbyggnad som planeras. Även den geografiska spridningen inverkar.

För att belysa problematiken utgår vi från målsättningen att om ett visst antal år skall totalt ett visst antal TWh/år produceras.

Produktionen från varje omvandlarenhet ger då det totala antalet erforderliga enheter samt det genomsnittliga antalet tillverkade enheter per år.

Den tänkta industrins tillverknings- och lagringskapacitet kan sedan bestämmas mht antalet arbetsdagar per år och den tid som krävs för att tillverka en enhet.

Om omvandlarna ej kan sjösättas kontinuerligt tillkommer ett lagringsbehov var storlek bestäms av intervallen mellan sjösättningarna.

En överläggning enligt ovanstående visar den produktionsvolym och det lagringsbehov som behövs.

Med ledning av dessa uppgifter kan sedan erforderlig storlek på industrianläggningen bestämmas.

Små enheter, t ex bojar, tillverkas lämpligen på ett antal parallella linjer.

Linjerna utformas mht material- och komponentflöde.

Tillverkningen kännetecknas av att relativt tunga förflyttningar krävs. Dessutom torde behovet av lagringsplatser bli stort.

Se vidare exempel i avsnitt 5.6.4.

5.6.2 Installation

Installation består i transport av omvandlare till platsen för kraftverket, utläggning av förankringar och omvandlare, utläggning av energisamlingssystem (elektriskt eller hydrauliskt) samt inkoppling och funktionstest.

Transporter kan ske genom direkt bogsering eller genom bogsering av pråmar på vilka omvandlarna lastas. Anordningar och metoder för på och avlastning måste finnas. Dessa skall fungera även vid viss sjöhävning.

Kabel till land läggs med speciellt utrustat fartyg. Eventuellt plöjs kabeln ner i botten.

Installationen av omvandlarna underlättas om skräddarsydda specialfartyg används.

Arbetet kräver både tunga och lätta dykare.

Installationen förberedes genom utläggning av positionsmarkeringar.

Normalt sker installationen sommartid eftersom perioder med små vågor då är vanligast.

5.6.3 Underhåll och drift

Underhåll av vågkraftverk kan förutses bli en besvärlig och därmed kostbar arbetsuppgift. Det är därför viktigt att kraftverket utformas enkelt och robust så att underhållet minimeras.

Underhållet kan uppdelas på olika nivåer

- regelbunden service
- återkommande genomgripande kontroller
- reparationer

Service kan bestå i rengöring och service t ex byten av filter och förslitna delar, påfyllning av hydraulolja etc. Service bör

ske relativt regelbundet med ett intervall av storleksordningen ett fåtal månader. Åtgärderna bör därför kunna ske åtminstone vid måttlig sjögång. Metoder och utrustning för överflyttning av personal och materiel från servicebåt till omvandlare måste tas fram.

Omvandlarna utformas så att förutsedda serviceåtgärder kan ske enkelt - t ex med utbytesmoduler.

Med jämna mellanrum av storleksordningen ett fåtal år torde en mer genomgripande kontroll av omvandlaren erfordras. Vid servicetillfällena kan en enkel okulär besiktning göras för att avgöra när det är dags för en sådan kontroll. Skälen till detta kan dels vara att undvika haveri dels att öka energiproduktionen pga nedsatt funktion genom exempelvis beväxning. Om så erfordras kopplas omvandlaren ur och tas i land för åtgärder. Eventuellt bytes den ut mot en ny eller renoverad omvandlare (för att undvika produktionsbortfall).

Kontrollen avser framför allt sådana delar som utsätts för utmattningslaster, nötning, korrosion och beväxning.

Kontrollen kan visa att en reparation behöver göras. Reparationer kan även krävas pga regelrätt skada eller funktionsnedsättning t ex pga oförutsedd överbelastning, is, brand eller påsegling.

Mindre reparationer utföres till sjöss, men normalt sker den i land. Härvid kan samma fartygsenheter och utrustning utnyttjas som används vid installation.

5.6.4 Utförda studier

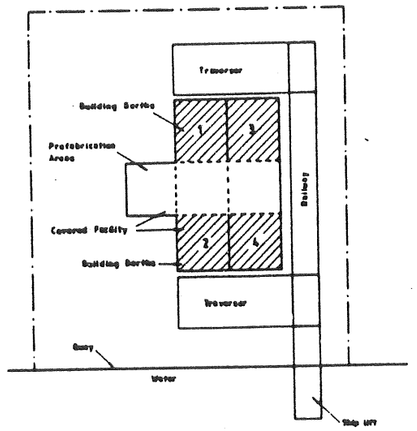
Ett fåtal studier avseende realisering av vågkraftverk finns rapporterade. Några av dem refereras nedan.

Contouring rafts (Heathrow-konferensen, 1978)

En studie har gjorts som avser produktion och installation av vågkraftverk av typen contouring rafts (se avsnitt 5.2.2).

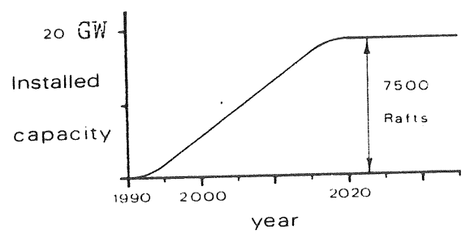
Produktionen sker i en fabrik med en kapacitet av 24 flottar/år och pågår tills totalt 600 flottar är byggda efter 25 år då det är dags att ta de första flottarna ur drift. Efter 25 år blir det således enbart aktuellt att ersätta gamla flottar.

I figur 5.6.1 skisseras en fabrik med årskapaciteten 48 flottar. Investeringen är beräknad till £ 40 miljoner vilket motsvarar £80000 per producerad flotte.



Figur 5.6.1 Fabrik för produktion av 48 Gontouring rafts per år.

Figur 5.6.2 visar tillväxten av installerad effekt under en 30-års period. Diagrammet förutsätter sex fabriker à 60 flottar per år. Innan en sådan utbyggnad kan börja krävs minst 10 års provdrift.



Figur 5.6.2 Exempel på installation av vågkraftverk.

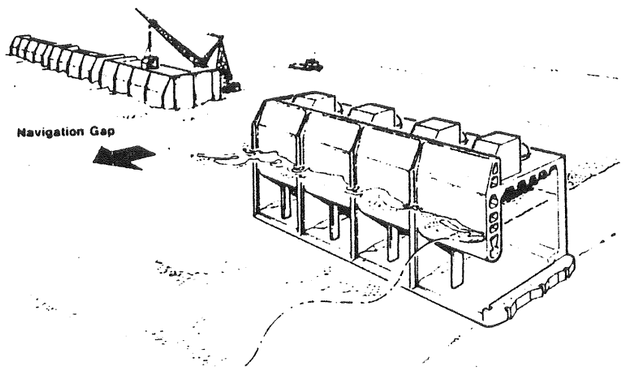
Man har funnit att de befintliga brittiska varven är för små för att i detta sammanhang kunna tillgodogöra sig gynnsamma effekter av produktion i stora serier.

Underhållet sker dels genom rutinkontroller mha ett elektroniskt system dels genom regelbundet återkommande (ca 1 års intervall) visuella inspektioner med speciellt utrustade arbetsbåtar.

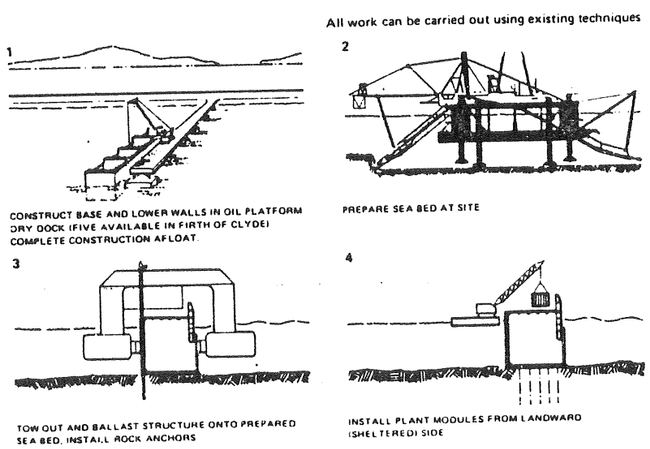
I nödsituationer i hårt väder utnyttjas speciella båtar.

The NEL Breakwater-OWC

Kraftverket byggs nära den avsedda platsen och bogseras ut mha en jättelik katamaran till en botten som avplanats från en jack-up-rigg. Vissa delar av kraftverket t ex enheter med turbin och generator installeras som moduler. Se figur 5.6.3.



The NEL Breakwater Type Wave Piston (March 1980 Reference Design)



Figur 5.6.3 The NEL Breakwater-OWC med installation.

Från de norska projekten finns en relativt detaljerad beskrivning av hur de tre olika projekten skall realiseras. I samtliga fall avses en installerad effekt på 200 MW som skall byggas på 5 år.

Bojkraftverk enligt Budal & Falnes

Utformningen av bojen framgår av figur 5.2.43 i avsnitt 5.2.2.

Skrov och stång byggs med konventionella metoder som tillämpas på skeppsvarv. De monteras i sektioner i en svetshall eller på en bädd. Turbin och generator monteras innan sektionerna svetsas samman. Bojen lastas på en pråm som bogseras ut till installationsplatsen. En 10 000 tons pråm kan ta 9 bojar.

Gravitationsankaret görs i betong och kopplas samman med universalleden innan det bogseras ut.

Bojen lyftes med en kran och kopplas samman med förankringsstången som hålles av två bogserbåtar.

Installationen bör ske under sommarhalvåret.

Anläggningens komplexitet med många rörliga delar kräver ett fortlöpande underhåll av omfattningen 9 mandagar/månad.

Varje år görs dessutom på plats en grundlig översyn omfattande Non Destructive Testing (NDT) rengöring och justering. Omfattningen av arbetet är ca 36 manveckor per boj.

Vart femte år tas bojen iland för kontroll och reparation. Detta utförs på verkstad bestående av en hall samt en kaj med 25 m vattendjup. Verkstaden beräknas sysselsätta 370 personer. Varje boj ligger 6 veckor på verkstad.

Ovan angivna underhållsåtgärder avser ej den senaste boj-generationen. För denna bedöms underhållets omfattning bli betydligt mindre.

Fokuseringsanläggning

Se figur 5.2.45 i kapitel 5.2.2.

Linselementen byggs i moduler på varv. Modulerna monteras sedan till linselement i en docka. Denna skall kunna klara 5 linselement samtidigt. Byggnadstiden beräknas till 6 månader. På 4 år kan då 40 element byggas. Erforderlig arbetsstyrka uppgår till 670 st.

Elementen bogseras med 2 bogserbåtar. Ankarsystemet består av 6 dragankare och kätting. Installation sker med två speciellt utrustade fartyg. Bogsering och installation beräknas under sommarhalvåret ta drygt tre dygn per element.

Energiupptagningen sker i kilformade rännor med överfall. Byggandet utgör konventionell teknik och omfattar sprängnings-, muddrings- och betongarbeten samt installation av vattenkraftverk. En stor del av sprängningen utgörs av tunnelarbeten. Dessutom måste en väg och en kaj anläggas.

Inget fortlöpande underhåll krävs. Däremot görs årligen NDT, rengöring samt kontroll av ankarnas position. NDT utförs enligt ett speciellt program med en fjärrstyrd farkost (RCV) och beräknas ta 4 år i anspråk för hela kraftverket.

Rengöringen av linselementen görs med RCV utrustad med borstar eller högtryckspumpar.

Vart 18:e år demonteras linselementen och ses över i docka. Likaså kontrolleras kätting och ankare.

För demonteringen och upplyftning av kätting och ankare erfordras en pontonkran för 200 ton.

En 18-års kontroll beräknas ta 16 dagar i anspråk.

Svingende vannsøyle

Se figur 5.2.49 i kapitel 5.2.2.

Botten och väggar gjuts till tillräcklig höjd för att uppnå flytstabilitet. Detta sker i 3 st torrdockor som kan bygga vardera 2 sektioner åt gången. Dockorna är utsprängda i berget och har en kanal ut till havet.

Konstruktionen fullbordas i flytande tillstånd. Vid en kaj med 25 m vattendjup och plats för 8 enheter. Härvid måste omvandlarnas sidoöppningar vara förslutna.

När gjutningsarbetena är klara monteras all elektrisk och mekanisk utrustning. Totalt tillverkas 50 enheter. Den erforderliga arbetsstyrkan är 800-850 man.

Enheterna bogseras till anläggningsområdet och sänks med barlast. Därefter sker injicering och ytterligare belastning med barlast.

Efter nedsättning öppnas åter sidoöppningarna.

Före nedsättning måste botten ha avjämnats. Runt konstruktionen utläggs erosionsskydd. Grunden måste ha god bärförmåga t ex berg eller grus.

Den ursprungliga bottnens lutning har stor betydelse för kostnaden.

Underhåll och drift finns värderade i en särskild rapport som fn ej är tillgänglig.

Scenario i NE:s utvärdering

I Hardell & Ganander (1981) skisseras i ett scenario hur realisering av ett bojkraftverk skulle kunna ske. Modellen används samtidigt för beräkning av energikostnaden.

Som exempel används ett kraftverk som beskrivs i GR:29. Målsättningen är att till år 2000 ha byggt ut kraftverk för en årlig produktion av 1 TWh/år. Kraftverken lokaliseras till området öster om Gotland.

De första 10 åren ägnas åt optimeringsstudier, prov med försöksaggregat och pilotanläggning samt upphandling.

Därefter byggs produktionsanläggningar som tillverkar bojarna. Dessa tas sedan succesivt i drift.

Produktionsanläggningen förläggs till Slite som har hamn och cementindustri. Anläggningen dimensioneras för en produktion av 1500 bojar per år. 9000 bojar behövs totalt varför fabriken utnyttjas för produktion i 6 år. Därefter kan den användas för ersättningsproduktion och reparationer.

Bojarna mellanlagras (vinterproduktionen) i en stor hamnbassäng.

Produktionen sker på två linjer för bojtillverkning och en station för tillverkning av betongankare.

Under produktionstiden uppgår den totala arbetsstyrkan till 137 man.

Bojarna görs i betong med installationer i stål.

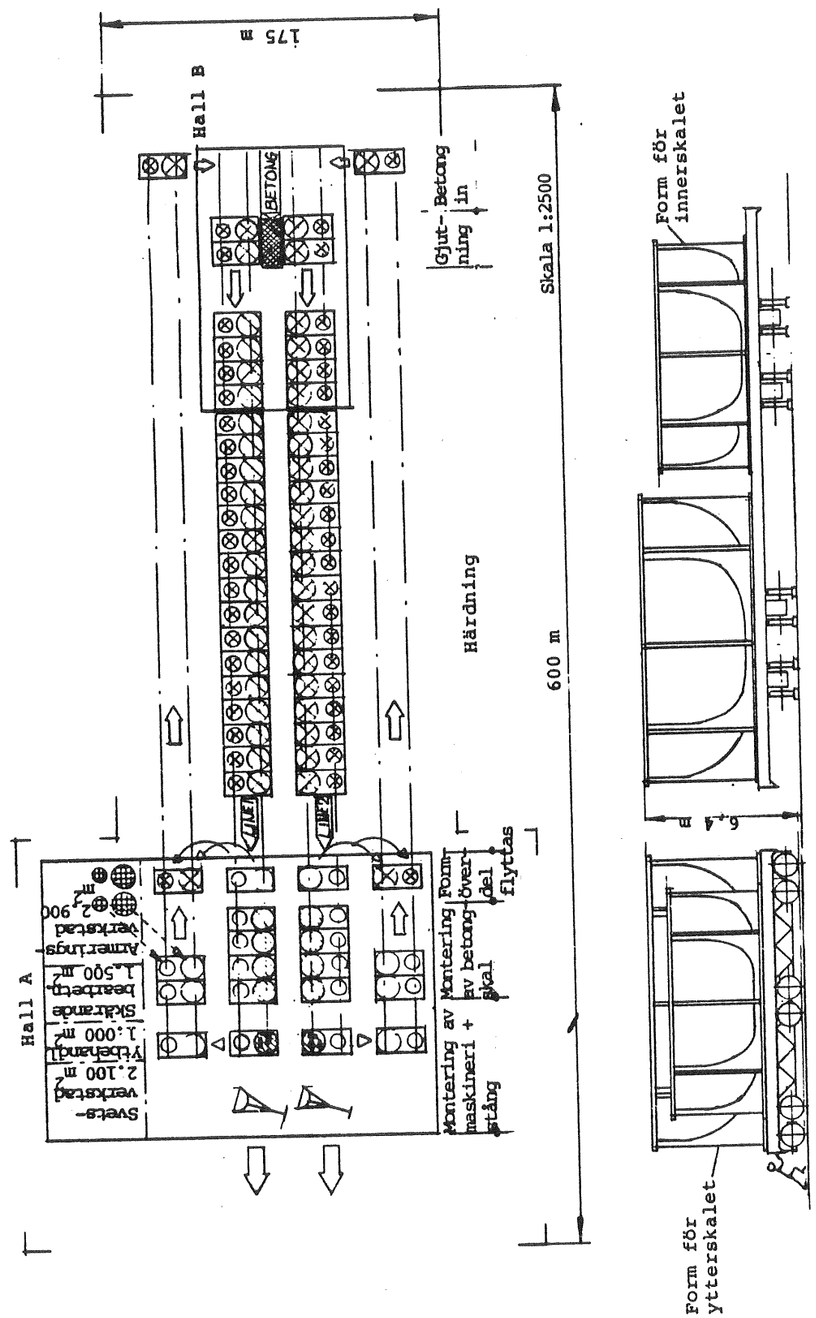
Figur 5.6.4 visar hur produktionsanläggningen ser ut.

Installationen kan ske i följande ordning

Betongankare
- Lastning på transportpråm med hamnkran
- Bogsering av transportpråm till ankringsplats
- Iläggning av betongankare från transportpråm medelst ankarspel.

Bojar
- Lastning på transportpråm med hamnkran
- Bogsering av transportpråm till ankringsplats
- Sjösättning av bojar med pontonkran
- Bogsering av enskild boj till markerad plats
- Angöring och anslutning av elkabel.

Underhållet utgörs av ett årligt inspektions- och servicebesök vid varje boj samt stor översyn i verkstad för varje boj en gång vart fjärde år.



Figur 5.6.4 Produktionsanläggning för bojar.

5.7 Kostnader

5.7.1 Principer för kostnadsberäkning

Målet för en kostnadsberäkning i vågkraftsammanhang är i regel att så väl som möjligt bestämma energikostnaden uttryckt i kr/kWh.

Andra intressanta jämförelsetal är investeringskostnaden uttryckt i samma enhet samt investeringskostnaden relaterad till installerade effekten - kr/kW.

Eftersom vågkraftverk är stora anläggningar som kan ta flera år att bygga ut är det även intressant att belysa det årsvisa investeringsbehovet under utbyggnadsperioden.

Utöver de rena kostnadsberäkningarna har det också ett intresse att studera energiåterbetalningstiden dvs den tid det tar att producera lika mycket energi som åtgick för att bygga kraftverket.

I det följande diskuteras i första hand energikostnaden.

För att bestämma denna måste i princip två olika beräkningar göras

- årskostnaden för kraftverket
- årsproduktionen av energi från kraftverket varav

$$\text{energikostnad} = \frac{\text{årskostnad}}{\text{årsproduktion av energi}}$$

Årskostnad

Årskostnaden $k_å$ kan uppdelas i tre delar

- kapitalkostnad k_k
- underhållskostnad k_u
- driftskostnad k_d

$$k_å = k_k + k_u + k_d \qquad \ldots(5.7.1)$$

Kapitalkostnad

Kapitalkostnaden beräknas oftast med en annuitetsmetod vilket innebär att kostnaden för avskrivning och räntor fördelas lika över hela avskrivningstiden.

Härvid räknas med en viss kalkylränta. När effekten av inflationen beaktas benämner man ofta räntan för "realränta". Nivån på denna är för närvarande 6-8%, även om i regel 4% hittills använts.

Om investeringen är K kr, räntan p % och avskrivningstiden (livslängden) n år erhålles den årliga kapitalkostnaden till

$$k_k = K \cdot p \frac{(1 + p)^n}{(1 + p)^n - 1} \qquad \ldots(5.7.2)$$

Eftersom ingen erfarenhet av livslängden hos vågkraftverk finns inrymmer uppskattningen av denna stora osäkerheter. Vissa jämförelser kan göras med andra konstruktioner i havsmiljö t ex fartyg, hamnanläggningar , fyrar, offshore konstruktioner mm.

Man kan välja mellan att använda formel 5. för kraftverket som helhet eller för separata delar av detsamma. I det förra fallet ingår då utbytta komponenters kostnad i underhållskostnaden medan i det andra fallet enbart kostnaden för själva utbytesmomentet utgör underhållskostnad.

Kraftverket beräknas att tas ur drift efter avskrivningstidens slut. Vissa komponenter kan då fortfarande ha ett värde, t ex skrotvärde hos vissa metaller. Kapitalkostnaden K i formel 5. skall i så fall minskas med detta värde.

Investeringskostnader

Dessa kostnader utgör en summa av kostnader för produktionsanläggningar, produktion av kraftverk samt installation av kraft-

verk.

Kostnaderna för produktionsanläggningarna består dels i kapitalkostnaden för investeringen dels personalkostnader. Med denna uppdelning utgörs produktionskostnaden av enbart materialkostnader.

Installationskostnaden omfattar kapitalkostnaden för investeringar i form av specialfartyg mm samt personalkostnader för besättning, dykare m fl. Alternativt kan man räkna med en hyreskostnad om erforderliga fartyg finns att tillgå. Hit kan man även välja att räkna materialkostnaden för vissa delar av förankring och energisamlingssystem.

En sofistikerad kostnadskalkyl kompliceras av att produktionen av kraftverk pågår under flera år och samtidigt som idrifttagandet påbörjas. För att ta hänsyn till sådana förhållanden måste andra beräkningsmetoder t ex "cash-flow" - se nedan tillgripas.

Underhållskostnad

I brist på erfarenhetsvärden beräknas denna kostnad enligt någon av följande tre metoder

- som ett procentuellt pålägg på kapitalkostnden. Storleken på detta pålägg är svår att avgöra. Britterna använder 3% medan forskningsgruppen använt 8-10 %.
- som ett differetierat procentuellt pålägg, olika på olika delar av kraftverket, på respektive kapitalkostnadandel
- genom beskrivning och kostnadsberäkning av förutsedda underhållsåtgärder.

Man måste ha klart för sig att graden och arten av underhåll återkopplas på både kapitalkostnad och energiproduktion. Sålunda kan en dyrare komponent löna sig genom längre livslängd och längre underhåll.

Minskat underhåll - lägre underhållskostnad - kan även leda till sämre funktion hos kraftverket - lägre energiproduktion, särskilt genom bortfall vid reparation.

Optimeringen kan som synes bli omfattande och svår.

Underhållet kan uppdelas på olika nivåer

- regelbunden service
- återkommande genomgripande kontroller
- reparationer

Ett av problemen är att avgöra hur stora kostnader som skall läggas ner på att förebygga underhåll.

Driftskostnad

Karakteristiskt för vågkraftverk är den i det närmaste försumbara driftskostnaden. Eftersom service inbegripits i underhållet utgör driftskostnaden enbart kostnad för administration. Denna beräknas lämpligen genom uppskattning av antalet anställda personer och kostnaden för dessa.

Diskonterad cash-flow

En noggrannare metod för kostnadsberäkning är den sk Cash-flow-metoden. Härvid bestämmer man den årsvisa kostnaden under avskrivningstiden och diskonterar den till nuvärde. Samtidigt bestämmer man den årsvisa energiproduktionen som även den diskonteras.

Kvoten av de ackumulerad värden för kostnad resp energiproduktion ger sedan energikostnaden.

Metoden illustreras närmare i avsnitt 5.7.3.

Inverkan av serietillverkningseffekt

Om många lika komponenter tillverkas sjunker vanligtvis kostnaden. Man kan ta hänsyn till denna "serietillverkningseffekt" genom att kostnaderna reduceras genom multiplikation med faktorn

$$\alpha = n^{-b} \qquad \ldots(5.7.3)$$

där n är antalet tillverkade enheter

$$b = \frac{\log \frac{1}{r}}{\log 2} \qquad \ldots(5.7.4)$$

där r anger med vilken faktor kostnaden minskar vid en fördubbling av antalet tillverkade enheter.

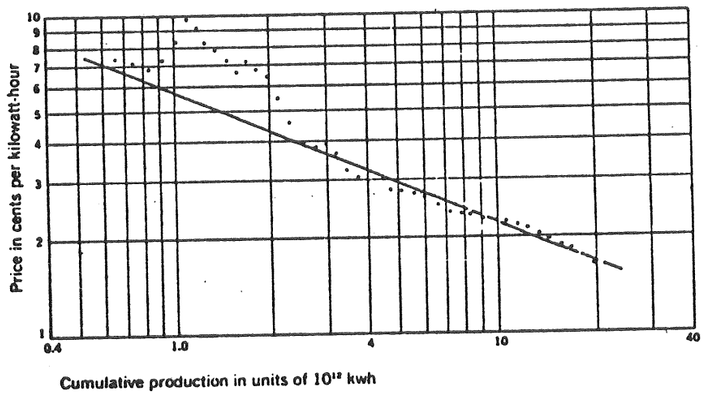
Om t ex r = 0.85 blir b = 0.2345

Man anser att kostnaden ej minskar ytterligare när antalet tillverkade enheter överstiger

$$n = \frac{1}{\left(\frac{1}{0.992}\right)^{1/b} - 1} \qquad \ldots(5.7.5)$$

r torde anta lägre värden för arbetskostnadsposter (0.90-1.00) än för materialkostnadsposter (0.95-1.00).

I en amerikansk rapport (Fischer, 1974) redovisas hur kostnaderna sjunkit för elenergi.

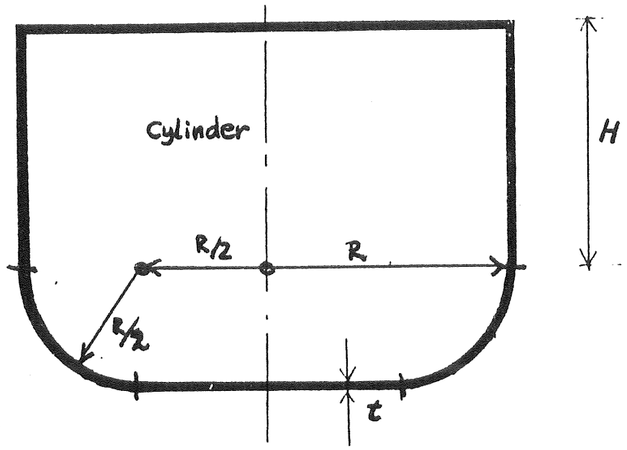


Figur 5.7.1 Erfarenhetskurva för pris på elektricitet i USA 1926-1970. Trenden är 25% minskning av elpriset för varje kumulativ fördubbling av produktionen. Den markanta avvikelsen inträffade under den stora depressionen. Ett likartat förhållande gäller för bensinpriset (1919-1969).

Nedan visas ett exempel på hur kostnaden för produktion av betongbojar minskar med antalet producerade bojar.

Minskningen beror främst på att de fasta kostnaderna på betonggjutformar kan slås ut på alltfler bojar (200 à 1000 st).

Figur 5.7.2 visar den i exemplet beräknade bojen och figur 5.7.3 visar hur kostnaden sjunker. Bakom kurvan ligger vissa antaganden som inte påverkar principen. Kalkylen bygger på priser lämnade av en större entreprenadfirma.

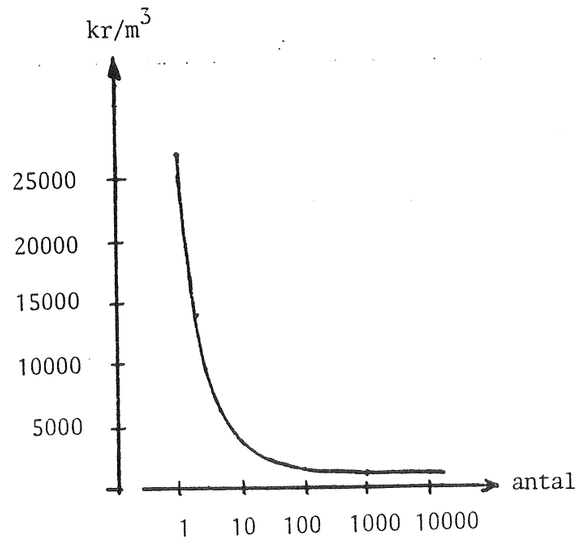


Volymer:

Tak	V_1	$= t \cdot R^2 \cdot \pi$
Cylinder	V_2	$= t \cdot R \cdot 2 \cdot \pi \cdot H$
Botten	V_3	$= t \cdot R^2 \cdot \frac{\pi}{4}$
Dubbelkrökt yta	V_4	$= \frac{\pi^2}{4} \left(\frac{2}{\pi} + 1 \right) \cdot t \cdot R^2$

t=0,1 m, R=H=4m, 75 kg armering per m^3 betong.
En yttre och en inre stålform förutsätts. Bojen gjutes upp och ned.

Figur 5.7.1 Betongboj.



Figur 5.7.2 Kostnadsreduktion vid ökat antal bojar.

5.7.2 Utförda kostnadskalkyler

Efter hand har antalet uppgifter om energikostnaden för olika typer av omvandlare blivit ganska stort. Trots detta har ännu ingen kalkyl presenterats som till alla delar på ett nöjaktigt sätt redovisar energikostnaden och dess fördelning på olika kostnadsbärare.

Kostnadskalkyler som utförts av olika intressegrupper går i regel inte att jämföra därför att syftet med beräkningarna eller förutsättningarna för de samma varit helt olika. Det skulle onekligen vara en fördel om man kunde enas om en internationell praxis för kostnadsberäkningar.

Som exempel på olika syften kan nämnas följande

- att identifiera kostnadens fördelning på olika kostnadsbärare.

- att försöka göra en uppriktig uppskattning av energikostnaden.

- att jämföra olika typer av omvandlare.

Man finner vid en genomgång av gjorda kalkyler att inställningen till projektet har stor betydelse. Sålunda anger i regel forskningsgrupperna lägre kostnader än vad t ex oberoende institutioner gör medan kalkyler utförda av intressenter för den etablerade kärnkrafts- eller vattenkraftstekniken anger ännu högre kostnader.

Nedan följer en förteckning över ett antal redovisade kostnadskalkyler. Så långt möjligt anges syftet med undersökningen, årtal, undersökare mm.

Energikostnaderna anges i öre/kWh. Följande kurser har använts

1 £ = 1000 öre (1p=10 öre)
1 = 2,5 öre
1Nkr= 95 öre
1Dkr= 79 öre
1$ = 475 öre

Koncept	År	öre/kWh	Anmärkning	Källa
Små bojar	1977	19-25	Underhåll 5-10%, 11% annuitet	NE 1977:4
The Cockerell Raft System	1978	48	Grov kalkyl av EUROCEAN 15% annuitet, inga installationskostnader	EUROCEAN STUDY 1978
Kaysers boj	1978	48	"	"
Salter duck	1978	35	"	"
Masuda ring buoy	1978	107	"	"
Masuda small buoy	1978	45	"	"
Törnkvists omvandlare	1978	33	"	"
Fokuseringsanlegg	1978	6-18	10% av investeringen	SI-rapport 770138, Bølgekraftverk, basert på fokusering av Havdønninger
Kopplade bojar	1979	20-40	11% annuitet, 5% underhåll	GR:16
Flytande NEL OWC	1979	35-55	11% annuitet, 8% underhåll	GR:16
Petropumpar	1979	20-30	11% annuitet, 5% underhåll	GR:16
Fokuserings-anläggning	1980	10-18	7%, 30 år, 2% drift,	Semesteroppgave i NVSH nov 1980
Bojar, NTH	1980	21-32	7% ränta, 25 år, kablar 10%, drift 5%	"
Salter duck	1980	16-110	Annuitet 10%, ej underhåll, gynnsamma förhållanden 20% verkningsgrad	Bølgeenergimaskiner, Kim Nielsen dec 1980
Kim Nielsens	1980	17-55	"	"

Koncept	År	öre/kWh	Anmärkning	Källa
B&F	1980	12-36	"	"
Kaimei-typ	1980	16-88	"	"
Kopplade bojar	1980	20-27	Examensarbete, 11% annuitet Underhållskostnad 5%, Ofullständig beräkning av kostnader för utläggning.	GR:29
Lancaster flexible bags typ 1979	1981	35-47 60	Forskningsteamets uppskattning Beräkning av konsulter	Offshore Engineering jan 81
Bristol oscillating cylinder typ 1979	1981	50-100 140	Forskningsteamets uppskattning Beräkning av konsulter	"
NEL OWC typ 1979 på botten	1981	100-110 130	Forskningsteamets uppskattning Beräkning av konsulter	"
Vickers Twin OWC	1981	60	Forskningsteamets uppskattning	"
Vickers point absorber	1981	120	"	"
Vickers Chamber	1981	60	"	"
Belfast Buoy typ 1979	1981	80 120	Forskningsteamets uppskattning Beräkning av konsulter	"
Salter duck typ 1979	1981	45-56 100	Forskningsteamets uppskattning Beräkning av konsulter	"
Clam	1981	60	Forskningsteamets uppskattning	"
Cockerell raft typ 1979	1981	90 120	Forskningsteamets uppskattning Beräkning av konsulter	"
HRS rect 1978	1981	>500		"
Petropump	1981	20-40	Annuitet 6,4%, underhåll och drift 12%	Intern rapport för Svenska Varv

Koncept	År	öre/kWh	Anmärkning	Källa
Budal & Falnes' "point absorber" Modell M2	1981	475-855	Mycket stora underhållskostnader antagna Beräkning av konsulter	Evaluering av Bølgekraft del I NVE, Sept 1981
Budal & Falnes' "point absorber" Modell M3	1981	36	Forskningsgruppens beräkning. Underhålls-kostnad 3%, kapitalkostnad 7%.	Wave Power Conversion by by Point Absorbers a Norwegian Project NTH, Dec 1981
Fokuserings-anlegg	1981	475-665	Beräkning av konsulter	Evaluering av Bølgekraft del I, NVE Sept 1981
Svingende vannsøyle	1981	240-760	Beräkning av konsulter	Evaluering av Bølgekraft delI NVE, Dec 1981
Budal & Falnes' "point absorber" Modell M3	1981	133	Beräkning av konsulter	Evaluering av Bølgekraft delI NVE, Dec 1981
Fokuserings-anlegg	1981	162	Beräkning av konsulter	Evaluering av Bølgekraft delI NVE, Dec 1981
Svingende vannsøyle	1981	124	Beräkning av konsulter	Evaluering av Bølgekraft delI NVE, Dec 1981
NEL OWC	1981	228	Beräkning av konsulter	Evaluering av Bølgekraftverk del VI NVE, Dec 1981
Kaimei	1981	200 225	10% ränta, 30 år, 10 år för ankare och ventiler	RR:29
NEL typ 1978	1981	470	10% annuitet och underhåll Beräkning av konsulter	RR:29

Koncept	År	öre/kWh	Anmärkning	Källa
NEL typ 1979	1981	130		RR:29
Contouring raft typ 1978	1981	360	"	RR:29
Contouring raft typ 1979	1981	120	Beräkning av konsulter	RR:29
Salter Ducks typ 1978	1981	390	"	RR:29
Lancaster flexible bags typ 1978	1981	100	"	RR:29
Lancaster flexible bags typ 1979	1981	62	"	RR:29
HRS rectifier typ 1978	1981	560	"	RR:29
Bristol Cylinder typ 2979	1981	140	"	RR:29
Lockheed Dam-atoll, typ 1979	1981	300	"	RR:29
"	1981	105	Modifierad av forskningsgruppen	RR:29
Norwegian point absorber	1981	100	Beräkning av konsulter	RR:29
Kaimei	1981	290	"	RR:29
Kopplade bojar	1981	52	Samma bojar som i GR:29	NE 1981:23
Clam	1982	40	Sea Energy Associates (SEA) har lämnat uppgiften	Offshore engi-neering Jan 1982
IPS-bojen	1982	40-110	Annuitet 6-7%, underhåll och drift 5-7%	GR:43

5.7.3 Exempel på kostnadskalkyler

Nedan visas exempel på brittiska kostnadskalkyler som utförts på två principiellt olika sätt. Den första metoden är hittills den mest förekommande beroende på att osäkerheten i många basuppgifter inte motiverar en noggrannare metod. När så blir fallet är det sannolikt lämpligare att använda metoden med "discounted cash flow" som också beskrives i ett exempel. En jämförelse mellan de två metoderna visar tillfredsställande överensstämmelse. Exemplen finns närmare beskrivna i RR:29.

1979 LANCASTER FLEXIBLE BAG - 2000 MW STATION

Number of units 435

	£M
STRUCTURAL COSTS	
Provision of construction facility	20
Construction of 435 bag units	240
Bag material and fabrication	290
	550
MECHANICAL COMPONENTS	
Turbines	505
Valves	120
Alternators	135
Mechanical and Electrical auxiliaries	20
Engineering Development	100
Ducts louvres and valves	120
	1000
MOORING AND INSTALLATION	
Tow out and moor	15
Mooring lines	100
Anchorages	85
Vessels and tugs	10
Quays and Navigation Aids	10
	220
POWER COLLECTION AND TRANSMISSION	
Submarine cables	60
Transformer and rectifiers	40
HVDC Cables	80
Substation	95
Inverters	130
Overhead transmission line	85
Communication and control	10
	500
SUB TOTAL	£ 2270M
Contingency	£ 330M
TOTAL CAPITAL	£ 2600M

ANNUAL OUTPUT

Wave energy at site	47.5	kw/m
Site correction factor	1.1	
Directional factor	0.83	
Device capture efficiency	28	%
Power chain efficiency	61	%
Reliability	82	%

Hence mean output in typical year = 480 MW

Mean annual output = 4.2 Twh

Cost of Energy $\frac{2600 \times 10^6 \times 0.1 \times 100}{4.2 \times 10^9}$ = 6.2p/kwhr

TABLE

year	factory cost	struct cost	mech compts	power coll & trans	inst & mooring	maint cost	conting	total per yr	pv	cum total	cum pv	output MWy	cum output	pv	cum pv
0	25		117	47				189	189	189	189	0	0	0	0
1	25		117	80				222	211	411	400	0	0	0	0
2	12		117	100			12	241	218	652	617	0	0	0	0
3		149	117	100			12	378	324	1030	941	0	0	0	0
4		120	117	100	70	15	12	434	353	1464	1295	61	61	50	50
5		120	117	100	70	31	12	450	348	1914	1643	122	183	94	144
6		120	117	80	70	46	12	445	327	2359	1970	183	366	135	279
7		120	117	80	70	62	12	461	322	2820	2292	244	610	170	449
8		120	117	80	70	77	12	476	316	3296	2608	305	915	202	651
9		120	117	80	70	92	12	491	309	3787	2917	366	1281	231	882
10		120	117		70	108	12	427	256	4214	3173	427	1708	256	1138
11					76	123	12	211	120	4425	3293	490	2198	279	1416
12						123	12	135	73	4560	3366	490	2688	265	1681
13						123	12	135	69	4695	3435	490	3178	252	1933
14						123	12	135	66	4830	3501	490	3688	239	2172
15						123	12	135	63	4965	3564	490	4158	227	2399
16						123	12	135	59	5100	3623	490	4648	216	2614
17						123	12	135	56	5235	3679	490	5138	205	2819
18						123	12	135	54	5370	3733	490	5628	195	3014
19						123	12	135	51	5505	3784	490	6118	185	3199
20						123	12	135	48	5640	3832	490	6608	176	3374
21						123	12	135	46	5775	3878	490	7098	167	3541
22						123	12	135	44	5910	3922	490	7588	159	3700
23						123	12	135	41	6045	3963	490	8078	151	3850
24						123	12	135	39	6180	4003	490	8568	143	3994
25						123	12	135	37	6315	4040	490	9058	136	4129
26						123	12	135	36	6450	4076	490	9548	129	4259
27						123	12	135	34	6585	4110	490	10038	123	4382
28						123	12	135	32	6720	4142	490	10528	117	4499
29						108	12	120	27	6840	4169	427	10955	96	4595
30						92	12	104	22	6944	4191	366	11321	79	4674
31						77		77	16	7021	4207	305	11626	62	4736
32						62		62	12	7083	4219	244	11870	47	4783
33						46		46	8	7129	4227	183	12053	34	4817
34						31		31	5	7160	4233	122	12175	21	4838
35						15		15	2	7175	4235	61	12236	10	4848
	62	989	1287	847	566	3075	348			7175	4235		12236		4848

cum = ackumulerat

pv = nuvärde (present value)

till nuvärde diskonterad kostnad

till nuvärde diskonterad energiproduktion

COMPARISON OF METHODS FOR DETERMINING COST OF CAPITAL

Here we compare the 'simple' financial analysis (total non-discounted capital cost and contingency, analysed at 7% p.a. + 3% p.a. for maintenance, divided by expected annual output) with a discounted cash flow analysis, which inlcudes the following factors (see Table).

- 5% discount rate
- construction of a factory over three years
- construction of converters for seven years
- initial mooring and installation costs
- a contingency of 9.3% on the total construction and installation costs.
- maintenance costs of 3% p.a. of the total costs (including contingency.
- an average converter life of 25 years.

(All costs in £M unless otherwise stated).

For the simple calculation:

Factory + structure + mechanical components + power collection and transmission + moorings and installation = 62 + 989 + 1287 + 847 + 566 = 3751

contingency @ 9.3% = 348

sub total = 4099

annual cost @ 10% (7% annualising factor + 3% maintenance) = 409.9

average annual output 490 MW = 4.28 TWh

energy cost $= \frac{409.9 \text{ (£M)}}{4.28 \text{ (TWh)}}$ = 9.6 p/Kwh

For the discounted cash flow analysis:

net present value of total = 4235 (£M)

net present value of total energy produced = 4848 (MWh) = 42.5 TWh

energy cost $= \frac{4235 \text{ (£M)}}{42.5 \text{ (TWh)}}$ = 9.97 p/KWh

So it can be seen that the simple method of costing gives a very similar result to the discounted cash flow method.

5.8 Referenser

Savonius SJ, The S-Rotor and it's Applications. Mech Eng, 53, (5), May 1931

Dhaille R (1956): Technique et rentabilité des dièdres à houle. Les énergies de la mer. Quatrièmes journées del´ hydraulique, Paris 13, 14 et 15 juin 1956.

Remeneiras G (1956): Augmentation de la hanteur d'une onde de translation se déplacant dans un canal convergent. Les énergies de la mer. Quatrièmes journées del hydraulique, Paris 13,14 et 15 juin 1956.

Eurocean Study, 1978.

Wave Energy Conference, Heathrow Hotel, London 22-23 nov 1978

First International Symposium on Wave and Tidal Energy, BHRA, Canterbury 1978.

Mehlum E, Stamnes J (1978): Bølgekraftverk basert på fokusering av havdønninger. SI-rapport 770138.

Salomon RE, Harding SM (1978): Gas Concentration Cells for the Conversion of Ocean Wave Energy, Ocean Engineering.

Ocean Energy Development Co Ltd (1978): Vertical Oscillating-type Wave-activated Generating Systems.

Wave Energy, Energy Paper No 2, Department of Energy, London 1979.

Power from Sea Waves, The Institute of Mathematics and it's Applications, University of Edinburgh, 1979.

First Symposium on Wave Energy Utilization, CTH, Gothenburg, 1979.

Erenmalm T, Mårtensson N (1980): Utbyggnad av vågenergi för Gotland. Effektvariationer och utjämningsmöjligheter. Examensarbete vid inst för Vattenbyggnad, CTH.

Second International Symposium on Wave and Tidal Energy, BHRA, Cambridge, 1981.

Budal K, Falnes J (1981): Wave Power Conversion by Point Absorbers, A Norwegian Project, Division of Experimental Physics, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim.

Evaluering av bølgekraft del I, NVE, sept 1981.

Evaluering av bølgekraft del II, NVE, dec 1981.

Andreasson 1, Sjöström B-O (1981): Uppbyggnad av ett system för simulering av vågkraftverk. Institutionen för elektromaskinlära, CTH.

Rosland A, Thu G, Vedeld T (1981): Bølgekraft. En aktuel energikilde? Notat nr 3/1981, Institutt for skogøkonomi, Norges landbrukshøgskole.

Wave Energy: Main UK Contenders Line up for 1982 Decision, Offshore Engineer, jan 1981.

Vågenergi i Sverige: NE 1977:4

Akvatisk Energi: NE 1981:16

Utvärdering av Vågenergi. Förslag till fortsatta insatser: NE 1981:23.

Se även GR:15, GR:16, GR:29, GR:33, GR:34, GR:40, GR:41, GR:42, GR:43, RR:29.