

Kortlægning af
bølgeenergiforhold
i den danske del af
Nordsøen

ENERGISTYRELSEN
J.no. 51191/97-0014

Juni 1999

Sag	980398		
J.nr.	05001	Udarb.	KIN (RAMBØLL) og MNR
	(DHI)		
Udg.	Endelig rapport	Kontrol	
Dato	1999-06-04	Godk.	

Indholdsfortegnelse

1. INDLEDNING	1
1.1 RAPPORTENS INDHOLD	1
2. KONKLUSION	2
3. BAGGRUND	3
4. FREMGANGSMÅDE	4
5. FORMÅL OG ANVENDELSER	5
6. BØLGEENERGIFORHOLD I NORDSØEN	6
6.1 DATAANALYSE.....	6
6.2 OVERSICHT OVER BØLGEENERGIFORHOLDENE PÅ UDVALGTE PUNKTER I NORDSØEN.....	7
6.3 BØLGEENERGIFLUXENS ÅRSVARIATION I PERIODEN 1979 TIL 1993	7
6.4 BØLGEENERGIFLUXENS ÅRSTIDSVARIATION.....	8
6.5 BØLGEHØJDE- OG BØLGEPERIODEFORHOLD	9
6.6 RETNINGSVARIATIONER	11
6.7 DESIGNFORHOLD.....	13
7. BRUTTO BØLGEENERGIPOTENTIALET	15
8. ANVENDELSE AF DE BEREGNEDE BØLGEENERGIFORHOLD	17
8.1 AFSTAND TIL KYSTEN	17
8.2 BØLGEMASKINERS EFFEKTIVITET	18
8.3 BØLGEMASKINERS ÅRLIGE ENERGIPRODUKTION	18
9. PERSPEKTIVER	20
10. REFERENCER	21
APPENDIKS A NOMENKLATUR OG BEGREBER	
GENERELT	1
MODELLERING AF HAVOVERFLADEN	1
BØLGEENERGISPEKTRETS MOMENTER	2
SIGNIFIKANT BØLGEHØJDE.....	3
MIDDELPERIODEN.....	3
PEAK PERIODEN	3
ENERGIPERIODEN	3
BØLGEENERGIFLUXEN	3
PM-SPEKTRUM	4

APPENDIKS B MODELLERING AF BØLGEFORHOLD I NORDSØEN 1979 - 1993

FREMGANGSMÅDE.....	1
BESKRIVELSE AF DE ANVENDTE VINDDATA	1
VERIFIKATION AF VINDBEREGNINGER.....	4
BESKRIVELSE AF DEN ANVENDTE BØLGEMODEL.....	6
VERIFIKATION AF BØLGEBEREGNINGER	9
SIMULERING AF BØLGEFORHOLD I PERIODEN 1979-1993	12
REFERENCER	15

APPENDIKS C BØLGEFORHOLD FOR 6 UDVALGTE LOKALITETER I NORDSØEN SAMT FJALTRING OG EKOFISK

APPENDIKS D KORT BESKRIVELSE AF DHI'S BØLGEMODELLER INKL. MIKE OSW (PÅ ENGELSK)

1. Indledning

Nærværende undersøgelse af bølgeenergiforholdene i Nordsøen danner baggrund for design, planlægning og vurdering af mulighederne for energiproduktion baseret på bølgekraft i denne del af de danske farvande.

Undersøgelsen er iværksat under det danske Bølgekraftprogram, støttet af Energistyrelsen og udført i samarbejde mellem Danmarks Meteorologiske Institut (DMI), Dansk Hydraulisk Institut (DHI) og RAMBØLL.

Projektet arbejdet har været fordelt mellem parterne således, at DMI (Jens Hesselbjerg) har leveret vinddata, DHI (Morten Rugbjerg) har på basis af disse data beregnet bølgeforsøholdene i den danske del af Nordsøen og analyseret de beregnede data og RAMBØLL (Kim Nielsen) har som projektleder stået for koordinering og sammenfatning af nærværende projektrapport.

1.1 Rapportens indhold

Konklusion på undersøgelsen af bølgeenergiforholdene i den danske del af Nordsøen er beskrevet i Kapitel 2. Projektets baggrund, formål og fremgangsmåde beskrives i henholdsvis Kapitel 3, 4 og 5.

Kapitel 6 beskriver resultatet af det udførte arbejde. Herunder belyses vanddybder, overlevelseshforhold, energipotential, hyppigheden, retningsfordelingen og årstidsfordelingen af de almindelige bølgetilstande i seks udvalgte punkter.

Kapitel 7 viser, hvorledes de anførte bølgedata kan benyttes til at beregne den bruttobølgeenergi der årligt passerer den undersøgte del af Nordsøen.

Kapitel 8 illustrerer, hvorledes de anførte bølgedata kan benyttes til at beregne middelenenergiproduktion for et bølgekraftanlæg placeret ved et af de udvalgte punkter.

Kapitel 9 beskriver fortsatte anvendelsesmuligheder af bølgeatlasset i forbindelse med f.eks. simulering af energiproduktion, indpasning af bølgekraft i el-systemet og samspillet med energi fra havmøller.

Appendiks A: Beskriver de anvendte begreber, nomenklatur og referencer.

Appendiks B: Beskriver fremgangsmåden i den numeriske beregning af bølgeforhold.

Appendiks C: Indeholder tabeller og diagrammer med data for de 6 udvalgte punkter i Nordsøen samt forholdene i referencepunkterne Ekofisk og Fjaltring.

Appendiks D: Giver en kort beskrivelse af DHI's bølgemodel MIKE 21 OSW (på engelsk).

2. Konklusion

På basis af de beregnede bølgeforshold i Nordsøen er der etableret et konsistent datamateriale, som belyser hvorledes de almindelige bølgeforshold og overlevelseshorshold varierer med øget vanddybde og afstand til kysten. Data fra 6 udvalgte punkter i Nordsøen er i dette projekt bearbejdet og præsenteret.

Bruttobølgeenergipotentialet d.v.s. den energi der er bundet i havets bølger og som årligt passer over dansk søterritorium er beregnet til ca. 30 TWh pr. år.

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

En evt. fremtidig udbygning af bølgekraft i Nordsøen må naturligvis foretages under hensyntagen til fiskeri og sejlads, allerede eksisterende installationer som f.eks. olieplatforme, gasledninger og elkabler, m.m., samt det generelle hensyn til miljøet. Disse forholds er ikke analyseret i nærværende rapport.

3. Baggrund

Der eksisterer i dag stor viden om bølgeforholdene på specifikke lokaliteter i Nordsøen, typisk viden fra målinger udført ved olieplatforme. Kystinspektoratet har også bølgemålere placeret nær Vestkysten. Tidligere undersøgelser af Nordsøens bølgeenergipotential er udført og beskrevet blandt andet i Bølgeenergiatlas fra 1982 [1] som bl.a. bearbejdede kortere perioder af bølgemålinger samt observationer fra fyrskibe. Desuden er der som led i et Europæisk bølgekraftprogram under JOULE udarbejdet et Europæisk Bølgeenergiatlas [2], hvor bl.a. bølgemålinger fra Gormfeltet, som den eneste lokalitet i de danske farvande er analyseret. Der har således været behov for et bølgeenergiatlas, som på et ensartet grundlag belyser bølgeenergiforholdene i den danske del af Nordsøen over en længere årrække og på den baggrund er nærværende undersøgelse iværksat.

4. Fremgangsmåde

Bølgeforholdene i den danske del af Nordsøen er beregnet v.h.a. DHI's numeriske bølgemodel MIKE 21 OSW. På basis af vinddata fremskaffet af DMI fra European Centre for Medium Range Weather Forecasting for perioden 1. januar 1979 til 31. december 1993 er de tilhørende bølgeforhold beregnet. Modellens beregningsnet dækker Nordsøen samt Norske Havet med en opløsning på 55,56 km. Dog er afstanden mellem beregningspunkterne i området ud for Vestkysten 18,52 km.

I appendiks B findes en detaljeret beskrivelse af den benyttede fremgangsmåde inklusiv sammenligninger mellem beregnede og målte vind- og bølgedata i Nordsøen. Selve den teoretiske baggrund for bølgemodellen er beskrevet i appendiks D.

5. Formål og anvendelser

Projektets formål er at undersøge og belyse bølgeforholdene i den danske del af Nordsøen. På basis af disse undersøgelser kan man for specifikke lokaliteter

- Beregne energipotentialet i den danske del af Nordsøen;
- Fastsætte overlevelseshold (designforhold).
- Fastsætte relevante søtilstande for modelafprøvningen af bølgekraftanlæg;

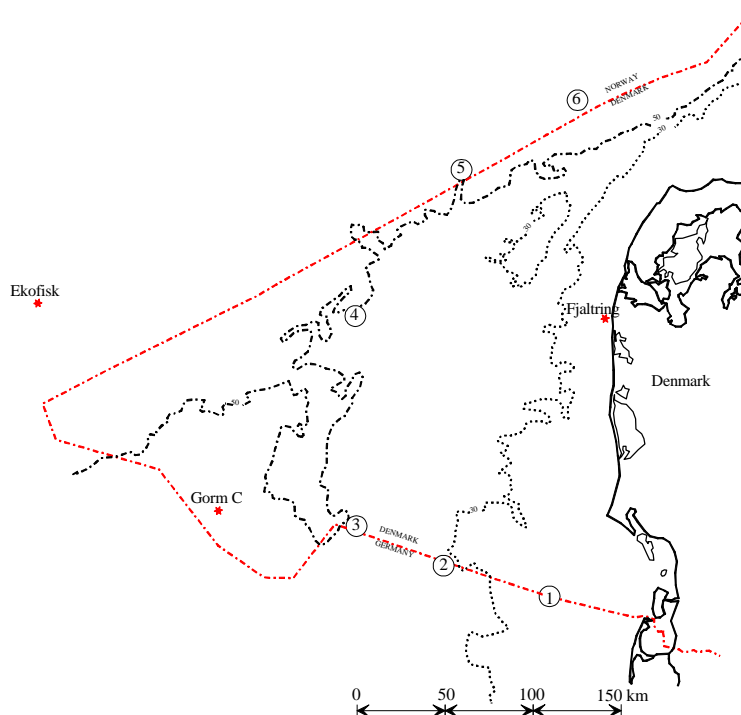
De beregnede bølgeforhold kan endvidere benyttes til

- Vurdering af energiproduktionen fra bølgekraftanlæg;
- Energiøkonomiske sammenligninger af alternative placeringer.

6. Bølgeenergiforhold i Nordsøen

6.1 Dataanalyse

Den danske del af Nordsøen er vist på nedenstående kort med angivelse af henholdsvis 30 og 50 meter dybdekoter samt farvandsgrænserne mod Tyskland og Norge. Data fra bølgemodellen er analyseret i de anførte 6 punkter markeret med cirkler og beregningerne er verificeret mod målte data fra Fjaltring og Ekofisk.



Figur 1 Oversigt over undersøgte lokaliteter

Ved beregningerne er følgende definitioner anvendt:

Bølgeenergiflux/effekt:

Bølgeenergifluxen er defineret som den gennemsnitlige effekt, der passerer en fiktiv lodret cylinder med diameter 1 meter, med udtrækning fra havets overflade til havets bund. Bølgeenergifluxen angives i W/m. I nærværende rapport er bølgeenergiflux og effekt anvendt som synonymmer.

Kystafstand:

Kystafstanden er defineret, som den korteste afstand direkte til Jyllands vestkyst.

Design- og Overlevelseshforhold:

For hver lokalitet er angivet en søtilstand med signifikant bølgehøjde H_{m0} som kun forventes at blive overskredet en gang for hvert 50 år. Denne søtilstand svarer til de bølgeforhold bølgekraftanlægene kan designes til at overleve.

Iøvrigt henvises til appendiks A, hvor nomenklatur og begreber er beskrevet, samt appendiks B hvor metoden er beskrevet i detaljer.

6.2 Oversigt over bølgeenergiformholdene på udvalgte punkter i Nordsøen

Bølgeenergiformholdene for de seks punkter i Nordsøen vist på oversigtskortet figur 1 er anskueliggjort i tabel 1. Af tabellen ses, at både vanddybden og kystafstanden har betydning for lokalitetens energipotential og designforhold.

Tabel 1. Oversigt over bølgeenergi- og bølgedesignforhold i 6 udvalgte punkter i Nordsøen samt Fjaltring og Ekofisk.

	Middel bølgeenergiflux (kW/m)	Kystafstand (km)	Vanddybde (m)	50 års design H_{m0} (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

Vanddybden varierer mod vest fra 20 m ved Punkt 1 (nærmest kysten ved Esbjerg) til ca. 40 m i Punkt 3 og Punkt 4 i en afstand af 150 km fra kysten. I de to nordligste punkter (punkt 5 og 6) er vanddybden henholdsvis 58 m og 166 m. Designbølgehøjden H_{m0} vokser mod vest fra 5,7 m ved Punkt 1 til 9,6 m i Punkt 3. I de to nordligste punkter er designbølgehøjden øget til henholdsvis 11,4 m og 10,6 m bl.a. på grund af den øgede vanddybde.

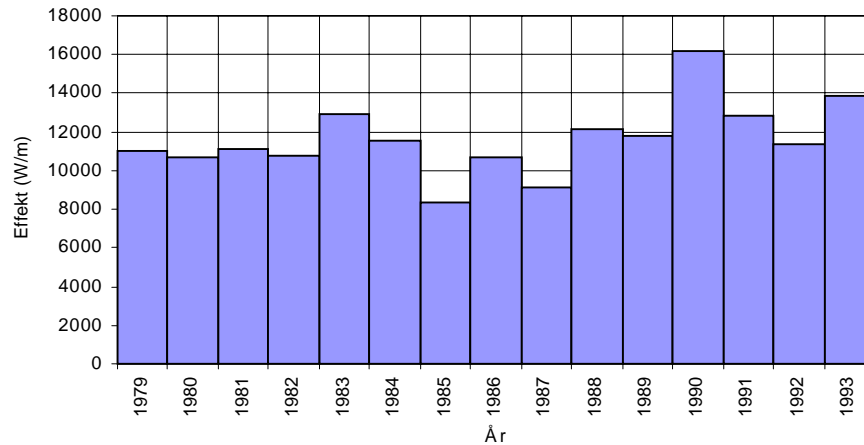
Middelbølgeenergifluxen er 7 kW/m i Punkt 1 (64 km fra land) og vokser til 17 kW/m 150 km fra kysten i Punkt 4. Langs farvandsgrænsen mod Norge aftager middel bølgeenergifluxen fra 17 kW/m til 11 kW/m 68 km nord for Hanstholm.

I de følgende fire afsnit er dataanalysens detailresultater gennemgået. Som eksempel er anvendt Punkt 2. Detailresultaterne for de øvrige punkter samt Fjaltring og Ekofisk findes i appendiks C.

6.3 Bølgeenergifluxens årsvariation i perioden 1979 til 1993

Variationen af den årlige middelbølgeenergiflux i den femten års periode, som indgår i undersøgelsen, er vist for Punkt 2 på figur 2. (Øvrige punkter er vist i appendiks C). Undersøgelsen viser, at der kan være store variationer fra år til år, og at årsmiddelværdien i 1985 var nede på ca. 8 kW/m og i 1990 oppe på ca. 16

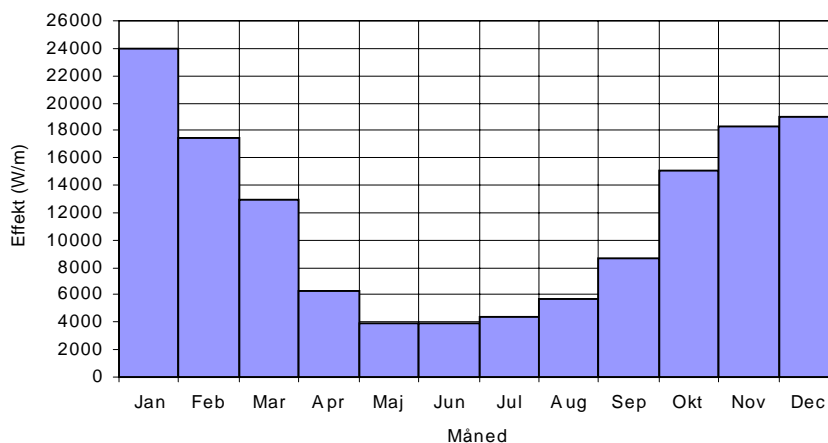
kW/m. Man kan således ikke på basis af et enkelt års målinger fastlægge en positions middelbølgeenergiflux eller umiddelbart sammenligne forskellige lokaliteters bølgeenergiforhold, med mindre målingerne er foretaget inden for samme periode.



Figur 2 Variation i bølgeenergiflux i perioden 1979-1993, Punkt 2.

6.4 Bølgeenergifluxens årstidsvariation

Ser man på middelværdien af bølgeenergifluxen måned for måned, som vist for Punkt 2 på figur 3, beregnet på basis af perioden 1979-1993 fremgår det at gennemsnittet i vinterhalvåret (ca. 17 kW/m) er ca. 3 gange så højt som gennemsnittet af sommermånederne (ca. 5,5 kW/m). Årstidsvariationen for de øvrige punkter, som er vist i appendiks C, udviser samme variationsmønstre.



Figur 3 Månedssvariation af bølgeenergiflux, Punkt 2.

6.5 Bølgehøjde- og bølgeperiodeforhold

For hver lokalitet er bølgeforholdene belyst ved et skatterdiagram, som angiver antallet af timer pr. år, i hvilke forskellige søtilstande i intervaller af 0,5 m signifikant bølgehøjde H_{m0} og middelbølgeperioder T_{02} med intervaller af 1 s. forekommer.

Et sådant skatterdiagram er vist for Punkt 2 i nedenstående tabel 2. Tilsvarende diagrammer er vist i appendiks C for de andre lokaliteter.

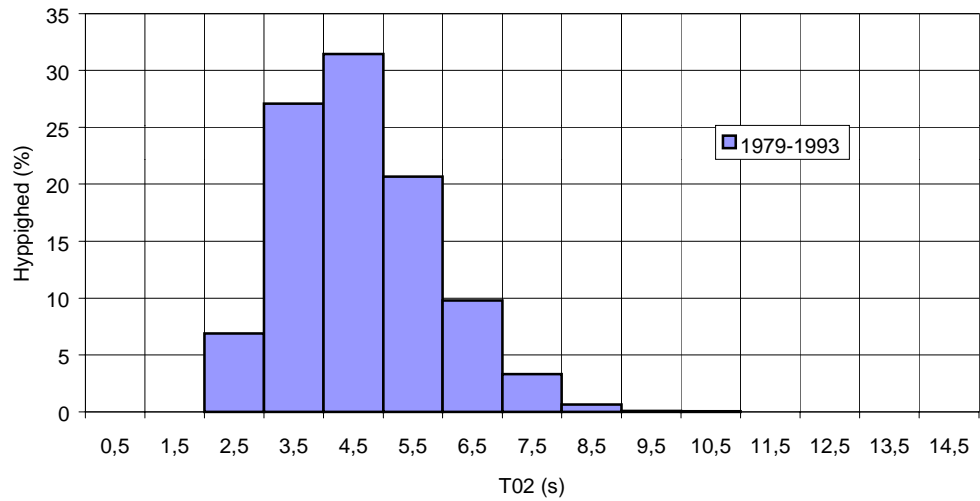
Tabel 2 Skatterdiagram af signifikant bølgehøjde, H_{m0} (m), og middelbølgeperiode, T_{02} (s), Punkt 2.

$H_{m0} \backslash T_{02}$	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	9.0-10.0	Sum	Pct	Akk Pct
8.5-9.0									0	0	0
8.0-8.5									0	0	0
7.5-8.0									0	0	0
7.0-7.5							0	1	1	0	0
6.5-7.0							4	1	5	0	0
6.0-6.5							10		10	0	0
5.5-6.0						2	16		18	0	0
5.0-5.5						26	11		36	0	1
4.5-5.0					0	77	1		78	1	2
4.0-4.5					17	121	0		138	2	3
3.5-4.0					190	34			224	3	6
3.0-3.5				10	314	2			326	4	10
2.5-3.0			0	286	224	1			511	6	15
2.0-2.5			14	710	18	1	0	0	743	8	24
1.5-2.0		1	621	501	8	2	1	1	1135	13	37
1.0-1.5		188	1398	123	25	9	7	3	1753	20	57
0.5-1.0	20	1553	610	153	56	16	6	2	2415	28	84
0.0-0.5	584	634	113	29	7	1	0		1368	16	100
Sum	604	2375	2755	1811	860	291	56	8	8760		
Pct	7	27	31	21	10	3	1	0			

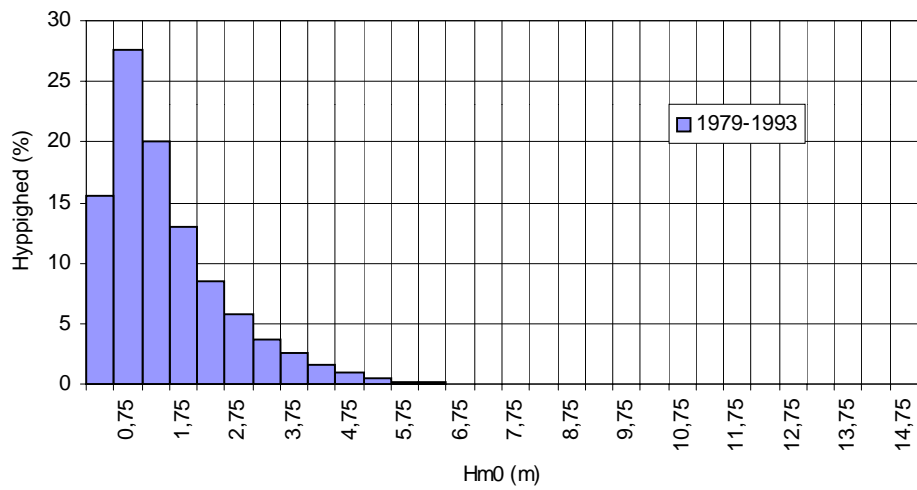
Den procentvise fordeling af bølgeperioder, T_{02} , angivet nederst i tabel 2 kan illustreres grafisk som vist på figur 4. Det ses, at de mest almindelige middelbølgeperioder i Punkt 2 ligger mellem 3 og 6 s.

Den procentvise fordeling af bølgehøjder angivet til højre i tabel 2, kan illustreres grafisk som vist på figur 5. Det ses, at de mest almindelige signifikante bølgehøjder i Punkt 2 ligger mellem 0,5 m. og 1,5 m.

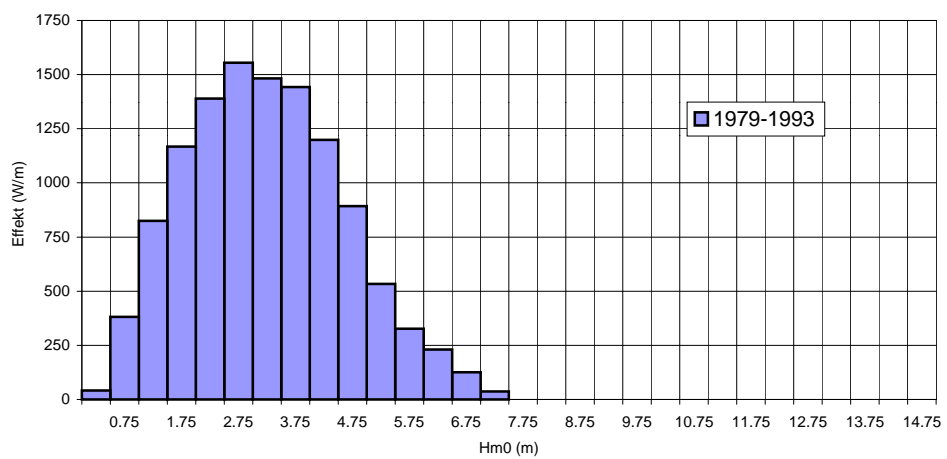
Bidraget til den gennemsnitlige årlige bølgeenergiflux fra de enkelte søtilstande i intervaller på 0,5 m. er vist på figur 6. De største bidrag kommer fra bølger i intervallet fra 2,0 m. til 4,0 m.



Figur 4 Fordeling af middelbølgeperioder T_{02} , Punkt 2.



Figur 5 Fordeling af signifikant bølgehøjde H_{m0} , Punkt 2.



Figur 6 Middeleffektbidrag fra de forskellige søtilstande, Punkt 2.

6.6 Retningsvariationer

Kendskabet til, hvor ofte bølger fra forskellige retninger forekommer, har betydning, hvis energiproduktionen fra bølgekraftværker er følsomme for bølgenes indfaldsretning.

De beregnede bølgeforhold er derfor analyseret efter 8 hovedretninger. Resultatet er vist i nedenstående tabel for Punkt 2. Tabellen viser, hvor mange timer om året en søtilstand i forskellige intervaller af signifikant bølgehøjde forekommer fra forskellige retninger.

Tabel 3 Retningsfordeling af søtilstande H_{m0} (m) i timer pr. år., Punkt 2.

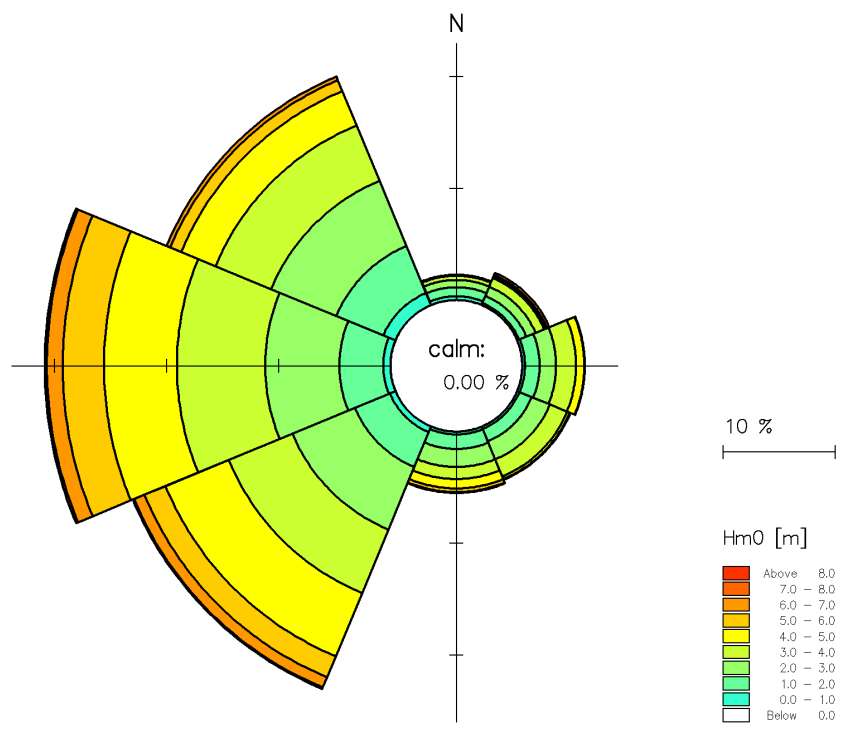
Hm0\Retn	N	NØ	Ø	SØ	S	SV	V	NV	Sum	Pct	Akk Pct
8.5-9.0									0	0	0
8.0-8.5									0	0	0
7.5-8.0									0	0	0
7.0-7.5						1	1		1	0	0
6.5-7.0					0	2	3	0	5	0	0
6.0-6.5		1			0	3	4	1	10	0	0
5.5-6.0	0	1	0	0	0	5	10	2	18	0	0
5.0-5.5		1	0	0	2	11	17	6	36	0	1
4.5-5.0	0	0	3	1	4	26	28	16	78	1	2
4.0-4.5	1	1	6	3	6	48	50	23	138	2	3
3.5-4.0	3	5	19	16	10	58	69	45	224	3	6
3.0-3.5	6	15	20	22	15	76	102	71	326	4	10
2.5-3.0	10	18	32	42	29	125	136	118	511	6	15
2.0-2.5	24	25	42	44	55	173	186	195	743	8	24
1.5-2.0	42	47	92	88	91	226	269	282	1136	13	37
1.0-1.5	106	79	145	121	139	342	363	460	1755	20	57
0.5-1.0	229	136	178	176	187	387	427	698	2417	28	84
0.0-0.5	188	93	118	121	91	181	209	367	1367	16	100
Sum	609	423	655	633	628	1662	1872	2284	8766		
Pct	7	5	7	7	7	19	21	26		100	
Akk Pct	7	12	19	26	34	53	74	100			

Bølger kommer fra forskellige retninger og bølgenes udbredelsesretning følger hovedsagelig vindens retning. Når det er vestenvind kommer bølgerne oftest fra vest, og af tabel 3 ses, at bølger fra vest forekommer i 1872 timer pr. år svarende til 21% af året. Bølger fra vest med signifikant bølgehøjde mellem 1,0 og 1,5 m. forekommer i 363 timer.

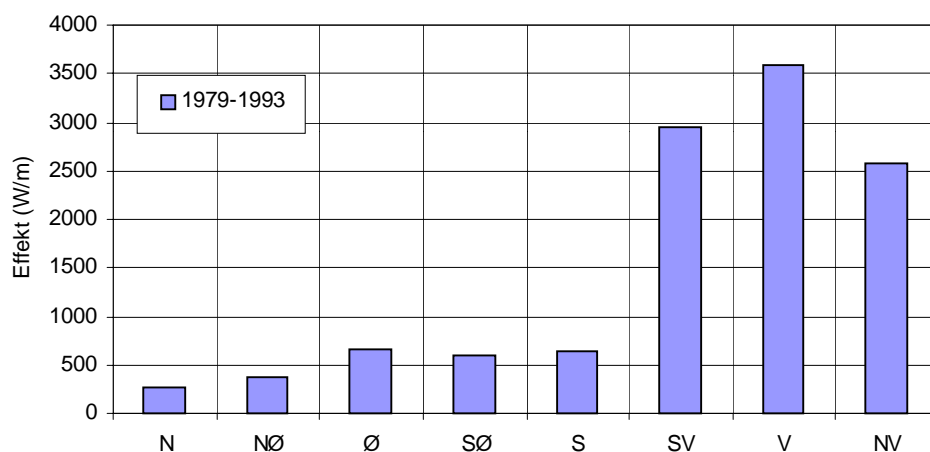
Ser man på hvor store bidrag, der kommer til bølgeenergifluxen fra de forskellige søtilstande og fra de forskellige retninger, kan dette angives som vist i tabel 4 og illustreret grafisk på figur 7 og 8.

Tabel 4 Retningsfordeling af bølgeenergiflux i W/m, Punkt 2.

Hm0\Retn	N	NØ	Ø	SØ	S	SV	V	NV	Sum	Pct	Akk Pct
8.5-9.0									0	0,0	0,0
8.0-8.5									0	0,0	0,0
7.5-8.0									0	0,0	0,0
7.0-7.5						15	22		37	0,3	0,3
6.5-7.0					2	44	69	10	125	1,1	1,4
6.0-6.5		26			6	71	96	31	230	2,0	3,4
5.5-6.0	1	12	1	7	5	83	180	37	326	2,8	6,2
5.0-5.5		7	5	2	34	153	248	85	534	4,6	10,8
4.5-5.0	3	3	36	6	44	294	321	185	892	7,7	18,4
4.0-4.5	8	11	50	22	54	417	436	201	1199	10,3	28,8
3.5-4.0	16	34	120	99	60	373	445	295	1442	12,4	41,2
3.0-3.5	28	63	87	94	65	343	473	329	1482	12,7	53,9
2.5-3.0	30	55	94	123	85	382	420	366	1555	13,4	67,3
2.0-2.5	45	48	77	80	102	321	350	367	1390	12,0	79,2
1.5-2.0	43	46	89	87	90	233	281	298	1167	10,0	89,3
1.0-1.5	50	35	63	52	61	159	174	231	825	7,1	96,4
0.5-1.0	34	20	26	24	27	59	68	123	381	3,3	99,6
0.0-0.5	6	2	3	3	3	5	7	13	42	0,4	100,0
Sum	264	362	651	599	638	2952	3590	2571	11627		
Pct	2,3	3,1	5,6	5,2	5,5	25,4	30,9	22,1		100,0	



Figur 7 Retningsfordeling af bølgeenergiflux, Punkt 2.



Figur 8 Retningsfordeling af bølgeenergiflux, Punkt 2.

6.7

Designforhold

Tidserierne af signifikante bølgehøjder for de enkelte punkter er analyseret ved hjælp af en Peak-Over-Treshhold metode, således at de største søtilstande, der

overskrides en gang under en tidsperiode på henholdsvis 10, 50 og 100 år er bestemt.

Tabel 5 Bølgedesignforhold

	Vanddybde m.	10 års design		50 års design		100 års design	
		H _{m0} (m)	T _p (s)	H _{m0} (m)	T _p (s)	H _{m0} (m)	T _p (s)
Punkt 1	20	5,3	9,6	5,7	10,0	5,9	10,1
Punkt 2	31	7,5	11,4	8,4	12,1	8,7	12,3
Punkt 3	39	9,0	12,5	9,6	12,9	9,9	13,1
Punkt 4	40	8,4	12,1	9,3	12,7	9,6	12,9
Punkt 5	58	9,9	13,1	11,4	14,1	12,1	14,5
Punkt 6	166	9,1	12,6	10,6	13,6	11,2	14,0
Fjaltring	20	5,6	9,9	6,4	10,5	6,7	10,8
Ekofisk	71	11,3	14,0	12,6	14,8	13,2	15,1

Ekstremværdianalysen er udført v.h.a. DHI's EVA program (Extreme Value Analysis), hvor en Weibull-fordeling er fittet til stormsituationer med bølgehøjder over et niveau på 4,0 m til 7,5 m afhængigt af lokaliteten.

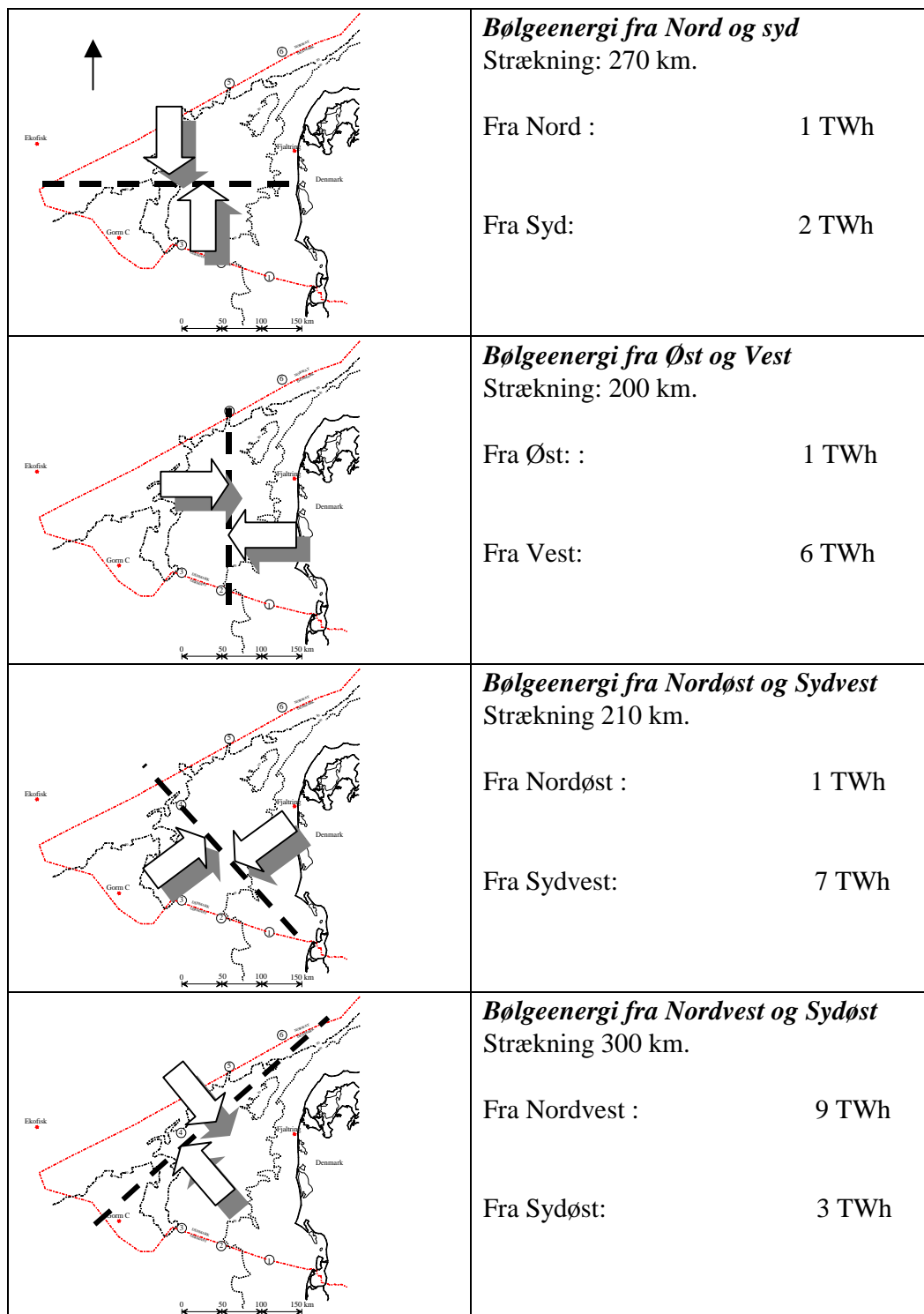
7. Brutto bølgeenergipotential

Det kan være af teoretisk interesse at belyse, hvor meget energi (bruttoenergi) der bundet i bølgerne passerer over dansk søteritorium i Nordsøen. Beregningen er udført på basis af de beregnede middeleffektbidrag der kommer fra hver sektor (nord, syd øst, vest o.s.v.) i de udvalgte punkter. Middeleffektbidragene er vægtet med repræsentative strækninger i den danske del af Nordsøen vinkelret på bølgernes udbredelsesretninger.

Ser man f.eks. på den energi der kommer fra nord er der tale om gennemsnitlig ca. 1 TWh beregnet som antal timer pr. år gange årsmiddelværdien af bølgeenergifluksen fra nord i Punkt 3 og Punkt 4 over en strækning på 180 km, middelværdien af bølgeenergifluksen fra nord i Punkt 2 og 5 over en strækning på 50 km og middelværdien af bølgeenergifluksen i Punkt 1 og 6 over en strækning på 40 km. Ialt er den øst-vestgående strækningen vinkelret på de bølgerne der kommer fra nord på ca. 270 km.

På tilsvarende måde er f.eks bølgeenergifluksen fra vest beregnet som antal timer pr. år gange middelværdien af bølgeenergifluksen fra vest i Punkt 2 og 5 over en nord sydgående strækning på ca. 200 km.

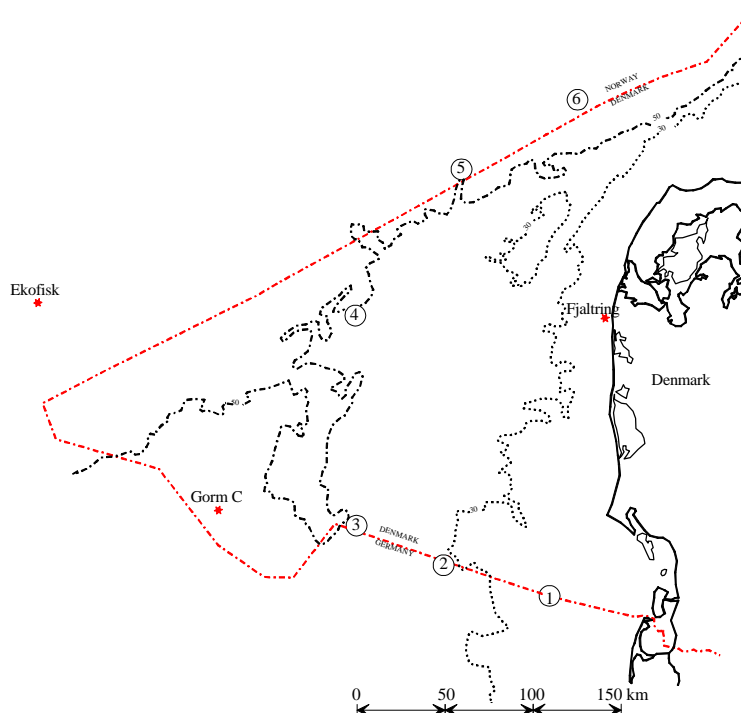
Den således beregnede årlige bruttobølgeenergi fra forskellige retninger og de tilsvarende strækninger vinkelret på udbredelsesretningen er illustreret på figur 9.



Figur 9 Årlig bruttobølgeenergi fra forskellige retninger i den danske del af Nordsøen.

8. Anvendelse af de beregnede bølgeenergiforhold

En indledende vurdering af, hvor bølgekraftværker kan placeres i Nordsøen, må foretages under hensyntagen til en vurdering af den forventede energiproduktion samt udgifterne til anlæg, drift og vedligeholdelse. Det har været formålet med valget af de seks lokaliteter, hvor bølgeforholdene er beskrevet (se figur 10, afsnit 6 og appendiks C) at danne grundlag for en sådan vurdering. Desuden må placeringsmulighederne vurderes i forhold til andre installationer og interesser i Nordsøen.



Figur 10 Energiproduktionen fra en Pointabsorber placeret i de 6 nummererede punkter samt ved Fjaltring og Ekofisk kan beregnes ved brug af de statistiske data i appendiks C.

8.1 Afstand til kysten

En vigtig parameter i vurderingen af placeringsmuligheder er bølgekraftanlæggets afstand fra kysten. Denne vil bl.a. have betydning for:

- Installation, drift og vedligehold af eltransmissionen
- Installation, drift og vedligehold af bølgekraftmaskinerne

De undersøgte punkters afstand fremgår af tabel 1.

8.2 Bølgekraftmaskiners effektivitet

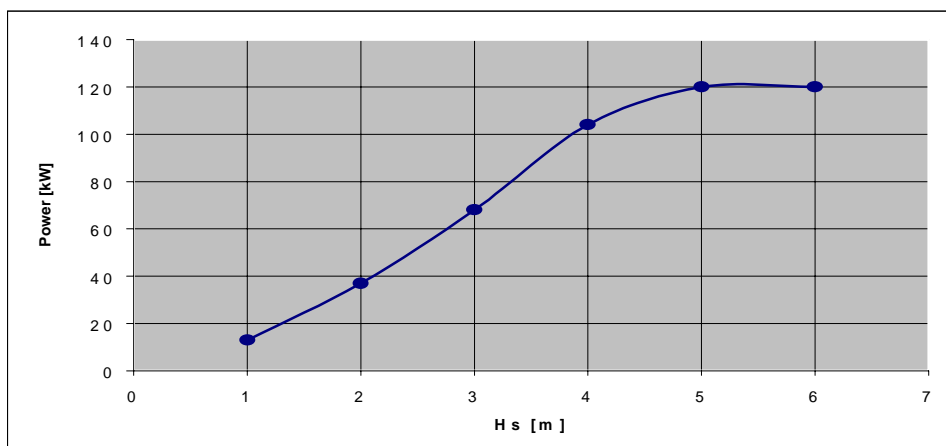
Energiproduktionen fra bølgekraftværker kan beregnes, når der foreligger data fra modelforsøg eller numeriske beregninger over anlæggets effektproduktionen, som funktion af den signifikante bølgehøjde, middelbølgeperioden, bølgeretningen samt bølgespredningen. Dette er bl.a. beskrevet i [3].

Bølgeenergien, der skal drive bølgekraftmaskinens generator, er til rådighed i havområder som Nordsøen. Det gælder således om at konstruere en maskine, der kan drive en generator af en given størrelse så billigt som muligt og udnytte dens kapacitet bedst muligt.

Det er derfor afgørende at finde ud af, hvor meget energi en given bølgekraftmaskine kan producere på årsbasis, og ligesom en vindmølles effektydelse afhænger af vindstyrken, så afhænger en specifik bølgekraftmaskines effektydelse af den signifikante bølgehøjde H_{m0} .

En given bølgekraftmaskines absorberede effekt, P_{abs} , kan derfor angives som funktion af H_{m0} på basis af modelforsøg udført i søtilstande fra f.eks. $H_{m0}= 1\text{m}$. til $H_{m0}= 4\text{ m}$. Relevante kombinationer af H_{m0} og T_{02} kan vælges på basis af tabel 2.

Hvis man i første omgang ser bort fra eventuelle variationer i energiproduktionen pga. middelbølgeperioden, kan man optegne den målte sammenhæng mellem absorberet effekt, P_{abs} , og signifikant bølgehøjde, H_{m0} . På Figur 11 er vist et eksempel, som er taget fra en Pointabsorber.



Figur 11 Grafisk afbildning af en bølgekraftmaskines absorberede effekt, P_{abs} , som funktion af den signifikante bølgehøjde H_{m0}

8.3 Bølgekraftmaskiners årlige energiproduktion

Bølgekraftmaskinens årlige energiproduktion kan herefter beregnes på basis af skatterdiagrammet tabel 2. Af tabellen fremgår det, hvor mange timer per år de enkelte søtilstande forekommer på den pågældende position. For at beregne

bølgekraftmaskinens årlige energiproduktion benyttes den målte effektkurve, og effektydelsen ved forskellige værdier af H_{m0} aflæses.

Beregningen kan udføres som anført i nedenstående skema, hvor bølgekraftmaskinens middeleffekt (kW) er anført for forskellige værdier af H_{m0} .

Tabel 6 Eksempel på beregning af middelenenergiproduktionen, E_{ave} , fra en Pointabsorber med flyderdiameter 10 meter placeret i Punkt 2.

Søtilstand H_{m0} (m)	1	2	3	4	> 5	sum
Absorberet effekt (kW)	13	37	68	104	120	
Timer pr. år	4174	1879	839	362	149	
Energibidrag (kWh/år)	54.262	69.523	57.052	37.648	17.880	236.365

For at belyse hvorledes bølgeenergiatlasset kan benyttes til at vurdere den årlige middelenenergiproduktion fra en bølgekraftmaskine placeret ved de forskellige lokaliteter, anføres i tabel 7 resultatet af tilsvarende energiproduktionsberegninger som anført i tabel 6 udført for de øvrige punkter (Punkt 1 og Punkt 3 til Punkt 6).

Tabel 7 Middelenenergiproduktionen fra en Pointabsorber 10 meter i diameter i de udvalgte Punkter.

Punkt	1	2	3	4	5	6
Energiproduktion (MWh)	174	236	269	279	240	213

Det ses, at energiproduktionen vokser med øget afstand til land. Således vil energiproduktionen fra et bølgekraftværk i en afstand af ca. 150 km fra land (Punkt 3 og 4) være ca. 60% gange større end energiproduktionen fra et kraftværk placeret i Punkt 1 64 km fra land og ca. 30% gange større end fra et kraftværk placeret i Punkt 6, 68 km fra land.

Beregningerne skal ses som et eksempel på anvendelse, idet der ikke er medtaget tab i omformning fra bølgeenergi til elektricitet og tab i forbindelse med eltransmission. Andre typer af bølgekraftmaskiner vil have karakteristika forskellige fra Pointabsorberen anvendt i eksemplet, således at tallene kan variere. Eksemplet skal derfor tages som en illustration af forholdene

9. Perspektiver

De beregnede bølgedata kan indgå i simuleringsmodeller, der belyser nyttevirkningen af energi produceret fra bølgekraftanlæg. En sådan model vil kunne benyttes til at vurdere de energiteknologiske muligheder fra forskellige typer bølgekraftanlæg. Ved at kombinere bølgedata med vinddata og en simuleringsmodel for vindmøller kan man simulere en kombineret energiproduktion fra vind og bølger.

Den anvendte bølgemodel kan i forbindelse med en meteorologisk prognosemodel benyttes til forudsigelse af bølgeforhold f.eks. et døgn frem. Hermed kan også den forventede bølgeenergi beregnes, hvilket evt. kan indpasses i den øvrige daglige danske energiforsyningsplanlægning.

10. Referencer

- [1] *Bølgeenergiatlas*
1985, Kim Nielsen
Instituttet for Skibs og Havteknik
Danmarks Tekniske Universitet
- [2] *WERATLAS, Wave Energy Resource ATLAS*
1995, Teresa Pontes
Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial
- [3] *Forslag til standardisering*
1999, Bølgekraftudvalget
Bølgekraftudvalgets Sekretariat.

APPENDIKS A

Nomenklatur og begreber

Generelt

Dette appendiks giver en generel beskrivelse af forudsætningerne for beregning af bølgeenergifluxen og de begreber som indgår heri.

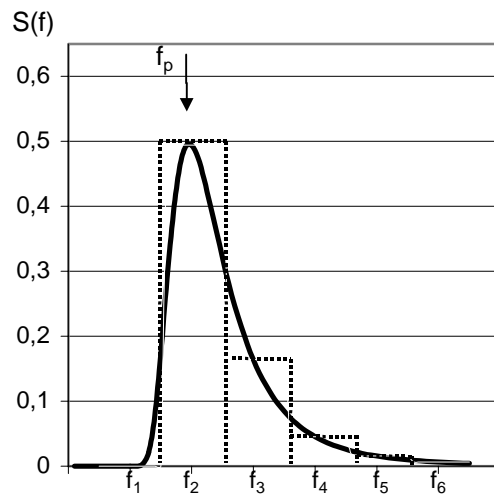
Modellering af havoverfladen

Den signifikante bølgehøjde (H_s eller H_{m0}) er en veletableret parameter, der anvendes til at karakterisere en søtilstand og dens totale energiindhold. En søtilstand indeholder en række enkeltbølger med varierende højder og perioder (og retninger). Til at beskrive energifordelingen i den enkelte søtilstand på perioder (eller frekvenser) anvendes ofte et bølgeenergispektrum. Til mange formål anvendes standardspektra, hvor det mest udbredte spektrum er det såkaldte Pierson-Moskowitz (PM) spektrum, som beskriver energifordelingen på frekvenser i en fuldt udviklet søtilstand. Et andet udbredt spektrum er JONSWAP-spektrret, der er fremkommet som resultatet af et intensivt måleprogram i Nordsøen (JOint North Sea Wave Analysis Program). JONSWAP-spektrret indeholder flere frie parametre end PM-spektrret og er mere velegnet til at beskrive opvoksede og ikke-fuldtudviklede søtilstande.

Den signifikante bølgehøjde kan beregnes ud fra en tidsserie af vandoverflademålinger som gennemsnittet af den højeste tredjedel af bølgerne og betegnes H_s .

Den signifikante bølgehøjde kan også beregnes ud fra en analyse af energien på de enkelte bølgefrequenser i et bølgetog og betegnes i så fald H_{m0} . I en given søtilstand kan havoverfladen opfattes som en overlejring af mange bølger. Herved forstås, at bølgens overflade principielt kan findes ved at lægge overfladeniveauer sammen af en mængde bølger af forskellig højde, retning og frekvens, som hver for sig er sinusformede. Dette kan udtrykkes i et såkaldt bølgeenergispektrum $S(f, \theta)$, som fortæller, hvor megen energi der ligger på de enkelte frekvenser og retninger. På basis af målinger af søtilstande med passende små tidsmellemlrum kan man ad matematisk vej (Fourier-analyse) bestemme tilstrækkeligt mange af disse enkelte bølger (bestemt ved højde, frekvens og retning).

I det følgende betragtes et bølgeenergispektrum, $S(f)$, som kun afhænger af frekvensen. For en beskrivelse af et retningsfrekvensspektrum, $S(f, \theta)$, se [2] i hovedrapporten.



Figur A.1 Bølgespektrum viser energiens fordeling og intensitet på forskellige frekvenser.

Energien i havoverfladen er proportional med bølgehøjden i anden potens. Således er energimængden i bølger med en frekvens omkring f_2 (se figur A2) proportional med arealet af den viste søjle over f_2 . Det totale areal under spektret, m_0 , fås ved at summere arealerne for alle frekvenserne. m_0 indgår bl.a. ved beregning af H_{m0} som beskrevet nedenfor. Toppen af kurven (den højeste strimmel) angiver den frekvens, hvor der er mest energi, peak frekvensen f_p . På basis af f_p beregnes peak perioden T_p som $T_p = 1/f_p$.

I den numeriske model er spektret modelleret med en nedre frekvens på 0.04 Hz (svarende til en bølgeperiode på 25 sek.) og spektret er opløst i 123 "søjler" med en bredde på 0.00375 Hz, dvs. at den højeste frekvens er på 0,5 Hz svarende til en bølgeperiode på 2 sek.

Bølgeenergispiktrets momenter

På basis af energispektret kan den signifikante bølgehøjde $H_{m0}=H_s$, middelperiode $T_{02} = T_z$, peak periode T_p og energiflux P_w beregnes. Dette gøres ved at beregne spektrets momenter m_i , som er defineret ved :

$$m_i = \int f^i S(f) \partial f$$

Således er:

$$m_0 = \int S(f) \partial f$$

$$m_{-1} = \int f^{-1} S(f) \partial f$$

$$m_2 = \int f^2 S(f) \partial f$$

Signifikant bølgehøjde

Den signifikante bølgehøjde, H_s , er defineret som gennemsnittet af den højeste tredjedel af bølgerne i en bølgemåling. Desuden kan den signifikante bølgehøjde med god tilnærmelse beregnes ud fra arealet m_0 under spektret som:

$$H_s = H_{m_0} = 4\sqrt{m_0} \quad (\text{m})$$

Middelperioden

Middelperioden T_{02} defineres ud fra spektrets momenter m_0 og m_2 som:

$$T_{02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (\text{s})$$

Peak perioden

Peak perioden $T_p = 1/f_p$ er den mest energirige bølgeperiode i spektret og findes ved spektrets maksimum. Afhængig af spektrets form er T_p ca. en faktor 1,3 til 1,4 større end middelperioden T_{02} afhængig af spektrets form.

$$T_p = \begin{cases} 1,4 \cdot T_{02} \text{ (s)} & \text{(PM spektrum)} \\ 1,3 \cdot T_{02} \text{ (s)} & \text{(JONSWAP spektrum)} \end{cases}$$

Energiperioden

Energiperioden T_e er en regningsstørrelse defineret som:

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (\text{s})$$

Bølgeenergifluxen

Effekten målt i W/m angiver den energi, der passerer en fast strækning på en meter parallelt med bølgekammen. Effekten kan beregnes ud fra spektret som:

$$P_w = \frac{\rho g^2}{4\pi} m_{-1} \quad (\text{W/m})$$

Effekten kan udtrykkes ved den signifikante bølgehøjde H_s og energiperioden T_e :

$$P_w = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (\text{W/m})$$

PM-spektrum

For at illustrere sammenhængen mellem de ovennævnte formler og begreber anføres et spektrum, som beskriver havoverfladen i den situation, der kaldes "fuldt udviklet sø", hvor der er opnået en balance mellem bølger og vindhastighed, og hvor havområdet er ubegrænset.

Spektret for fuldt udviklet sø kaldes PM-spektret efter de to forskere Pierson og Moskowitz (PM), som på basis af en lang række målinger i havet kom frem til følgende bølgeenergispektrum $S(f)$, som beskriver, hvor meget energi der ligger på de enkelte perioder eller frekvenser:

$$S(f) = \frac{A}{f^5} \exp\left(-\frac{B}{f^4}\right)$$

hvor A er en konstant og B afhænger af vindstyrken U i m/s:

$$A = \frac{8,1 \cdot 10^{-3} \cdot g^2}{(2\pi)^4} = 5 \cdot 10^{-4} \quad (\text{m}^2\text{s}^{-4})$$

$$B(U) = 0,74 \cdot \left(\frac{g}{2\pi U}\right)^4 = 4,39U^{-4} \quad (\text{s}^4)$$

Vindstyrke (m/s)	5	7,5	10	12,5	15
H_s (m)	0,5	1,2	2,1	3,3	4,8
T_z (s)	2,6	3,9	5,2	6,5	7,8
T_e (s)	3,1	4,7	6,3	7,9	9,4
T_p (s)	3,6	5,5	7,3	9,1	10,9
P_w (kW/m)	0,4	3,2	13,1	41,2	103,2

Tabel A.2 Sammenhænge mellem vindstyrke, signifikant bølgehøjde H_s , middelperiode T_z , og effekt P_w for et PM spektrum

APPENDIKS B

Modellering af Bølgeforld i Nordsøen 1979-1993

Fremgangsmåde

For at kunne beskrive de generelle bølgeforhold i Nordsøen er bølgeforholdene, som de er forekommet i perioden 1979-1993 simuleret, hvorefter generelle bølgestatistikker er beregnet.

Til simulering af bølgeforholdene i perioden 1979-1993 er DHI's computerbølgemodel, MIKE 21 OSW, benyttet. Denne model beregner de tidsvarierende bølgeforhold i et kvadratisk beregningsnet indenfor et givent område på basis af de tidsvarierende vindforhold samt vanddybderne indenfor området. En beskrivelse (på engelsk) af DHI's bølgemodeller inkl. MIKE 21 OSW er vedlagt som bilag D.

De anvendte vinddata er leveret fra ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasting) af DMI.

Før hele perioden fra 1979-1993 er simuleret og med det formål at beskrive de simulerede bølgeforholds nøjagtighed, er resultaterne fra bølgemodellen fra kortere perioder sammenlignet med målinger fra bølgemålere fra to forskellige lokaliteter i Nordsøen: Ekofisk og Fjaltring. I øvrigt har bølgemodellen tidligere været benyttet på DHI til at beregne bølgeforhold i Nordsøen.

Efter afslutning af de 15 års simulering er tidshistorier af bølgehøjder, -perioder og -retninger i 6 udvalgte punkter samt Ekofisk og Fjaltring udtaget. På basis af disse tidshistorier er de generelle bølgeforhold i de 6+2 punkter beskrevet statistisk og den tilhørende bølgeenergi beregnet. Desuden er designbølgeforholdene beregnet v.h.a. en Peak-Over-Threshold (POT) analyse. De statistiske data samt designdataene er beskrevet i hovedrapporten samt i appendiks C.

Beskrivelse af de anvendte vinddata ECMWF's re-analysemodel

De anvendte vinddata til simuleringen af bølgeforholdene i Nordsøen stammer fra the *European Centre for Medium Range Weather Forecasting* (ECMWF).

I et dedikeret re-analyse (ERA) projekt ved ECMWF har alle tilgængelige observationer fra perioden januar 1979 til december 1993 været analyseret ved hjælp af en fastfrosset version af det operationelle dataassimileringsystem, som beskrevet i [1]. Atmosfærens tilstand repræsenteres ved at tabellere tryk, vind, temperatur og fugtighed i et regulært horisontalt gitter og i flere vertikale lag. Ved "analyse" forstås i denne sammenhæng en konstruktion af en atmosfære tilstand, der er tilnærmet observationer og samtidig er fysisk meningsfuld, hvilket betyder at de tabellerede værdier til stadighed opfylder de termo- og hydrodynamiske love.

ERA projektet har produceret et konsistent 15 års globalt datasæt af assimilerede atmosfæredata for perioden 1979 til 1993. Til re-analysen er anvendt en version af ECMWF's prognosemodel med en horisontal afstand mellem modelgitterpunkter

svarende til omtrent 130 km (se figur B.1). Der er anvendt 31 vertikale lag. Disse datasæt må betegnes som værende af enestående kvalitet. Se endvidere [2].



Figur B.1 Beregningsnet benyttet i ECMWF's meteorologiske model

ECMWF begyndte på sine operationelle aktiviteter i 1979. Lige siden har centrets arkiv af analyser og prognoser været en vigtig datakilde for forskningen. Det benyttes af centrets ansatte og forskere fra det meste af verden til meget forskellige studier og har fundet mange anvendelser. Operationelle analyser, skønt af stor betydning for forskningen, påvirkes af de væsentlige ændringer, der indføres i model, analyseteknik, og brug af observationer, og som udgør en essentiel del af forskningen og udviklingen omkring numerisk vejrforudsigelse. Hertil kommer at disse analyser kun kan benytte observationer, der er til rådighed på beregningstidspunktet (real time). [3] redegjorde for at disse begrænsninger giver anledning til at foretage en konsistent re-analyse af atmosfæriske data. En række forskningsaktiviteter kan drage nytte af et sådan konsistent re-analyse datasæt. Nærværende projekt er blot ét eksempel herpå.

Dataassimilering ved ECMWF foregår, som ved de fleste andre operationelle vejrtjenester – herunder DMI - ved at anvende observationer i sammenhæng med modelberegninger af atmosfærens tilstand. De primære informationer, der indgår i dataassimileringen, stammer fra den frie atmosfære. Kun enkelte

overfladeobservationer medgår, her specielt trykket. På visse områder af jorden over oceanerne, hvor der næsten ingen observationer findes, indgår desuden vindinformation baseret på satellitobservationer af bølgemønstre.

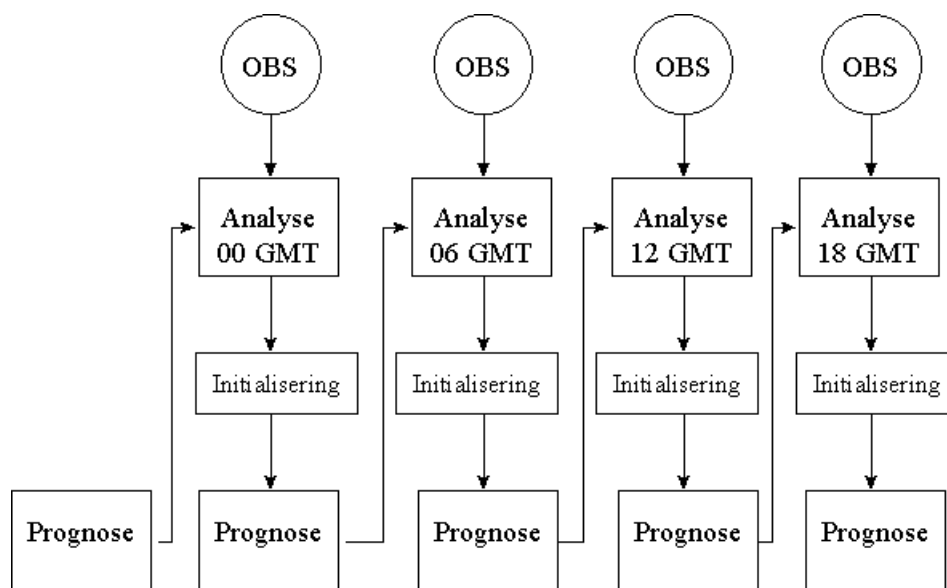
I mange egne af kloden er tætheden af tilgængelige observationer langt under det, der kræves for at kunne foretage en simpel dataanalyse med tilstrækkelig nøjagtighed. I sådanne områder vil analysen hovedsageligt bero på satellitbaserede observationer; såsom "cloud cleared radiance" data, temperatur og fugtigheds profiler baseret på NOAA satellitter, samt vinddata baseret på skybevægelser bestemt ud fra geostationære satellitter. Derfor er det nødvendigt at optimere brugen af observationerne, så man også kan få realistiske estimater af atmosfærens tilstand i de observationsmæssigt set tyndt dækkede områder.

Med en dataassimileringsalgoritme forsøger man at udnytte en numerisk vejrprognose model til at fremføre information om tilstanden af den globale atmosfære fra datarige områder til datafattige områder. Resultater fra prognosemodellen anvendes sammen med observationerne som input til en avanceret analyse, således at modellen på en fysisk konsistent måde tilnærmer observationerne i et område omkring disse.

Resultatet af analysen, efter en såkaldt initialisering (et slags numerisk filter), anvendes dernæst som begyndelsesbetingelse for den næste prognoseberegning. Denne procedure gentages i cyklisk form som illustreret på figur B.2.

Til re-analysen har der været anvendt en opdateringsfrekvens på 6 timer. Prognosemodellen regner 6 timer frem i tiden, hvorefter observationerne til det relevante tidspunkt tages i betragtning i analysen, numerisk støj udglattes og en ny 6 timers prognose beregnes og så fremdeles.

På denne måde kan man sige at dataassimilering over en længere periode svarer til at anvende prognosemodellen som en klimamodel, der er relaxeret mod observationer.



Figur B.2: Data assimilering med 6 timers cyklus

Ud over de konsistent analyserede felter af tryk, temperatur, fugtighed og vindforhold i den fri atmosfære, giver anvendelsen af prognosemodellen mulighed for, at en række diagnosticerede størrelser kan beregnes på en konsistent måde gennem hele re-analyse perioden. Disse størrelser beregnes med prognosemodellen og vil således hele tiden være tæt knyttet til de observerede tilstande i atmosfæren.

En af de diagnosticerede størrelser, som beregnes i ECMWF prognosemodellen, er vinden i 10 meters højde over terrænet. Det er disse vinde, der er benyttet i nærværende projekt, efter en interpolation til det beregningsgitter, som er anvendt i bølgemodellen.

Verifikation af vindberegninger

Selvom der i ovennævnte re-analyseprojekt indgår målinger også fra Nordsøområdet, er der i nærværende projekt foretaget en sammenligning mellem vinddataene fra ECMWF og vindmålinger fra Nordsøen.

Fra Ekofisk-platformen er vindmålinger tilgængelige, og da denne platform ligger vest for den danske del af Nordsøen, dvs. i et af de områder, hvor en vigtig del af de bølger, der når det danske område, genereres, er sammenligningen foretaget for denne lokalitet.

Sammenligningen for en 14 dages periode i 1990 er vist i figur B.3. For både vindhastighed og -retning ses en god overensstemmelse.

Figur B.3 Sammenligning af ECMWF-vinddata med målinger fra Ekofisk.

Beskrivelse af den anvendte bølgemodel

DHI's vind-bølgemodel, MIKE 21 OSW

Hvis man betragter et lukket vandområde (som f.eks. en meget stor sø) med den samme vanddybde over det hele og med vinden blæsende konstant fra en enkelt retning, da vil bølgehøjden i et givet punkt afhænge af :

- det frie stræk, dvs. den strækning foran punktet og op i vindens retning, hvor vinden overfører energi til bølgerne (f.eks. afstanden ind til land i vindens retning)
- vanddybden på det frie stræk (dvs. vanddybden i søen)
- vindhastigheden over det frie stræk
- længden af den periode, hvor vinden påvirker bølgerne på det frie stræk

For dette simple tilfælde kan bølgehøjde og -periode beregnes ved nogle simple formler.

I Nordsøen gælder det imidlertid, at vanddybden ikke er konstant over det frie stræk, samt at vindhastigheden og vindretningen ikke er konstante men varierer både med tiden og fra område til område. De simple formler kan derfor ikke benyttes, og en avanceret numerisk bølgemodel som DHI's MIKE 21 OSW må tages i anvendelse.

MIKE 21 OSW (Offshore Spectral Wind-wave module) beregner vindbølgers opvoksen, udbredelse og henfald. I bølgeberegningerne inkluderes

- refraction og shoaling (bølgenes drejning og deformation pga. varierende vanddybde)
- henfald pga. bundfriktion og brydning
- opvoksen pga. vinden
- overførsel af energi fra kortere til længere bølger.

En generel beskrivelse af MIKE 21 OSW inkluderet som appendiks D.

Beregningerne foretages i et beregningsnet med $\frac{1}{2}$ breddegrad imellem beregningspunkterne svarende til 55,56 km. I området tæt ved Jyllands Vestkyst, som er af speciel interesse i nærværende projekt, er beregningsnettet imidlertid gjort tre gange finere for bedre at kunne beskrive dybdevariationerne i dette område. Her er der således 18,52 km mellem beregningspunkterne. Begge beregningsnet er vist i figur B.4, mens beregningspunkternes placering fremgår af tabel B.1.

Tabel B.1 Definition af bølgemodelberegningsnet

	Groft net	Fint net
Netvidde (km)	55,56	18,52
Udstrækning (J,K)	(0..26,0..40)	(0..21,0..31)
Længdegrad (°N)	5 + $((J-16)/2)/\cos(\text{breddegrad})$	5 + $((J+6)/6)/\cos(\text{breddegrad})$
Breddegrad (°Ø)	50 + K/2	54,5 + K/6

I modelberegningerne er anvendt følgende diskretisering:

55,56 km beregningsnet:

- 16 retninger
- 123 bølgefrequenser fra 0,04 Hz til 0,4975 Hz med en afstand på 0,00375 Hz – dvs. bølgeperioder fra 2 s til 25 s er inkluderet
- 60 minutters tidstrin

18,52 km beregningsnet:

- 16 retninger
- 123 bølgefrequenser fra 0,04 Hz til 0,4975 Hz med en afstand på 0,00375 Hz - dvs bølgeperioder fra 2 s til 25 s er inkluderet
- 20 minutters tidstrin

Figur B.4 Beregningsnet anvendt i DHIs bølgemodel

Verifikation af bølgeberegninger

DHI har gennem mange år anvendt MIKE 21 OSW til at beregne bølgeforhold i Nordsøen. Modellen kan således allerede betragtes som kalibreret ("tunet") til forholdene i dette havområde. Alligevel er der som en del af nærværende projekt foretaget enkelte sammenligninger mellem bølgemodellens beregningsresultater og målinger.

Fra Ekofisk-plattformen er bølgemålinger tilgængelige, og da denne platform ligger vest for den danske del af Nordsøen, dvs. i et af de områder, hvor en vigtig del af de bølger der når det danske område genereres, er sammenligningen foretaget for denne lokalitet. Desuden er der foretaget en sammenligning med Kystinspektoratets målinger fra Fjaltring.

Sammenligningen for en 14 dages periode i 1990 (Ekofisk) og i 1993 (Fjaltring) er vist i figur B.5 og B.6. For begge lokaliteter ses en god overensstemmelse.

Figur B.5 Sammenligning af bølgedata med målinger fra Ekofisk.

Figur B.6 Sammenligning af bølgedata med målinger fra Fjaltring.

Simulering af bølgeforhold i perioden 1979-1993

Med de i afsnit 2 beskrevne vinddata og med den i afsnit 3 beskrevne bølgemodel er bølgefelter for hver time beregnet i 55,56 km nettet og for hver 20 min i 18,52 km nettet i hele perioden 1. januar 1979 kl 00.00 til 31. december 1993 kl 24.00.

Som eksempel på beregningerne er de beregnede bølgeforhold i punkt 4 i 1993 vist i figur B.7. Desuden er bølgehøjder i 18,52 km området 22. januar 1993 kl 12 vist i figur B.8.

De beregnede bølgedata er herefter behandlet statistisk som beskrevet i hovedrapporten.

Figur B.7 Beregnede bølgeforshold i punkt 4 i 1993.

Figur B.8 Beregnede bølgefelt i 18,52 km nettet 22. januar 1993 kl 12.

Referencer

- [1] Gibson, J.K., Kållberg, P., Uppala, S., Nomura, A., Hernandez, A., and Serrano, E., 1997: ERA Description. *ECMWF Re-Analyis Project Report Series*, **1**.
- [2] Kållberg, P. 1997: Aspects of the Re-Analysed Climate. *ECMWF Re-Analyis Project Report Series*, **2**.
- [3] Bengtsson, L. and Shukla, J., 1988: Integration of Space and In Situ Observations to Study Global Climate Change. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **69**, 1130-1143.

APPENDIKS C

Bølgeenergiforhold for 6 udvalgte lokaliteter i Nordsøen samt Fjaltring og Ekofisk

Figur C1 Oversigt over undersøgte lokaliteter

Lokalitet: Punkt 1

- Blad 1 Variation i bølgeenergiflux i perioden 1979-1993
Månedsvariation af bølgeenergiflux
- Blad 2 Fordeling af middelbølgeperioder T_{02}
Fordeling af signifikant bølgehøjde H_{m0}
Middeleffektbidrag fra de forskellige søtilstande
Retningsfordeling af bølgeenergiflux
- Blad 3 Skatterdiagram af signifikant bølgehøjde, H_{m0} (m), mod
middelbølgeperiode, T_{02} (s)
- Blad 4 Retningsfordeling af søtilstande (m) i timer pr. år
- Blad 5 Retningsfordeling af bølgeenergiflux i W/m
- Blad 6 Retningsfordeling af bølgeenergiflux

Lokalitet: Punkt 2

- Blad 1 Variation i bølgeenergiflux i perioden 1979-1993
Månedsvariation af bølgeenergiflux
- Blad 2 Fordeling af middelbølgeperioder T_{02}
Fordeling af signifikant bølgehøjde H_{m0}
Middeleffektbidrag fra de forskellige søtilstande
Retningsfordeling af bølgeenergiflux
- Blad 3 Skatterdiagram af signifikant bølgehøjde, H_{m0} (m), mod
middelbølgeperiode, T_{02} (s)
- Blad 4 Retningsfordeling af søtilstande (m) i timer pr. år
- Blad 5 Retningsfordeling af bølgeenergiflux i W/m
- Blad 6 Retningsfordeling af bølgeenergiflux

Lokalitet: Punkt 3

- Blad 1 Variation i bølgeenergiflux i perioden 1979-1993
Månedsvariation af bølgeenergiflux
- Blad 2 Fordeling af middelbølgeperioder T_{02}
Fordeling af signifikant bølgehøjde H_{m0}
Middelleffektbidrag fra de forskellige søtilstande
Retningsfordeling af bølgeenergiflux
- Blad 3 Skatterdiagram af signifikant bølgehøjde, H_{m0} (m), mod
middelbølgeperiode, T_{02} (s)
- Blad 4 Retningsfordeling af søtilstande (m) i timer pr. år
- Blad 5 Retningsfordeling af bølgeenergiflux i W/m
- Blad 6 Retningsfordeling af bølgeenergiflux

Lokalitet: Punkt 4

- Blad 1 Variation i bølgeenergiflux i perioden 1979-1993
Månedsvariation af bølgeenergiflux
- Blad 2 Fordeling af middelbølgeperioder T_{02}
Fordeling af signifikant bølgehøjde H_{m0}
Middelleffektbidrag fra de forskellige søtilstande
Retningsfordeling af bølgeenergiflux
- Blad 3 Skatterdiagram af signifikant bølgehøjde, H_{m0} (m), mod
middelbølgeperiode, T_{02} (s)
- Blad 4 Retningsfordeling af søtilstande (m) i timer pr. år
- Blad 5 Retningsfordeling af bølgeenergiflux i W/m
- Blad 6 Retningsfordeling af bølgeenergiflux

Lokalitet: Punkt 5

- Blad 1 Variation i bølgeenergiflux i perioden 1979-1993
Månedsvariation af bølgeenergiflux
- Blad 2 Fordeling af middelbølgeperioder T_{02}
Fordeling af signifikant bølgehøjde H_{m0}
Middelleffektbidrag fra de forskellige søtilstande
Retningsfordeling af bølgeenergiflux
- Blad 3 Skatterdiagram af signifikant bølgehøjde, H_{m0} (m), mod
middelbølgeperiode, T_{02} (s)
- Blad 4 Retningsfordeling af søtilstande (m) i timer pr. år
- Blad 5 Retningsfordeling af bølgeenergiflux i W/m
- Blad 6 Retningsfordeling af bølgeenergiflux

Lokalitet: Punkt 6

- Blad 1 Variation i bølgeenergiflux i perioden 1979-1993
Månedsvariation af bølgeenergiflux
- Blad 2 Fordeling af middelbølgeperioder T_{02}
Fordeling af signifikant bølgehøjde H_{m0}
Middelleffektbidrag fra de forskellige søtilstande
Retningsfordeling af bølgeenergiflux
- Blad 3 Skatterdiagram af signifikant bølgehøjde, H_{m0} (m), mod
middelbølgeperiode, T_{02} (s)
- Blad 4 Retningsfordeling af søtilstande (m) i timer pr. år
- Blad 5 Retningsfordeling af bølgeenergiflux i W/m
- Blad 6 Retningsfordeling af bølgeenergiflux

Lokalitet: Fjaltring

- Blad 1 Variation i bølgeenergiflux i perioden 1979-1993
Månedsvariation af bølgeenergiflux
- Blad 2 Fordeling af middelbølgeperioder T_{02}
Fordeling af signifikant bølgehøjde H_{m0}
Middelleffektbidrag fra de forskellige søtilstande
Retningsfordeling af bølgeenergiflux
- Blad 3 Skatterdiagram af signifikant bølgehøjde, H_{m0} (m), mod
middelbølgeperiode, T_{02} (s)
- Blad 4 Retningsfordeling af søtilstande (m) i timer pr. år
- Blad 5 Retningsfordeling af bølgeenergiflux i W/m
- Blad 6 Retningsfordeling af bølgeenergiflux

Lokalitet: Ekofisk

- Blad 1 Variation i bølgeenergiflux i perioden 1979-1993
Månedsvariation af bølgeenergiflux
- Blad 2 Fordeling af middelbølgeperioder T_{02}
Fordeling af signifikant bølgehøjde H_{m0}
Middelleffektbidrag fra de forskellige søtilstande
Retningsfordeling af bølgeenergiflux
- Blad 3 Skatterdiagram af signifikant bølgehøjde, H_{m0} (m), mod
middelbølgeperiode, T_{02} (s)
- Blad 4 Retningsfordeling af søtilstande (m) i timer pr. år
- Blad 5 Retningsfordeling af bølgeenergiflux i W/m
- Blad 6 Retningsfordeling af bølgeenergiflux

APPENDIKS D

***Kort beskrivelse af DHI's
Bølgemodeller inkl. MIKE 21 OSW
(på engelsk)***