

Fakta OM Bølge- energi

- en bog om udnyttelse af bølgekraft



Energy Centre Denmark
Energicenter Danmark



Indhold

Forord	3
Hvordan opstår bølger? - af Michael Arnskov	4
Havbølger i den danske del af Nordsøen - af Kim Nielsen	6
Hvordan kan bølgeenergien udnyttes? - af Carl Erik Vad Bennetzszen	8
Fire danske koncepter - af Carl Erik Vad Bennetzszen	10
Internationale aktiviteter - af Carl Erik Vad Bennetzszen	14
Afprøvningsfaciliteter - af Kim Nielsen	17
Økonomi i udvalgte anlæg - af Kim Nielsen	19
Bølgeprogram/bølgeforening	22
Ordforklaring	23

Fakta om bølgeenergi

Udarbejdet af: Energicenter Danmark med støtte fra Energistyrelsen
Redaktion: Iben Østergård, Kim Nielsen og Niels I. Meyer
Fosidefoto (bølge): FOCl Image Library
Layout: BioPress
Tryk: CS Grafisk
Oplag: 2.000 stk.
ISBN: 87-90074-13-0

Publikationen kan rekvireres hos:
Energistyrelsen, informationsafdelingen
Amaliegade 44, 1256 København K
telefon: 33 92 67 00, e-post: ens@ens.dk

Bølgekraftforeningen, att. Stig Vindeløv
Kammergårdsvej 16B, 7760 Hurup
e-post: wave@mail.mira.dk

Eftertryk kun tilladt med tydelig kildeangivelse

Forord

Mange, der har stået på en strand i stormvejr og betragtet de store bølger, som kommer rullende ind mod kysten, er sikkert blevet grebet af tanken om, hvordan disse vældige kræfter kunne udnyttes til praktiske formål. For eksempel til at lave elektricitet. Det er i hvert fald en tanke, som har fascineret mange opfindere igennem tiden.

Efter energikrisen i 1973/74 er udnyttelsen af bølgeenergi blevet taget op i flere lande som Japan, Storbritannien og Norge. I Danmark har enkelte personer arbejdet med bølgekraftmaskiner, men det var først med en større bevilling fra regeringen i 1997, at der kom gang i et sammenhængende dansk udviklingsprogram under ledelse af Bølgekraftudvalget under Energistyrelsen. Princippet i dette program byggede i betydeligt omfang på de gode erfaringer, der tidligere var indhøstet med udvikling af vindkraft.

I forbindelse med udviklingsprogrammet er et halvt hundrede udformninger af forskellige bølgemaskiner blevet afprøvet og analyseret. Enkelte af disse maskiner er kommet så langt i udviklingen, at de nærmer sig en kommerciel udnyttelse. Den statslige støtte til udviklingsprogrammet ophørte med finansloven for 2002, således at videreudviklingen af de lovende bølgekraftsystemer er afhængig af støtte fra private investorer.

Denne lille bog er udarbejdet med økonomisk støtte fra Energistyrelsen. Forhåbentlig kan den bidrage til at styrke interessen for udnyttelsen af bølgeenergi.

Niels I. Meyer
Formand for det tidligere Bølgekraftudvalg

København, juli 2002

Bølgernes størrelse afhænger især af vindhastigheden, men også vanddybden spiller en rolle.



Hvordan opstår bølger?

Blæser det, dannes der bølger. Friktionen mellem de luftmasser, der bevæger sig henover havoverfladen og vandet, sætter vandet i bevægelse og skaber små bølger. Disse kaldes for kapillarbølger. I takt med at overfladen bliver mere og mere påvirket af vinden, får den mere fat i vandet. På den side af bølgen, der rammes af vinden, opstår et større tryk end på læsiden. Vinden overfører energi til vandet og danner bølger.

Af Michael Arnskov

Hvor store bølgerne bliver afhænger af flere ting: Vindens hastighed, varighed og den strækning, hvorover den blæser, afgør bølgernes størrelse. Vanddybden kan dog også spille en væsentlig rolle. Især på lavere vand betyder vanddybden meget, idet den sætter en begrænsning for, hvor store og lange bølgerne kan blive.

Den strækning, hvorover vinden blæser uhindret, kaldes for *det frie stræk*. Bølgerne vil tiltage både i højde og længde over dette stræk, hvis vinden blæser med en konstant hastighed. Aftager vinden vil bølgehøjden også aftage, mens længden af bølgerne vil fortsætte med at øges.

På dybt vand udbredes bølgerne med en hastighed, der afhænger af *bølgelængden* (afstanden mellem to toppe), mens det på lavt vand er vanddybden, der er den afgørende faktor.

Der, hvor det blæser, er bølgerne meget uregelmæssige med varierende højde og længde, ligesom bølgeretningen varierer. Som et mål for bølgeforskelene anvendes begrebet den *signifikante bølgehøjde*, der er gennemsnitshøjden af den højeste tredjedel af bølgerne.

Det forhold, at bølgerne varierer i længde, gør, at de bevæger sig med forskellig hastighed. De lange bølger overhaler de kortere og former på denne måde grupper, hvor de enkelte bølger dør ud i fronten af bølgegruppen. Ved at betragte bølgerne et stykke tid bliver disse grupper helt synlige. Energien ligger i disse grupper, der på dybt vand forplantes med en hastighed, der er det halve af hastigheden af de enkelte bølger. På lavt vand forplantes grupperne med den samme hastighed som de enkelte bølger, idet det her alene er vanddybden, der er afgørende.

Bølger beskrives normalt ved deres højde og længde, hvor højden er afstanden fra toppen til dalen. *Bølgelængden* er afstanden mellem to ens punkter på bølgen. Dette kan for eksempel være afstanden fra en bølgetop til den næste. En anden væsentlig størrelse er *bølgeperioden*, der

angiver, hvor lang tid der er imellem, at to ens punkter passerer det samme sted.

En prop, der smides i vandet, vil bevæge sig op og ned i takt med at bølgerne passerer, men den vil ikke flytte sig særlig meget. Dette skyldes, at vandpartiklerne i en bølge bevæger sig i en nærmest cirkulær bevægelse i en lodret plan. I løbet af en bølgeperiode vil partiklerne således være tilbage ved udgangspunktet.

Partiklernes bevægelse aftager hurtigt med vanddybden. På en vanddybde svarende til en bølgelængde er bevægelsen stort set reduceret til ingenting. Derfor er langt den overvejende del af bølgeenergien helt oppe ved overfladen og umiddelbart derunder.

Når vanddybden aftager, ændres partikelbevægelsens form. Bevægelsen er nu mere ellipseformet grundet friktionen mellem bølgerne og havbunden. Nede ved bunden bevæger partiklerne sig frem og tilbage. Derfor bevæger for eksempel sandkorn, muslinger og andet sig frem og tilbage på bunden i takt med bølgerne.

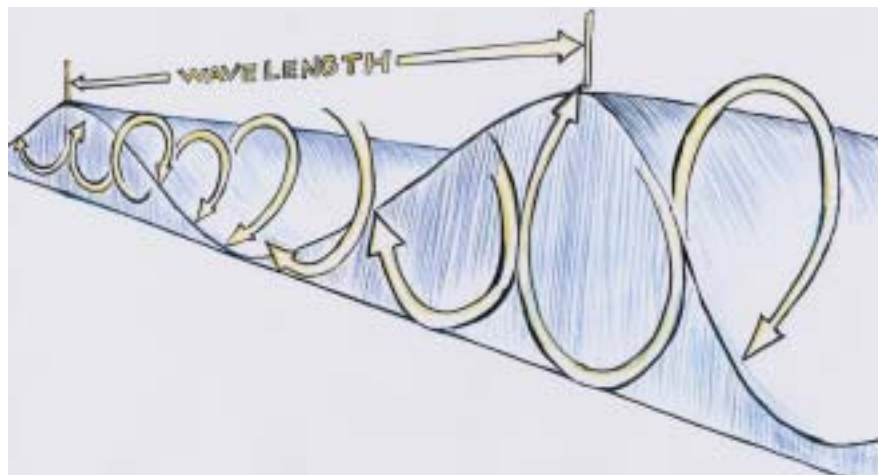
Den aftagende vanddybde påvirker bølgerne på flere måder. De bevæger sig langsommere, bliver kortere og stejlere for til sidst at bryde.

Bølger, der forlader det område, hvor de er dannede, ændrer gradvis karakter og bliver til dønninger. Dønninger er lange og mere regelmæssige bølger, der kan bevæge sig over meget lange afstande og med stor hastighed. Store dønninger kan derfor være et forvarsel om, at der er en storm på vej.

Lidt forenklet sagt er den energi, der er i bølger, proportional med bølgehøjden, mens den tilsvarende effekt er proportional med bølgehøjden ganget med bølgeperioden. Derfor er både bølgehøjden og -perioden afgørende for, hvor meget effekt der er til rådighed.



Figur 1. Når vinden blæser over en havoverflade skabes krusninger, som vinden kan overføre sin energi til. Hvis vindens blæser tilstrækkeligt længe, udvikles der bølger, som udbreder sig i vindretning og som vokser i størrelse, indtil bølgetopene bevæger sig næsten lige så hurtigt som vinden. Størstedelen af energien findes nær ved havoverfladen.



Figur 2. De enkelte vandmolekyler under bølgerne bevæges i cirkelformede baner (ved overfladen er banernes diameter ca. lig med bølgehøjden).

Havbølger i den danske del af Nordsøen

Den bølgeenergi, som årligt passerer over dansk søterritorium er beregnet til cirka 30 TWh per år.

Ekofisk *

Af Kim Nielsen

Hvis man som et regneeksempel antager, at en linie fra farvandsgrænsen i syd (ved Danfæltet) til grænsen mod Norge i nord (svarende til cirka 150 kilometer) udbygges med bølgeenergimaskiner, og at disse bølgemaskiner kan opnå en gennemsnitlig virkningsgrad på 25 procent, så vil den årlige nettoenergiproduktion udgøre cirka 5 TWh, hvilket svarer til cirka 15 procent af det nuværende danske el-forbrug.

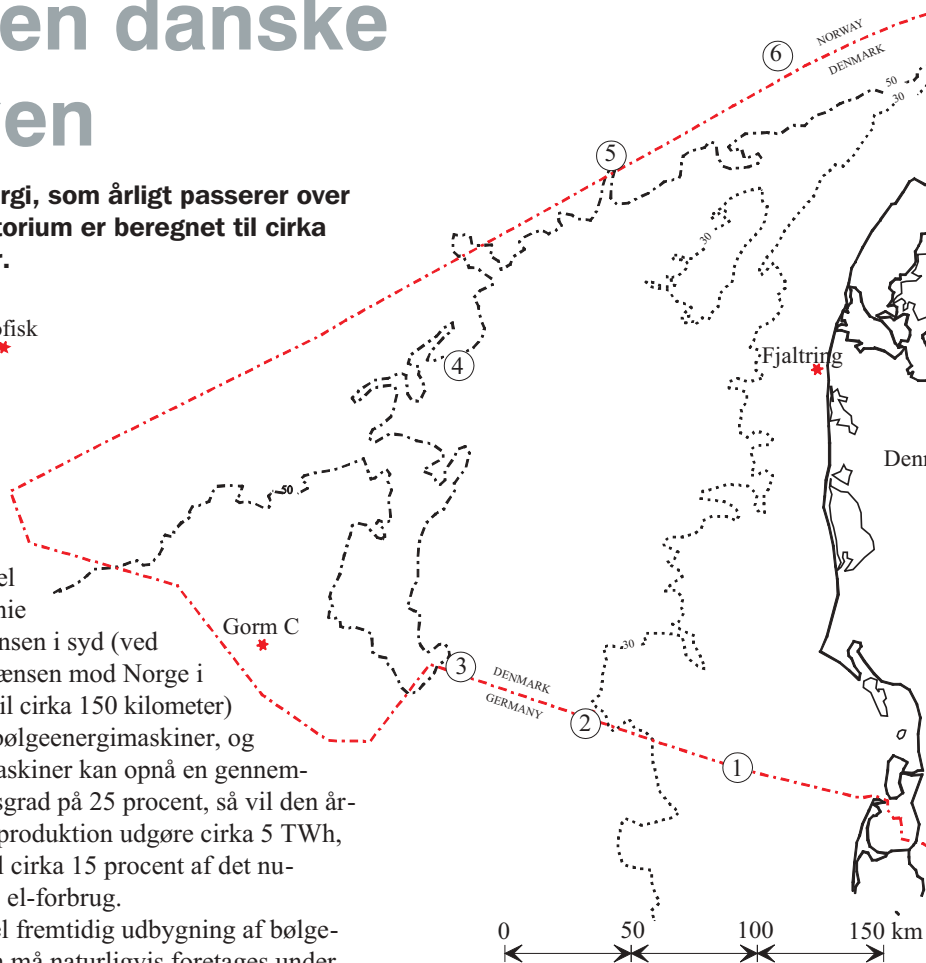
En eventuel fremtidig udbygning af bølgekraft i Nordsøen må naturligvis foretages under hensyntagen til fiskeri og sejlads, allerede eksisterende installationer som for eksempel olieplatforme, gasledninger og elkabler m.m., samt det generelle hensyn til miljøet.

På kortet i figur 1 over den danske del af Nordsøen er vist seks punkter, hvor bølgeforsøgene er beregnet (se tabel 1). Desuden er angivet henholdsvis 30 og 50 meter dybdekoter samt farvandsgrænserne mod Tyskland og Norge.

Både vanddybden og kystafstanden har betydning for lokalitetens energipotential og de maksimale bølgeforsøgene. Bølgenes årlige middeleffekt er cirka 7 kW/meter i en afstand på cirka 50 kilometer fra kysten og vokser til 17 kW/meter 150 kilometer fra kysten.

Tabel 1. Oversigt over bølgeenergi- og bølgedesignforhold i 8 udvalgte punkter i Nordsøen. Det ses, at effekten i bølgerne afhænger af kystafstand og vanddybde.

	Årsmiddel effekt (kW/m)	Kystafstand (km)	Vanddybde (m)	50 års design H_{smax} (m)
Punkt 1	7	64	20	5,7
Punkt 2	12	100	31	8,4
Punkt 3	16	150	39	9,6
Punkt 4	17	150	40	9,3
Punkt 5	14	100	58	11,4
Punkt 6	11	68	166	10,6
Fjaltring	7	4	20	6,4
Ekofisk	24	300	71	12,6



Figur 1. Oversigt over undersøgte lokaliteter.

Den største signifikante bølgehøjde, som kan optræde inden for en periode på 50 år, kaldes H_{smax} . Den er cirka 6 meter ved en vanddybde på 20 meter og cirka 10 meter ved en vanddybde på 50 meter. Det er den bølgehøjde, som et bølgeanlæg dimensioneres efter.

Bølgeeffektens variation fra år til år i perioden 1979 til 1993

Den årlige middeleffekt i bølgerne er ikke den samme fra år til år. Således var årsmiddelværdien for punkt 2 i Nordsøen 12 kW/meter beregnet for

	Middelbølgeperiode T_z (sekunder)								Sum	Procent
	2,0-3,0	3,0-4,0	4,0-5,0	5,0-6,0	6,0-7,0	7,0-8,0	8,0-9,0	> 9,0		
H_s (m) > 9,5									0	0,0
8,5-9,5							0	2	2	0,0
7,5-8,5							0	10	10	0,1
6,5-7,5							18	9	27	0,3
5,5-6,5						4	73	2	80	0,9
4,5-5,5					1	188	21		211	2,4
3,5-4,5				0	256	189	0		445	5,1
2,5-3,5			0	355	587	2	0		944	10,8
1,5-2,5		1	710	1.229	32	5	3	3	1.982	22,6
0,5-1,5	52	1.760	1.892	275	79	27	11	8	4.103	46,8
< 0,5	460	415	67	19	5	1	0		966	11,0
Sum	512	2.176	2.668	1.879	959	415	126	33	8.768	100,0
Procent	5,8	24,8	30,4	21,4	10,9	4,7	1,4	0,4	100	

Tabel 2. Diagram over hyppigheden af kombinationer mellem den signifikante bølgehøjde H_s og middelperioden T_z målt i antal timer pr. år.

hele perioden, men i 1985 var den nede på cirka 8 kW/meter og i 1990 oppe på cirka 16 kW/meter. Man kan således ikke på basis af et enkelt års målinger af en positions årlige middeleffekt umiddelbart sammenligne med andre lokaliteters bølgeenergiforhold, med mindre målingerne er foretaget inden for samme periode.



foto: biopress

Såvel børn som voksne bliver ofte fascineret af de vældige kræfter, som bølgerne indeholder.

Bølgeenergiens årstidsvariation

I vinterhalvåret er bølgeeffekten cirka tre gange så høj som gennemsnittet i sommermånederne. Dette mønster er generelt for den danske del af Nordsøen og passer godt sammen med landets energibehov.

Bølgehøjder- og bølgeperioder

Bølgeforholdene, som de optræder på en given lokalitet, belyses ofte ved et diagram, som angiver, hvor mange timer per år kombinationer af signifikante bølgehøjder (H_s) og middelbølgeperioder (T_z) forekommer. Tabel 2 viser et sådant diagram for punkt 2 i Nordsøen.

De mest almindelige middelbølgeperioder ligger i intervallet 4 til 5 sekunder og forekommer i 2.668 timer af året (30,4 procent). De mest almindelige signifikante bølgehøjder ligger i intervallet mellem 0,5 meter og 1,5 meter og forekommer i 4.103 timer af året (46,8 procent).

Bølger kommer fra forskellige retninger og de fleste bølger kommer, ligesom vinden i Danmark, fra vest og sydvest.

Hvordan kan bølgeenergien udnyttes?

Indtil videre er det fælles for alle bølgeenergi projekter, at energien skal leveres i form af elektricitet. Energien i bølgerne må derfor passere en såkaldt PTO (Power Take Off), der er et system, som omformer bølgernes energi til elektricitet.

Af Carl Erik Vad Bennetzen

Point Absorberen

Det blotte syn af bølgetoppe og bølgedale i vandring, samt bevidstheden om vandets hastighed, opdrift og kraft, inspirerer umiddelbart til opfindelser, hvis princip er baseret på flydelegemer, der løftes af opdriften, synker på grund af deres tyngde, og i løbet af en bevægelsescyklus afleverer arbejde til PTO-systemet.

En klasse af opfindelser, der virker efter dette princip, kaldes point absorberen, fordi den nærmest optager bølgernes energi i et punkt. Her har den enkelte flyder ingen udpræget lang eller kort side, og er der flere flydere, sidder disse i for eksempel stjernearrangement. Det er fordelagtigt, at PTO-systemet generelt kan arrangeres centralt, og at systemet er ufølsomt overfor variationer i bølgeindfaldsretningen, hvilket igen betyder, at fortøjningssystemet bliver ukompliceret. Til gengæld er der nok i praksis øvre grænser for størrelsen - og dermed ydeevnen - af sådanne systemer.

Linie absorbator (Line Absorber)

Der arbejdes imidlertid også med systemer, hvor de enkelte flydelegemer er udpræget langstrakte. Koblet sammen ende mod ende kan varianter af dem få et søslangelignende udseende. PTO-systemet er indbygget i samlingspunkterne. Andre varianter kan karakteriseres som rammer ("orgeltastaturer") med parallelt monterede enkeltflydere. De pågældende opfindere tænker ofte i meget store konstruktioner og tilsvarende store energiproduktioner. Maskindelene bliver ikke nødvendigvis komplicerede, men ofte mange. Det er vigtigt, at anlægget er rigtigt orienteret i forholdt til bølgeretningen.

Et anlæg med disse karakteristika omtales ofte som en linie absorbator (line absorber).

Overskylningsanlæg

Bølger, der løber ind over strande af bestemte former, eller bølger der bliver klemte inde mellem lodrette klippevægge, kan få vandoverfladen til at stige op til flere meter over gennemsnitsbølgetoppen på åbent hav. Her kan man producere elektricitet ved at aftappe disse høje vandtoppe i et reservoir og forsyne dette reservoir med afløb, hvori der skal være installeret en almindelig vandturbine med tilhørende elgenerator.

I Danmark har vi ikke den ovenfor beskrevne naturlige kysttopografi, og desuden findes det væsentligste energipotential i stor afstand fra kysten. De danske opfindere, der benytter dette system, søger derfor at udvikle flydende, forank-

Kystbaseret bølgeenergi-anlæg ved Islay i Skotland.



rede konstruktioner. Konstruktionerne udformes således, at vand opsamles i et eller flere forskellige højere niveauer, hvorfra det strømmer tilbage til havet gennem et mere eller mindre konventionelt vandkraftanlæg.

Et økonomisk interessant anlæg efter dette koncept bliver næsten uundgåeligt meget stort. Kravet til rolige og små bevægelser i de søtilstande, der giver betydende energiproduktion, er kun én af grundene. Der stilles formodentlig også betydelige krav til forankringssystemet, da den rette orientering i forhold til bølgerne er vigtig.

Det er attraktivt, at der næsten udelukkende er tale om kendt teknik. De store stål- eller betonkonstruktioner er kendte fra skibs- og offshoreindustrien og fra kysthydraulikken. Ved passende dimensionering af vandreservoirerne er der gode muligheder for at have en jævn gang (omdrejningstal, frekvens) af PTO-systemet.

Anlæg efter dette koncept benævnes overskylningsanlæg.

Fælles for point absorbere, linie absorbere og overskylningsanlæg er, at flere maskinelementer i driftstilstanden er oversvømmede. Dette kan vanskeliggøre tilgængeligheden for inspektion og øge omkostningerne ved vedligehold og sikkerhedsforanstaltningerne i det hele taget. Vandet er i direkte kontakt med PTO-systemet.

Oscillerende vandsøjle (Oscillating Water Column - OWC)

I modsætning hertil er samtlige maskinelementer i princippet "tørre" og monteret over vandspejlet i de systemer, der virker ved, at en bølgefremkaldt vandsøjle svinger op og ned i en skål, der er vendt på hovedet. Når luften presses sammen og udvides over vandsøjlen udføres en luftpumpefunktion - se eksempelvis SWAN DK 3 i næste kapitel. Gennem et hul i toppen af skålen suges luft ind fra atmosfæren og trykkes tilbage til atmosfæren via en luftturbine koblet til en el-generator.

Teknisk kunne konceptet betegnes som en vandstempel-luftpumpe, men det etablerede udtryk er dog blevet OWC (Oscillating Water Column = svingende vandsøjle). OWC-konceptet kører eller har kørt et par steder i verden, som kystbaserede anlæg. I danske omgivelser har det kun interesse som en flydende, forankret konstruktion ude til havs. Væsentlige attraktive egenskaber er allerede nævnt, men det skal tilføjes, at fremstillingspræcisionen for flydekonstruktionen kan være meget grov og dermed billig. Til gengæld synes optimal drift, det vil sige stor energiproduktion, at være ret afhængig af én "design-søtilstand", som der ikke afviges alt for meget fra. Det vil sige rigtig orientering i forhold til bølgerne, rigtig signifikant bølgehøjde, rigtig



Wave Dragon, et overskylningsanlæg, under test.

bølgefrequens og rigtig forankring, kort sagt: at de rigtige svingninger opstår i søjlen.

Andre maskinmodeller

Over hele verden er der opfundet mange bølgeenergimaskiner. I Danmark er der indenfor de seneste 20 år opfundet mellem 50 og 100 kendte bølgeenergimaskiner. Ret mange af dem kan rubriceres entydigt under en af de fire kategorier, der her er nævnt, mens andre har træk, så det kan diskuteres, hvor de hører hjemme. Vi skal her nævne et par stykker: nemlig *Bølgehøvlen* og *Bølgemøllen*.

Bølgehøvlen udnytter vandets beliggenhedsenergi (potentielle energi) gennem overskylningsprincippet, og tillige udnyttes vandets bevægelsesenergi (kinetiske energi) frem til PTO-systemet. Konceptet har ikke egentligt overskylningsreservoir og har en så relativ lille og let konstruktion, at det muligvis har pointabsorberegenskaber i og med, at bølgeindfaldsvinklen ikke er så kritisk.

I Bølgemøllen driver driver vandet en slags



Point Absorber under afprøvning.

Fire danske koncepter

Til illustration af fire karakteristiske koncepter, der har modtaget støtte af sammenlignelig størrelse fra Energistyrelsen og desuden har været genstand for intensive beregninger og eksperimenter, beskrives her:

- En Point Absorber
- En Line Absorber - Poseidons Orgel
- Et overskylningsanlæg - Wave Dragon
- Et anlæg efter svingende vandsøjles princip(OWC) - Swan DK 3

Af Carl Erik Vad Bennetzen

Point Absorber

Point absorberen virker ved, at bølgerne skubber en cylinder op og ned omkring et stillestående stempel. Derved pumpes en væske gennem en hydraulikmotor, som driver en elgenerator.

I det runde flydelegeme (1) er monteret den centrale cylinder (2). Heri kan et stempel (3) med tilhørende stempelstang (4) bevæge sig. Slaglængden mellem cylindertoppen og den nedre cy-

linderbund (5) med stanggennemføringen afhænger af signifikant bølgehøjde.

Stangen (4) er koblet til en strammet forankringskæde (6), der skal fikseres effektivt i havbunden ved hjælp af et anker (7).

Når flyderen (1) løftes af en bølge, vil fortrængerrummet (8) blive mindre. Når flyderen synker, ekspanderer fjederen (9) og gør fortrængerrummet større. Ved denne stempelbevægelse pumpes en hydraulikolie gennem et lukket kredsløb, hvor det gennem en hydraulikmotor driver en elgenerator.

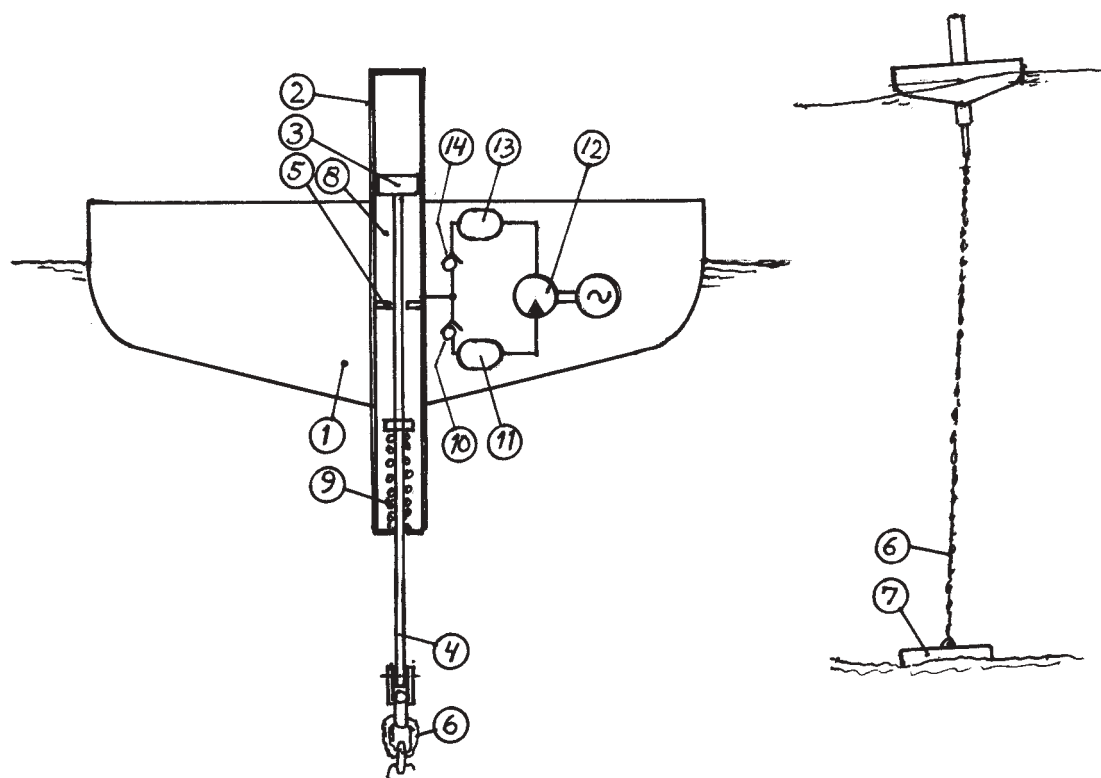
Akkumulatorer i form af "samletanke" for oliehydraulisk trykenergi bidrager til at give en jævn motorrotation trods den pulserende pumpning. I praktisk udførelse vil alle disse komponenter blive indbygget beskyttet i flyderen, og elkablet vil blive ført til land ved anvendelse af teknologi, der er kendt fra andre offshore-konstruktioner.

En sådan Point Absorber med cirka 10 meter diameter, fribord cirka 1,5 meter og 70-90 tons vandfortrængning, skulle på 40-50 meter vanddybde ud for Nordjylland kunne yde en gennemsnitlig effekt på cirka 100 kW til generatorakslen. Anlægget er udviklet af Kim Nielsen.

Kim Nielsens Point Absorber

Principskitse ikke skalatro

1. Flydelegeme
2. Oliehydraulikcylinder
3. Stempel
4. Stempelstang
5. Nedre cylinderbund
6. Forankringskæde
7. Anker
8. Fortrængerrum
9. Fjeder
10. Trykkontraventil
11. Højtryksakkumulator
12. Hydraulikmotor med elgenerator
13. Lavtryksakkumulator
14. Sugekontraventil



Poseidon's orgel

I en line-absorber optages bølgenes energi i en masse flydelegemer, der gennem vandpumpecylinder pumper havvand til en fælles vandturbine.

Bølgemaskinens største enkelt del er en ramme (1) udført af lukkede rør med yderdiametre på mellem 4 og 6 meter. Denne ramme er det primære flydelegeme, og herpå er monteret en række flydelegemer (2), der ved påvirkning af bølgerne kan vippe omkring hængslerne (3).

Hver af de cirka 20 flydelegemer er koblet til sin dobbeltvirkende vandpumpecylinder (4). Der suges fra havet gennem rør med to kontraventiler (5) og trykkes gennem rør med to kontraventiler (6) til et fælles samlerør (7). Gennem forbindelsesrør integreret i rammekonstruktionen ledes trykvandet, der på grund af de mange "pumpeorgeltangenter" har både jævn volumenstrøm og konstant tryk, til to eller tre vandturbine-

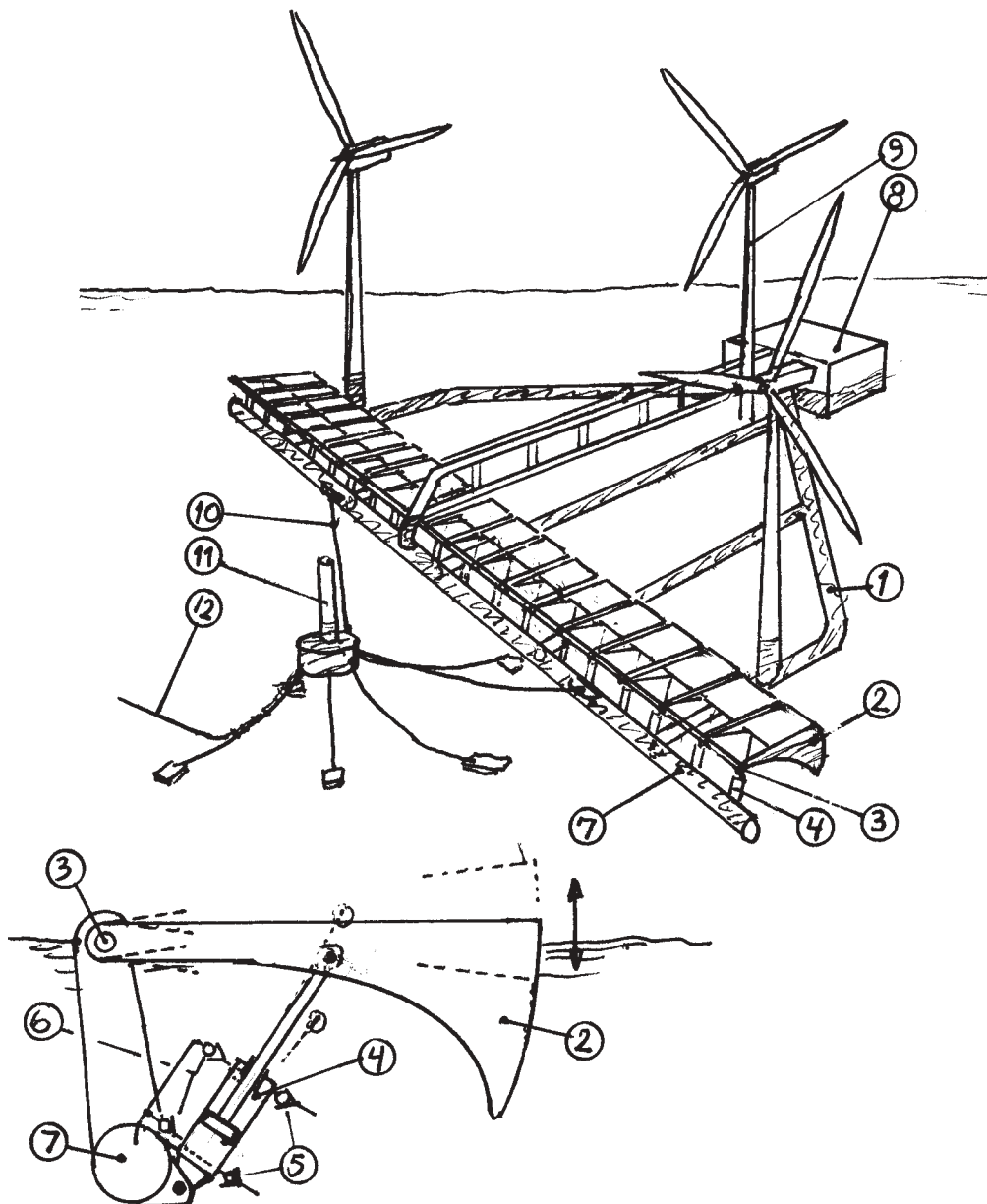
elektrogeneratorsæt (8) i et integreret, tæt maskinhus.

Der er investeret en del eksperimenter i at finde den optimale geometri af flydelegemerne (2).

Der er overvejet muligheden for at montere op til 3 vindmøller (9) på rammekonstruktionen og derved opnå virkelig hybrid vedvarende energiproduktion.

Forankringen sker i kæder (10), der føres til en bøje (11). Hertil føres også el-forbindelseskablet (12).

Anlægget påregnes at kunne yde op til 25 MW elektrisk effekt. Dertil svarer bredden cirka 380 meter, længden cirka 200 meter og dybgangen cirka 25 meter. Selve det vandareal, der dækkes af anlægget er lille, idet der er åbent vand mellem rammen og flydelegemet. Anlægget er udviklet af H. Marius Pedersen.



H. Marius Pedersens "Poseidon's orgel"

Principskitse ikke skalatro

1. Ramme af rør
2. Flydelegeme
3. Hængsel
4. Vandpumpecylinder
5. Sugekontraventil
6. Trykkontraventil
7. Tryk-samlerør
8. Vandturbine-elgeneratorsæt
9. Vindmølle
10. Forankringskæde
11. Bøje
12. Elkabel



Overskylningsanlæg - Wave Dragon

Et overskylningsanlæg opsamler bølgerne i et reservoir, hvorfra de ledes gennem vandturbiner, der er tilkoblet en elgenerator.

Bølgeenergimaskinens skrog, hvis materialer bliver stål, i kombination med en betydelig procentdel i beton, er delt i det centrale flydelegeme (1) og to bølgerereflektorer (2). Disse dele er sammenkoblet via hængslerne (3).

Opdriftsrummene (4) er åbne nedadtil og tætte opadtil og står altså under et vist overtryk. Ved et kompressoraggregat ombord styres luftfyldningen af disse rum, så dybgang og trim bliver hensigtsmæssige.

Bølgerereflektorerne, samt hensigtsmæssig udformning af opskylningsrampen (5) på centraldelen, skal forøge de indkommende bølgers højde, så der skyller vand op i overskylningsreservoiret (6). Anlægget bærer altså denne "sø" med et vandspejl, hvis gennemsnitshøjde er 3-4 meter over havets vandoverflade. Denne faldhøjde udnyttes i vandturbinerne (7), når vandet ledes gennem dem ud til havet igen. Turbinerne er koblet til elgenerators (8).

Laboratorieforsøg og beregninger i forbindelse med projektet har allerede givet et nyttigt

indblik i de fysiske forhold omkring overskylningen, men det synes klart, at effektiviteten afhænger stærkt af rigtig orientering af anlægget i forhold til de indkommende bølgefronter (9) og af fortøjningssystemet (10).

Anlægget bliver så stort, at det muligvis kan bære to vindmøller (11).

Som for andre kapitalkrævende konstruktioner har man naturligvis også for denne maskine måttet overveje overlevelsessevnen i "50-årsstormen". Reflektorerne støttes af undersøiske wirer (12). Skrogdelene (1) og (2) kan flyde adskilte hver for sig. Kontrolleret neddykning er mulig.

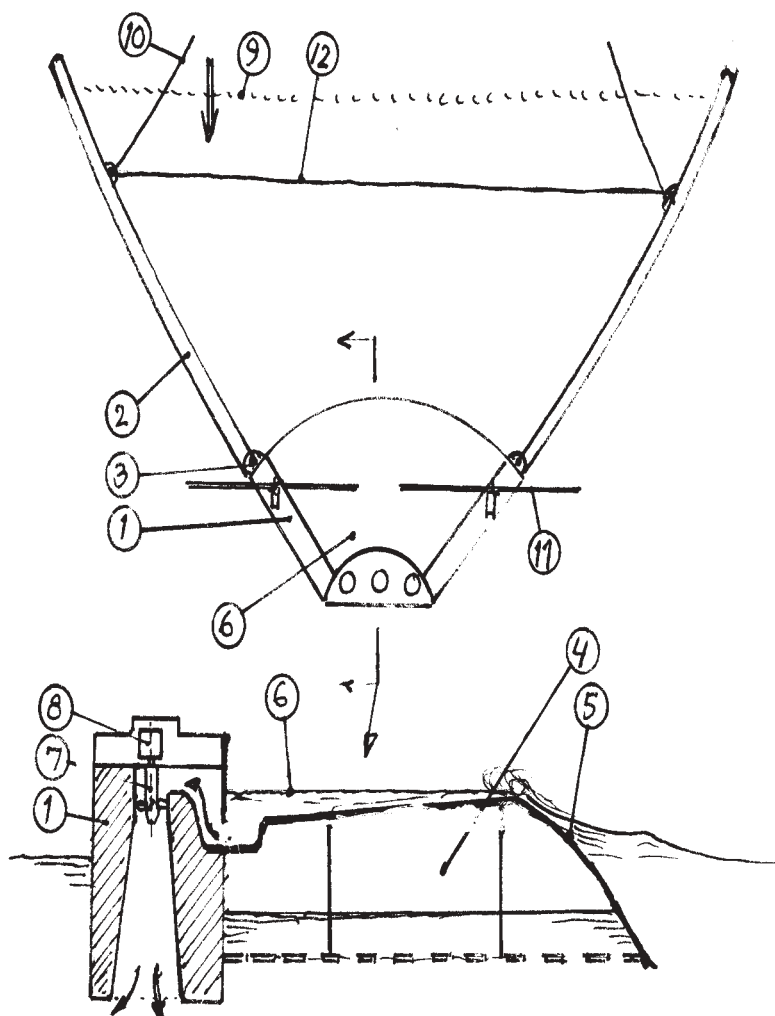
Fuldskalaversionen af det projekt, der har modtaget støtte, har spænd på cirka 240 meter mellem yderspidserne af reflektorerne og længde på cirka 100 m med reflektorerne i driftstilling. Selve opskylningsrampen er cirka 85 meter bred. Dybgangen er cirka 8 meter og anlægget rager cirka 7 meter op over vandoverfladen (uden vindmøller). Denne bølgeenergimaskine kan levere 4 MW bølgeenergi, med eventuel mulighed for ekstra 1 MW vindenergi, i 4 meter signifikant bølgehøjde.

Anlægget er udviklet af Erik Friis-Madsen.

Erik Friis-Madsens overskylningsanlæg - Wave Dragon

Principskitse ikke skalatro

1. Centralt flydelegeme
2. Bølgerereflektor
3. Vertikalt hængsel
4. Opdriftsrum
5. Opskylningsrampe
6. Overskylningsreservoir
7. Vandturbiner
8. Elgenerator
9. Bølgefront
10. Fortøjningssystem
11. Vindmølle
12. Støttewire



OWC - SWAN DK 3

Et OWC anlæg virker således: Bølgerne igangsætter en svingende vandsøjle i en cylinder. Ved hver svingning presses luften ovenover vandsøjlen frem og tilbage gennem en luftturbine over cylinderen. Luftturbinen er forbundet med en el-generator.

Princippet i denne maskine er først demonstreret af japaneren Youshi Masuda, men var allerede før iværksættelsen af det danske Bølgeenergi-program, blevet underkastet en videreudvikling af danskeren Ralph Mogensen.

I grove træk består anlægget af en stor flydende, kasseformet bøje (1), som er slækt fortøjet til havbunden i et fortøjningssystem (2). Kassen har under vandlinien en åbning til søen (3). Opdrift og hensigtsmæssig dybgang sikres af en tæt opdriftskasse (4).

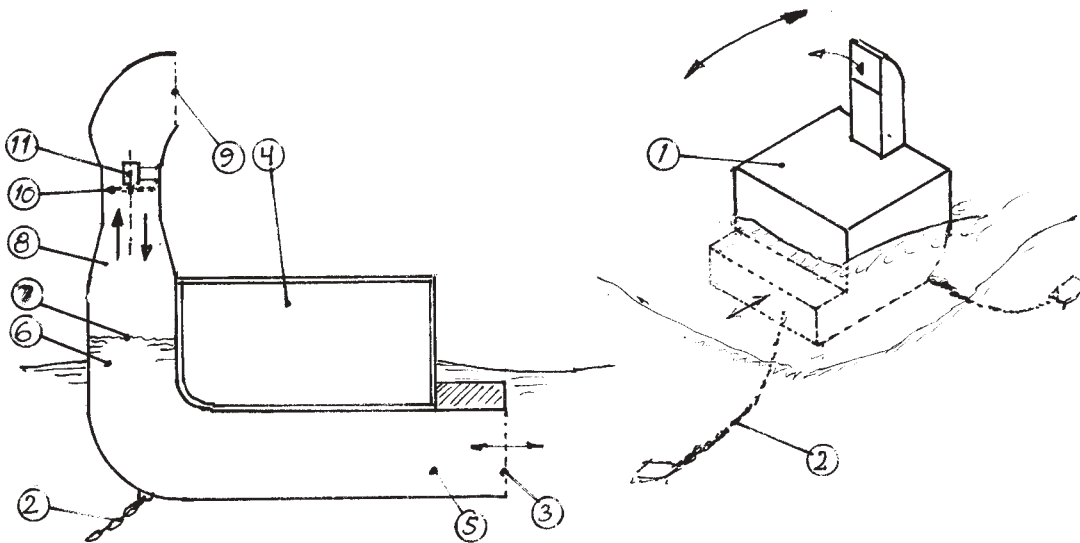
Vandet fra søen fylder et tunnelsystem bestående af en horisontal del (5) og en vertikal del (6). På grund af denne udformning kendes princippet internationalt under betegnelsen BBDB (Backward Bent Duct Buoy).

Vandoverfladen (7) i tunnellens vertikale del skal, ved korrekt afstemning af hele bøjens

geometri, tyngdepunkt og opdriftscenter med den fremherskende søtilstand, udføre lodrette svingninger med størst mulige udsving i rummet 8.

Luften i dette rum er i forbindelse med omgivelserne via en åbning (9), der placeres hensigtsmæssigt højt og beskyttet mod bølgesprøjt. Mellem rum (8) og åbningen er anbragt PTO-systemet, der består af en luftturbine (10) koblet til en elgenerator (11). Vandfladen (7), der stiger og falder med samme frekvens som bølgefrequensen, vil skiftevis fortrænge luft og indsuge luft i rummet (8) og herved skabe strømning gennem turbinen. Der findes specialturbiner, der trods vekslende luftretning bibeholder ens rotationsretning. Ønsket om gode virkningsgrader og driftsikkerhed har dog også her ført til bølgeenergispecifik forskning i design af strømningsmaskiner.

For et projekt skitseret primo 2001 regnes der med vandliniedimensioner af maskinen på cirka 19×15 meter, dybgang 5,5-6 meter og højde fra vandlinien til top af luftindtag på 14-15 meter. Der estimeres en energiproduktion på cirka 240.000 kWh per år, svarende til en gennemsnitlig effekt på 25-30 kW.



Ralph Mogensens OWC - SWAN DK 3

Principskitse ikke skalatro

1. Flydelegeme (skrog)
2. Fortøjningssystem
3. Vandindstrømningsport
4. Opdriftsrum
5. Vandtunnel, horisontal
6. Vandskakt, vertikal
7. Overflade af vand
8. Luftrum
9. Luftindstrømning/udstrømningsport
10. Turbine med konstant rotationsretning
11. Elgenerator

Internationale aktiviteter

Af Carl Erik Vad Bennetzen

For et nærmere studium af mangfoldigheden må der henvises til først og fremmest de konferencekompendier, der foreligger efter de, indtil videre (primo 2002), fire europæiske bølgeenergikonferencer. Mange af de beskrevne projekter finder sig forsat på skrivebordet eller på modelstadiet, men nogle er dog afprøvede ude i havet.

Det er her valgt at begrænse præsentationen til to bølgemaskiner, der var aktuelle ved den 4. europæiske bølgeenergikonference i Ålborg d. 4.-6. dec. 2000 (en bølgepumpe samt en OWC) samt en, der med nogen ret kan siges at være original i sit virkeprincip (Lineabsorberer Salters Duck). Dermed bliver også tre af de fire hovedkategorier repræsenterede.

Bølgepumpe (norsk)

Den individuelle bølgeenergimaskine falder under kategorien Point Absorber, men det er en bærende idé i konceptet, at adskillige standardiserede absorbere skal forsyne et fælles PTO-system.

Den enkelte bølgeenergimaskine består af en flyder (1), der er forbundet til et rør (2), som udgør cylinderen i en havvandpumpe. Cylinderen er altså den bevægelige del, og stemplet (3), der er forbundet med den hule stang (4), er den stationære del, idet stangen skal være fleksibelt hængslet til et anker (5) på havbunden. Når

flyderen løftes af en bølge, trykkes vand gennem trykventilerne (6) ned gennem den hule stang. Når flyderen synker i en bølgedal, fyldes cylinderen via sugeventilerne (7). Trykvandet føres gennem en ligeledes fleksibel rørforbindelse til samlerøret (8), der er ført mellem alle flydepumperne og ender ved PTO-systemet (9), som er et vandturbine-elgeneratoraggregat.

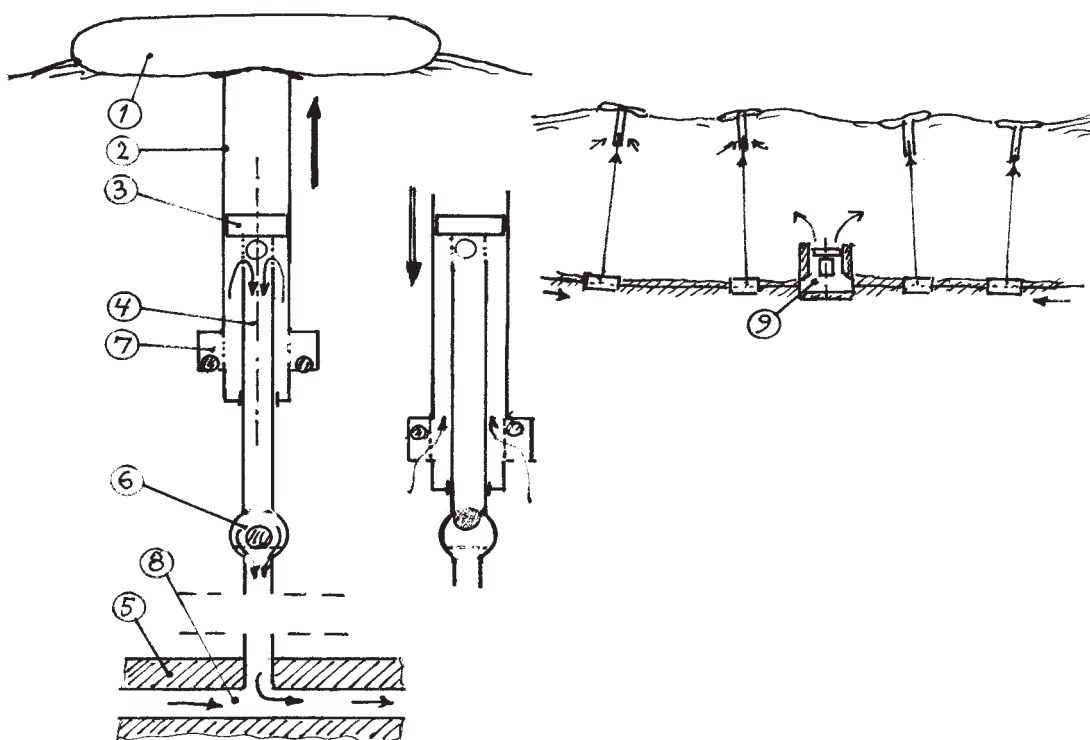
Opfinderen, nordmanden Torger Tvetter, opererer med både et decideret offshore-koncept, hvor PTO-systemet installeres på havbunden og et koncept, hvor trykvandsamlerøret føres til en PTO-station på land. Førstnævnte er vist nedenfor.

Funktionen er noget afhængig af, at anlægget ikke "udstyres" ved for eksempel drift af flyderen til siden eller større langtidsvariationer (tidevand) i vandoverfladens niveau; trykvandsrøret vil også skulle beskyttes. Attraktivt er det, at komponenterne er relativt små og håndterbare, samt at både de æstetiske indtryk og de sikkerhedsmæssige forhold formodentlig har gode chancer for at blive accepterede.

En prototype af en enkelt bølgepumpe har været testet ud for en norsk kyst. Visse konstruktionsændringer i pumpefunktionen har måttet udføres siden, og der har fundet videreudvikling og optimering sted ved danske forsøgslaboratorier. For tiden opereres med et anlæg, der ved indsats af 10 parallelle bølgepumper leverer 300 kW til nettet.

Torger Tvetters Bølgepumpe

1. Flyder
2. Cylinder
3. Stempel
4. Kombineret stempelstang og trykrør
5. Anker
6. Trykventiler
7. Sugeventiler
8. Tryk-samlerør
9. PTO



Kystbaseret OWC bølgeenergianlæg på øen Pico, Azorerne (portugisisk)

I dette anlæg danner bølgerne et vandstempel i et betonkammer. Herved presses luften over vandet frem og tilbage gennem en dobbeltvirkende luftturbine tilsluttet en elgenerator.

Tæt ved den pågældende dybe klippekyst er bølgeenergipotentialt 13-14 kW/meter bølgefront, altså cirka halvanden gang mere end i den danske del af Nordsøen. Man har været yderligere tilskyndet til projektet ved, at der er en del udgifter forbundet med at få det lokale elektricitetsbehov dækket fra hovedøen Pico. I det hele taget skal flere specifikke forhold falde sammen, for at et sådant anlæg kan være hensigtsmæssigt

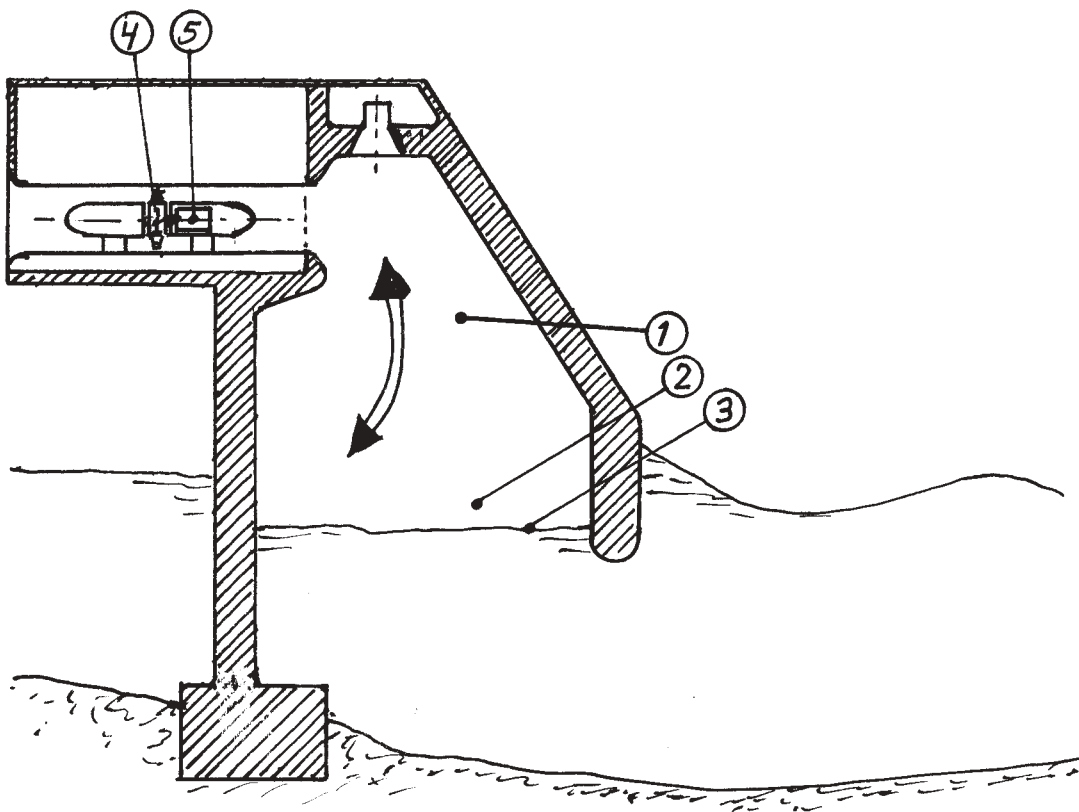
Man har i klipperne indbygget det opad-til lukkede betonkammer (1) med en undersøisk åbning (2) ud mod søen. Vandfladen (3) i det indvendige rum er 12 × 12 meter, og "slaglængden" af det vandstempel, som vandfladen

ved bølgegang udenfor udgør, kan blive 7 meter.

En Wells-turbine (4) (konstant rotationsretning og indtil videre med faste løbeskovle) koblet til elgenerator (5) er i drift.

Den endelige løsning på den elektriske del, hvorved energiforsyningen stabiliseres ved forskriftsmæssig frekvens og spænding, er næppe fundet endnu. Ligeledes fordrer beskyttelsen af turbinen installation af store luftventiler. Det har vist sig at være en ganske udfordrende entreprenøropgave at bygge betonhuset, en erfaring, der er i samklang med andre internationale erfaringer: Et norsk kystbaseret OWC-anlæg havarerede i storm, og et tilsvarende indonesisk blev aldrig færdigt.

PTO-aggregatet er på godt 500 kW, men den gennemsnitlige årlige effekt er på kun cirka 25 procent heraf. I forhold til hvad der er "nødvendigt", indsættes der altså en ret stor maskine. Turbinerordiameteren er cirka 2,3 meter.



Kystbaseret OWC bølgeenergianlæg på Pico

1. Betonkammer
2. Åbning mod søen
3. Vandoverflade
4. Wells-luftturbine
5. Elgenerator



Stephen Salter's "duck" (linieabsorber, skotsk)

I Salters "duck" optages energien i flydere, som derved vipper omkring et vandret stempel.

Professor Salter i Edinburgh begyndte at arbejde på denne bølgeenergimaskine under umiddelbart indtryk af oliekrisen i 1973.

Konceptet omtales i almindelighed som Salters "and", fordi hovedflydelegemet (1) har et tværsnit af en vis lighed med et andenæb. Dette flydeelement skal, under påvirkning af bølgerne, udføre nikkende bevægelser omkring en aksel (2) med stor diameter.

Et egentligt anlæg skal bestå af adskillige flydere på en fælles aksel. Denne aksel må dog af strukturelle grunde have fleksible led (3) med kardanegenskaber mellem de enkelte flydere.

Akslen skal optage drejningsmomentet fra andenæbbet og derfor være forsynet med et modhold. På figuren er blot skitseret én af ideerne til denne "faste reference", en lodret strømningssplade (7) af passende størrelse. Der er vistnok argumenteret for, at man i helt "tredimensional sø" kunne spare modholdet, fordi middelpåvirkningen fra mange "andenæb" forventeligt vil holde akslen i ro. Men i drift som virkelig linieabsorber, korrekt orienteret i langkammede bølger, vil et ydre modhold være nødvendigt. En ret avanceret forankring (8), som inkluderer dæmpere, er også nødvendig.

Der er udført modellforsøg med konceptet, også i åbent vand, idet for eksempel en model med 20 "andenæb" har været i drift i Loch Ness.

Ved hensigtsmæssig formgivning af flydervær-nittet konstaterede man, at indkommende bølger på vindsiden (4) blev så godt som elimineret, idet der kunne iagttages glat og hvirvelfrit vand på læsiden (5).

For så vidt kan der altså på maskinbredde-basis tales om bølgeenergiabsorbtionen 100 procent! Sagt med en anden terminologi: Både bøl-gernes kinetiske og deres potentielle energi ab-sorberes, endda totalt. Dette er næsten enestæn-de blandt alle koncepter!

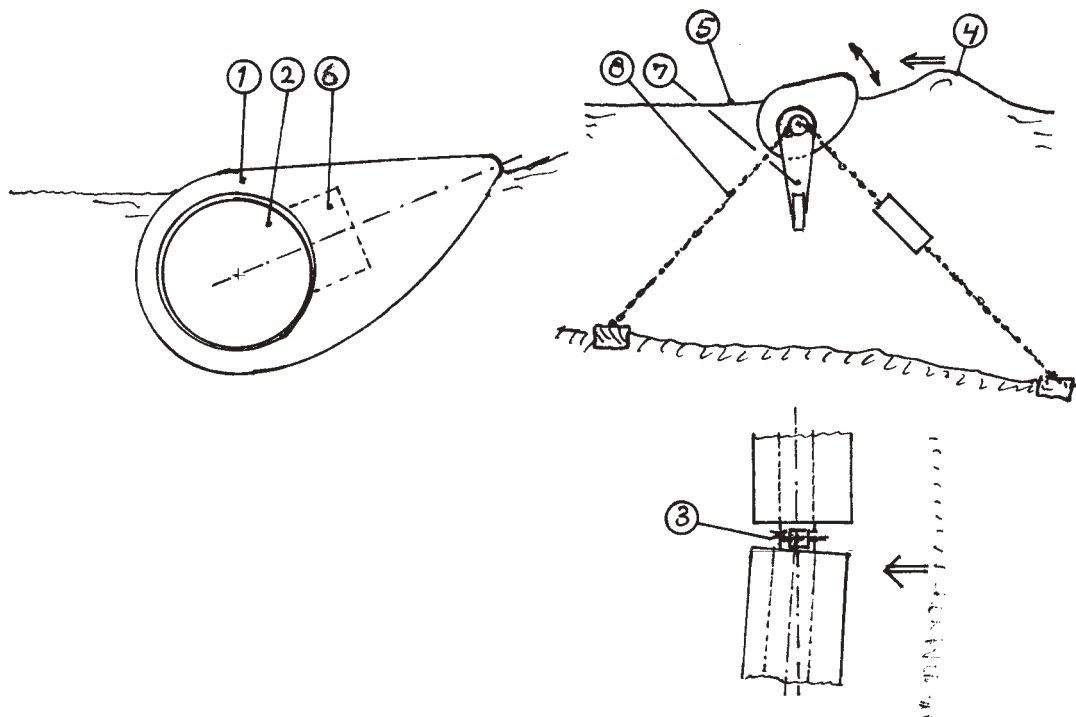
Denne energiabsorbktion beror naturligvis på, at arbejde overføres til omgivelserne. Her er det på laboratorieplan ret ukompliceret til efter-visning at udvikle et dæmningsarrangement mellem flydelegeme og aksel.

For produktionsøkonomiske og driftspålidelige fuldskala PTO-systemer har udfordringen vist sig at være anderledes stor. Akslens modhold er ikke ligetil. Andenæbbets bevægelse er karakteriseret ved stort drejningsmoment (kræver kraftige maskinelementer), men til gengæld langsom og - især - pendlende bevægelse (krav om en ensret-terindretning). Der fordres én indbygget PTO- en-hed per andenæb, samt muligvis yderligere et centralt energiomformningsanlæg hængende i ak-slen. Både hydrauliske og rent mekaniske kon-cep-ter har været overvejet, men løsningen udestår.

Konceptet er en påmindelse om, at en ide kan være nær genial i sin udnyttelse af strøm-ningsfysikken, men opleve den skæbne, at kendt PTO-teknik ikke slår til i den praktiske indvin-ding af energien.

Salter's duck

1. Prismatisk, nikkende flydelegeme
2. Stationær aksel
3. Fleksibel akselkobling
4. Vindside med bølgegang
5. Læside med smult vand
6. PTO-enhed
7. Modhold mod akseldrejning
8. Forankring



Afprøvningsfaciliteter

En afgørende faktor for ethvert bølgekraftværk er økonomien. For at beregne den må der tilvejebringes et designgrundlag, som belyser hvor meget energi anlægget kan producere i forskellige bølgeforhold, og som gør det muligt at dimensionere anlægget til påvirkningerne fra de største bølger.

Af Kim Nielsen

For at belyse disse forhold afprøves en model af bølgekraftanlægget i modelskala i laboratorier, hvor naturtro bølger kan skabes i lille målestok, og hvor avanceret måleudstyr gør det muligt at bestemme kræfter, bevægelse, samt energioptaget. Resultaterne omsættes til naturlig størrelse ved brug af modellove.

Modelafprøvningen foregår ved, at naturens bølgehøjder og anlæggets dimensioner skaleres ned til en størrelse, som passer til de bølger, der kan skabes i den pågældende bølgetank. Naturens bølger, som danner baggrund for energiproduktionen, er søtilstande med signifikante bølgehøjder fra 1 meter til 5 meter, og de største bølger, som anlægget skal overleve, er cirka 20 meter høje (søtilstand med signifikant bølgehøjde på cirka 10 meter). Vanddybden i Nordsøen, hvor bølgeanlæg kunne tænkes placeret, er typisk mellem 30 og 50 meter, og den skaleres så vidt muligt med samme forhold som bølgerne.

Når forsøget udføres i en skala 1:s kan resultaterne omregnes fra de målte størrelser i modelbassinet til fuldskala som angivet i nedenstående tabel. (Froudes modellov)

Paramter	Model	Fuldskala
Længde	1	s
Areal	1	s ²
Volumen/ masse/ kraft	1	s ³
Tid	1	s ^{0.5}
Hastighed (linear)	1	s ^{0.5}
Effekt	1	s ^{3.5}

Eksempel:

En flyder med en diameter på 10 meter, placeret på 50 meter dybt vand, skal arbejde i 1 til 5 meter høje bølger. Det vælges at udføre forsøg i skala 1:10, hvilket betyder, at modellen får en diameter på 1 meter, og DMI's bassin med en vanddybde på 5 meter vælges. Bølgerne, som skal genereres i til modelafprøvningen, bliver fra 0,1 meter til 0,5 meter høje.

Bølgekraftudvalgets sekretariat har udarbejdet en vejledende rapport med retningslinier med hensyn til afprøvning af bølgekraftsystemer "Bølgekraft - forslag til forsøg og rapportering, Bølgekraftudvalgets sekretariat, marts 1999." Se hjemmesiden www.waveenergy.dk

Der er tre institutter i Danmark, hvor sådanne forsøg kan udføres indendørs, og en udendørs test facilitet er etableret i Limfjorden.



Afprøvning i bølgetank i Aalborg.

DHI Water and Environment

Instituttet er beliggende i Hørsholm. Her er der mulighed for at afprøve modeller i såvel bølgerender som bølgebassiner. DHI har følgende faciliteter:

Render:

- 28 meter lang, 0,74 m bred, 1,2 meter dyb (bølger)
- 35 meter lang, 5,5 meter bred (kan øges til 11 meter), 0,8 meter dyb (bølger, strøm, vind)

Lavtvandsbassiner

- 35 meter lang, 25 meter bred, 0,8 meter dyb (bølger fra én retning og bølger fra flere retninger, strøm, vind)
- 32 meter lang, 30 meter bred, 0,45 meter dyb (bølger fra én retning, vind)
- 30 meter lang, 30 meter bred, 0,75 meter dyb (bølger fra én retning, vind)
- 62 meter lang, 30 meter bred, 0,45 meter dyb (bølger fra én retning, vind)

Dybtvandsbassin:

- 20 meter lang, 30 meter bred, 3 meter dyb (bølger fra én retning og bølger fra flere retninger, strøm, vind)

Den smalle rende kan bruges til test og optimering af delelementer, medens de øvrige faciliteter kan anvendes til afprøvning af komplette systemer.



foto: nordvestjysk folkecenter for vedvarende energi

“Kravlegården” ved Nissum Bredning.

I bølgerenderne og i lavtvandsbassinene kan der skabes bølger på op til cirka 0,40 meters højde. Modeller, som afprøves for overlevelse, skal bygges i skalaforhold cirka 1:50, mens undersøgelse og optimering af energiproduktion vil kunne udføres med cirka dobbelt så store modeller i skala 1:20.

Større modeller kan afprøves i dybvandsbassinet. I dette bassin kan der skabes kortkammede tredimensionelle bølger, der kommer fra flere retninger som i naturen. De største bølger er cirka 0,5 meter. Det betyder, at modelforsøgene for at belyse overlevelse skal udføres i skala 1:40 eller 1:50.

Dansk Maritimt Institut (DMI)

Instituttet ligger i Lyngby, og her findes den største bølgerende i Danmark, hvor også de største bølger op til en højde på cirka 1 meter kan skabes.

DMI's Bølgerende:

- 250 meter lang, 12 meter bred, 5 meter dyb (bølger fra én retning)

Bølgetanken er velegnet til at afprøve energiproduktionen for bølgeanlæg i en skala cirka 1:10, op til signifikante bølgehøjder, der er svarer til 5 meter i virkeligheden. Hvis konstruktionen skal afprøves for overlevelse i dette bassin, skal modellen være mindre og udføres i skala cirka 1:25.

Aalborg Universitet

På Aalborg universitet er der mulighed for forsøg i tre bølgerender og i to bølgebassiner med kortkammede tredimensionelle bølger. Aalborg Universitet har, siden bølgekraftprogrammets start, stået for de fleste førstegangsafrøvnninger af nye ideer til bølgekraft, og universitetsmiljøet

giver ofte mulighed for at studerende kan engageres i forsøgene. De mest benyttede faciliteter til bølgeforsøg er:

Dybvandsbassin:

- 18 meter lang, 8,5 meter bred, 1,2 meter dyb plus ekstra 2 meter i centrale område (bølger fra én retning og bølger fra flere retninger, strøm, vind)

Render:

- 22 meter lang, 1,2 meter bred, 1,2 meter dyb (bølger)

De største bølgehøjder, der kan skabes i såvel rende som bassin, er cirka 40 centimeter. Overlevelsesforsøg afprøves bedst i en skala på 1:50. Energiproduktion kan eventuelt undersøges i skala 1:25.

“Kravlegården”

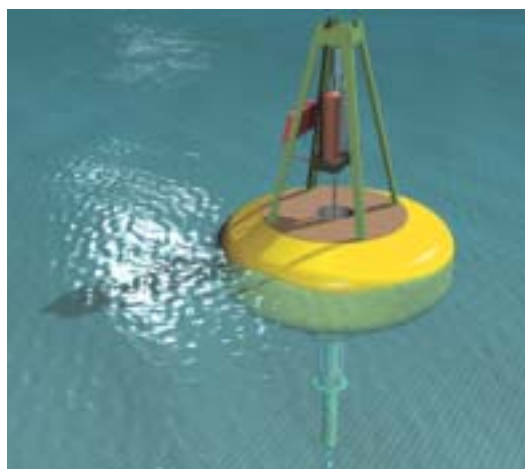
Som led i det danske bølgekraftprogram er der etableret en udendørs prøvestation i et beskyttet havområde i Nissum Bredning, hvor opfindere gratis kan afprøve modeller af egne bølgekraftsystemer. Prøvestationen består af en platform på 3,5 meter vanddybde forbundet til stranden med en cirka 140 meter lang gangbro. Platformen er udstyret med en container, hvor der findes diverse måleudstyr og det mest almindelige håndværktøj.

Prøvestationen benyttes endvidere til langtidsafrøvnning af modeller, som indledningsvis har været afprøvet i laboratorierne. Bølgerne ved kravlegården skabes af vinden, og det er således vejret, der bestemmer, hvilke bølger opfinderen en given dag vil kunne afprøve modellen i. En rimelig skala for modelafprøvnning er cirka 1:10.

Prøvestationen er bygget af Nordvestjysk Folkecenter for Vedvarende Energi, som ligger

Økonomi i udvalgte anlæg

For at sammenligne resultaterne af de ofte meget forskellige typer bølgeanlæg som afprøves, har Bølgekraftudvalget foreslået en systematisk fremgangsmåde med standardiserede forudsætninger. Energiproduktionen målt ved modelforsøg omregnes til fuldskala, og bølgemaskinens årlige energiproduktion beregnes ud fra en standardfordeling af bølgeforholdene. Investeringsomkostningerne beregnes med standardiserede enhedspriser på de materialer, som medgår til bygning af den pågældende konstruktion. Således fremkommer en række sammenlignelige nøgletal.



Den årlige elproduktion fra Point Absorberen PA9801, er godt 100.000 kWh.

Af Kim Nielsen

Bølgemaskinernes hoveddata

Som eksempel på fremgangsmåden anføres i Tabel 1 nogle bølgekraftsystemer med hoveddata fra afprøvningerne.

I tabellen er forankringens egenvægt anført, hvis den er nødvendig for energiproduktion, mens slæk-forankring (kæde og anker), som alene tjener til at fastholde konstruktionen på position, ikke er angivet med vægt.

I den sidste kolonne er anført hvilken type "power take-off" (kraft-omformnings-system) bølgekraftanlægget benytter.

Power take-off systemets virkningsgrad η_{pto}

Bølgekraftmaskinerne omformer generelt den absorberede energi ved brug af et "power take-off" system, som typisk består af en generator, der drives via luftturbiner, vandturbiner (og pumper), hydraulikmotorer (og pumper) eller direkte via et gear.

Den virkningsgrad, hvormed den absorberede energi omformes til elektricitet, afhænger af det "power take-off" system, som anvendes. Som

udgangspunkt for en sammenligning er skønnede middelværdier for virkningsgraderne i de anførte PTO-systemer vist i tabel 2.

Bølgekraftanlæggenes årlige energioptagelse

Den effekt de enkelte bølgemaskinens optager, når den signifikante bølgehøjde H_s varierer fra en til fem meter, er vist i tabel 3.

Som et fælles grundlag til beregning af bølgemaskinernes årlige energiproduktion benyttes en årsfordeling af signifikante bølgehøjder H_s , som svarer til bølgeforholdene i Nordsøen, hvor der i gennemsnit passerer cirka 16 kW/meter. Antallet af timer per år med signifikante bølgehøjder omkring 1 meter, 2 meter og op til 5 meter er vist i tabellens anden række.

Bølgekraftmaskinernes årlige energiabsorption E_a er beregnet ved at gange ydelsen i hver søtilstand med de timer per år, som søtilstanden forekommer. Dette tal ganges med virkningsgraden for energiomformningssystemet. Den beregnede elproduktion E_e for de enkelte systemer er angivet i den sidste kolonne i tabel 3.

	L	B	H	Vol. Absorber	Egenvægt Absorber	Forankringsstruktur	Samlet vægt	Power take-off (PTO) system
	meter	meter	meter	m ³	ton	ton	ton	
1. Swan DK3	16	16	10	2.464	200	slæk	200	Luftturbiner
2. Point Absorber PA9801	10	10	2,5	196	60	100	150	Hydraulik
3. Wave Dragon	147	259	16	20.000	18.000	slæk	18.000	Vandturbine
4. Wave Plunger	4,5	15	4,5	150	30	120	150	Hydraulik
5. TB Bølgeturbine	15	15	0,4	8	8	39	47	Direkte
Udenlandske systemer								
6. Pelamis (UK)	130	3,5	3,5	1.150	600	slæk	600	Hydraulik

Tabel 1. Bølgekraftmaskinernes hoveddimensioner.

Tabel 2. Forslag til foreløbige værdier for power take-off systemernes virkningsgrader.

Power take-off	Direkte	Luft	Opskyls-anlæg	Vand	Hydraulik
Mekaniske Pumper			0,64		0,90
Turbine		0,60	0,90	0,90	0,85
Gear	0,95				
Generator	0,90	0,90	0,90	0,90	0,85
Samlede virkningsgrad for PTO-systemet	0,85	0,54	0,81	0,81	0,65

Materialeomkostninger

Efter to års udvikling under det danske bølge-kraftprogram har Bølgekraftudvalget anbefalet at afprøve en metodik, som indebærer en begrænset brug af økonomiske betragtninger, der kan give et fingerpeg om de enkelte systemers økonomi på længere sigt. Prissætningen skal opfattes som et værktøj i forbindelse med en fortsat udvikling mod økonomisk bæredygtige bølgekraftanlæg. Dette værktøj foreslås på nuværende tidspunkt i bølgekraftprogrammet kun at omfatte prisover-
slag på to hovedelementer:

- Bølgekraftmaskinens strukturelle materialer
- Power take-off systemet (mekaniske og elektriske komponenter)

Den strukturelle konstruktion

De typisk anvendte konstruktionsmaterialer i bølgekraftsystemer er beton, stål og glasfiberarmeret polyester, samt ballastbeton og vandballast. Materialevalget samt den installerede effekt i de undersøgte bølgekraftsystemer er vist i tabel 4.

Hovedkonstruktionen prissættes ved brug af enhedspriser på materialer, som er fælles for alle systemer. Enhedspriserne for de konstruktionsmaterialer, som indgår i de anførte bølge-kraftmaskiner, er vist i tabellens øverste række. Priserne angiver en størrelsesorden, og vil naturligvis i de enkelte projekter være forskellige, alt efter hvilken grad produktionen kan rationaliseres.

Installeret Effekt P_{rated}

Systemets installerede generatoreffekt (P_{rated}) sættes overslagsmæssigt lig med den målte absorberede effekt i signifikant bølgehøjde $H_s = 5$ meter. Her tages ikke hensyn til, at den nødvendige generatoreffekt for systemer uden energilag generelt vil være væsentlig større.

De mekaniske og elektriske installationer er prissat med en enhedspris per installeret kW, som er uafhængig af, om der er tale om luftturbiner, vandturbiner eller hydrauliksystemer. Prissætningen af power take-off afspejler således alene størrelsen af den installerede effekt.

Signifikant bølgehøjde H_s	1 meter	2 meter	3 meter	4 meter	>4,5 meter			
Timer per år	4.103	1.982	944	445	330			
System	Absorberet effekt P_w (kW)					E_a (kWh/år)	p_{to}	E_e (kWh/år)
1. Swan DK3	15	62	117	172	203	438.407	54%	236.740
2. Point Absorber PA9801	5	22	53	98	120	197.361	65%	128.285
3. Wave Dragon	290	900	2.200	3.800	4.400	8.193.470	52%	4.260.604
4. Wave Plunger	7	43	101	149	207	343.906	65%	223.539
5. TB Bølgeturbine	1	14	29	42	48	94.202	85%	80.072
Udenlandske systemer								
6. Pelamis (UK)	31	178	401	553	597	1.301.628	72%	937.172

Tabel 3. Beregning af bølgekraftmaskinernes årlige el-produktion.

	Beton	Beton ballast	Stål	Glasfiber	Egenvægt i alt	Installeret effekt
Enhedspris kroner/enhed	1.500	500	25.000	70.000		2.500
Enhed	ton	ton	ton	ton	ton	kW
1. Swan DK3			175		175	203
2. Point Absorber PA9801		90	60		150	120
3. Wave Dragon	21.400		350		21.750	4.400
4. Wave Plunger	50	50	50		150	207
5. TB Bølgeturbine		10	29	8	47	48
Udenlandske systemer						
6. Pelamis (UK)		300	300		600	597

Tabel 4. Oversigt over konstruktionsmaterialer, som indgår i de forskellige systemer.



Pelamis under afprøvning. Det langsigtede økonomiske perspektiv er, at bølgeenergianlæg på gunstige lokaliteter kan producere el til samme pris som havvindmøller.

Sammenligning af systemers energiøkonomi

Med de anførte data gives et overslag over investeringsomkostningerne (K) for de enkelte systemer. I tabel 5 er endvidere anført systemets installerede effekt (P) og beregnede elproduktion per år (E).

For at sammenligne systemerne indbyrdes kan de sidste tre kolonner anvendes. Til sammenligning kan endvidere anføres, at en moderne havvindmølle typisk vil have nøgletal som:

Pris per installeret kW: K/P: 12.000 kroner/kW
 Fulldlasttimer: E/P : 3.500 timer
 Pris/kWh/år: K/E: 3,43 kroner/kWh/år

Disse priser tyder på, at der er gode muligheder for at udvikle rentabel elproduktion ved hjælp af bølgeenergi. Hvis bølgekraftmaskinerne skal opnå en økonomi på niveau med vindmøller, må den videre udvikling af systemerne imidlertid sigte på at øge de enkelte systemers energiproduktion og reducere omkostningerne.

	P Installeret effekt kW	K Investerings- omkostninger 1.000 kr	E Årlig el- produktion MWh	K/P Kr/kW	E/P Timer _{fuldlast}	K/E Kr/kWh/år
1. Swan DK3	203	4.883	237	24.052	1.166	21
2. Point Absorber PA9801	120	1.845	128	15.375	1.069	14
3. Wave Dragon	4.400	51.850	4.261	11.784	968	12
4. Wave Plunger	207	1.868	224	9.022	1.080	8
5. TB Bølgeturbine	48	1.410	80	29.375	1.668	18
Udenlandske systemer						
6. Pelamis (UK)	597	9.112	937	15.314	1.570	10

Tabel 5. Energiøkonomiske forhold for de enkelte systemer.

Bølgeprogram/bølgeforening

Finanslovsaftalen 1997

I forbindelse med finanslovsaftalen 1997 mellem regeringspartierne, SF og Enhedslisten blev der iværksat et fireårigt udviklingsprogram for bølgekraft, det danske Bølgekraftprogram, med et rammebeløb på ca. 40 mio. kr. Heraf er der afsat 20 mio. kr. i årene 1998 - 1999 til afklaring af de teknologiske muligheder for udnyttelse af bølgekraft på basis af en bred udvikling. Med regeringsskiftet i november 2001 blev forventningerne om en yderligere firårig struktureret udviklingsperiode for bølgekraft aflyst, på et tidspunkt hvor flere loven- de systemer var klar til afprøvning i større skala.

Bølgekraftprogrammet

Bølgekraftprogrammet administreres af Energi- styrelsen og er opbygget efter samme model som vindmølleprogrammet i 70'erne, som satsede på en bred udvikling "nedefra og op" i overensstem- melse med folkelige danske traditioner - en frem- gangsmåde der har haft væsentlig betydning for Danmarks ledende position på vindkraftområdet.

Bølgekraftprogrammet var opbygget med tre projektfaser i udviklingsprocessen:

- Fase 1 projekter, som var individuelle idepro- jekter på et tidligt stade. Disse projekter kunne få dækket udgifter til materialer og simpel af- prøvning op til 50.000 kr.
- Fase 2 projekter, som inkluderede et bredere samarbejde mellem opfinder og relevante in- stitutioner med henblik på videregående ud- vikling og afprøvning. Støtterammen i fase 2 er typisk op til 500.000 kr.
- Fase 3 projekter, som er pilotprojekter til vi- deregående målinger og afprøvning i havet. Her er der tale om støtterammer på 10 -20 mio. kr.

Bølgekraftprogrammets mål var at finde frem til den eller de bølgeenergimaskiner, der kan føre bølgekraft til et kommercielt gennembrud. Inden programmets formelle afslutning i marts 2002 opnåede eksempelvis projektet Wave-Dragon støtte på ca. 10 mio. kr. til afprøvning af en mindre pro- totype i Nissum bredning. Information om de støt- tede projekter og programmet kan findes på hjem- mesiden om bølgekraft www.waveenergy.dk

Bølgekraftudvalget

Til gennemførelse af Bølgekraftprogrammet blev nedsat et rådgivende udvalg for Energistyrelsen med Professor Niels I. Meyer (DTU) som for- mand. Udvalgets øvrige medlemmer har været: afdelingsleder Michael MacDonald Arnskov (Dansk Maritimt Institut), lektor Carl Erik Vad

Bennetzen (Bølgekraftforeningen og Odense Teknikum), professor Hans F. Burcharth (AUC), civilingeniør Jan Bünger (Energistyrelsen), af- delingsleder Vagner Jacobsen (Dansk Hydraulisk Institut), forstander Preben Mægaard (Nordvest- jysk Folkecenter for Vedvarende Energi), for- mand Stig Vindeløv (Bølgekraftforeningen). Lic.techn. Kim Nielsen (Rambøll) har fungeret som udvalgets sekretær. Desuden har professor Jens Nørkær Sørensen (DTU) deltaget i udval- gets møder som faglig konsulent.

Udvalget har varetaget programmets gennemførelse, herunder rådgivning om tilrette- læggelsen af den samlede udviklingsindsats og indstilling af konkrete, kvalificerede projekter til støtte. Udvalget kan efter behov nedsætte vur- derings- og konceptudvalg i forbindelse med prioriteringen af støttegivingen.

Bølgekraftsekretariatet: RAMBØLL, Tekniker- byen 31, 2830 Virum, att. Kim Nielsen, E-mail: Kin@ramboll.dk

Bølgekraftforeningen

Bølgekraftforeningen blev stiftet den 8. marts 1997 i Odense på et møde med ca. 40 deltagere. Foreningens formål er at fremme udviklingen af bølgekraft ved at skabe et forum for videnud- veksling og debat, samt at skabe adgang til uden- og indendørsfaciliteter for afprøvning af nye ide- er til bølgekraftmaskiner. Foreningen udarbejder i samarbejde med Energistyrelsen en kravspecifi- kation til afprøvningsfaciliteter og samarbejder med Energistyrelsen om vurdering af nye bølge- kraftideer.

Foreningen er dannet med baggrund i et netværk af ca. 300 mennesker med interesse for bølgekraft, som Stig Vindeløv fra Nordvestjysk Folkecenter for Vedvarende Energi har etableret og opretholdt kontakt med siden det Nordiske Bølgeenergimøde i Hanstholm i 1992. Forenin- gen har i dag ca. 120 betalende medlemmer.

Bølgekraftforeningen holder kontakt med og udbygger bølgekraftmiljøet bl.a. ved at afholde bølgetræf og støtte nye ideer, som kombineret med et kontinuerligt nationalt udviklingsprogram og støtteordninger kan lede til det endelige gen- nembrud for bølgekraft. På sigt forventer forenin- gen, at Danmark kan blive førende på bølgekraf- tområdet, som landet nu er på vindmølleområdet, med deraf følgende betydelige eksportmuligheder.

Bølgekraftforeningen: Kammergårdsvej 16B, 7760 Hurup, Thy, att. Stig Vindeløv, e-mail: wave@mail.mira.dk

Ordforklaring

Bølgeeffekt pr. meter bølgefront:	Proportional med bølgehøjden i anden potens og direkte proportional med bølgeperioden.
Bølgeenergi:	Proportional med bølgehøjden i anden potens.
Bølgefrequens:	Antal bølger pr. sekund, som passerer en fast position (omvendt proportional med bølgeperioden).
Bølgehøjde:	Lodret afstand fra bølgetop til bølgedal.
Bølgekraftprogrammet:	Det danske program til støtte af udvikling af bølgekraftanlæg.
Bølgelængde:	Vandret afstand mellem tilsvarende punkter på to på hinanden følgende bølger, f.eks. mellem to bølgetoppe.
Bølgeperiode:	Tidsforløbet mellem passagen af to tilsvarende punkter på bølgen (f.eks. mellem passagen af to bølgetoppe) målt på en fast position.
Design-søtilstand:	Søtilstand, som bølgeenergianlægget designes til at overleve. Det er en søtilstand med meget store bølger, som kun optræder med en lille sandsynlighed f.eks. i 20 minutter pr. 50 år.
Dønninger:	Bølger, der har bevæget sig ud af det vindområde som skabte dem; ofte lange og mere regelmæssige end den "sø" der skabes, mens vinden tilfører havet energi. Dønninger kan bevæge sig over meget lange afstande uden væsentligt energitab.
Elektrogenerator = Elgenerator:	Maskine som kan producere elektrisk strøm.
Line-absorber:	En række sammenkoblede point-absorbere.
Oscillating Water Column (OWC):	Et bølgeenergianlæg, der virker ved, at bølgerne sætter en vand-søjle i et kammer i en svingning op og ned. Kammeret er åbent til havet under havoverfladen og til atmosfæren gennem en åbning, hvor der er placeret en Wells turbine. Der produceres elektricitet, når luften skiftevis presses ud og suges ind gennem turbinen, som er koblet til en el-generator.
Overskylningsanlæg = Opskylsanlæg:	Bølgeenergianlæg, hvor havets bølger ledes op i et reservoir med et højere liggende vandspejl end havets middelloverflade. Vandet i reservoiret løber tilbage i havet gennem en vandturbine tilsluttet en el-generator.
Point absorber:	Et bølgekraftanlæg, som består af en flyder, som er relativt lille i forhold til de normale bølgelængder i havet. Bølgenes kræfter på flyderen bevæger den op og ned, og energien omformes enten ved brug af pumper eller ved at benytte et OWC princip.
Power take off (PTO):	Kraftomformningssystem, der omformer bølgenes energi typisk til mekanisk energi som videreomformes til elektricitet.
Signifikant bølgehøjde (Hs):	Gennemsnitshøjden af den største tredjedel af bølgerne i en søtilstand.
Slækt forankret:	Løst forankret (kæde og anker).
Strømningsmaskiner:	Maskiner, hvor en strøm af luft eller vand trækker en rotor bestående af vinger eller løbeskovle (f.eks. vand- eller luftturbiner eller vindmøller). Den skabte rotation kan f.eks. bruges til at trække en el-generator.
Søtilstand:	En tilstand, som er tilnærmelsesvis stationær i et begrænset tidsrum (ca. 20 min.). En søtilstand kan beskrives ved en signifikant bølgehøjde H_s og middelperiode T_z .
Wells turbine:	Strømningsmaskine, der er specielt udviklet til OWC bølgeenergianlæg af Allan Wells. Den er kendetegnet ved, at luften der driver løbeskovlene kan komme aksialt og skiftevis fra begge sider, mens rotationsretningen på akslen forbliver konstant.

