



**AALBORG UNIVERSITY**  
DENMARK

**Aalborg Universitet**

## **Wave Star**

*foreløbige hovedkonklusioner på skala 1:40 modelforsøg*

Kramer, Morten; Frigaard, Peter; Brorsen, Michael

*Publication date:*  
2004

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

### *Citation for published version (APA):*

Kramer, M., Frigaard, P., & Brorsen, M. (2004). Wave Star: foreløbige hovedkonklusioner på skala 1:40 modelforsøg. (1 udg.) Aalborg: Department of Civil Engineering, Aalborg University. Hydraulics and Coastal Engineering, Nr. 12

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- ? Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- ? You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- ? You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

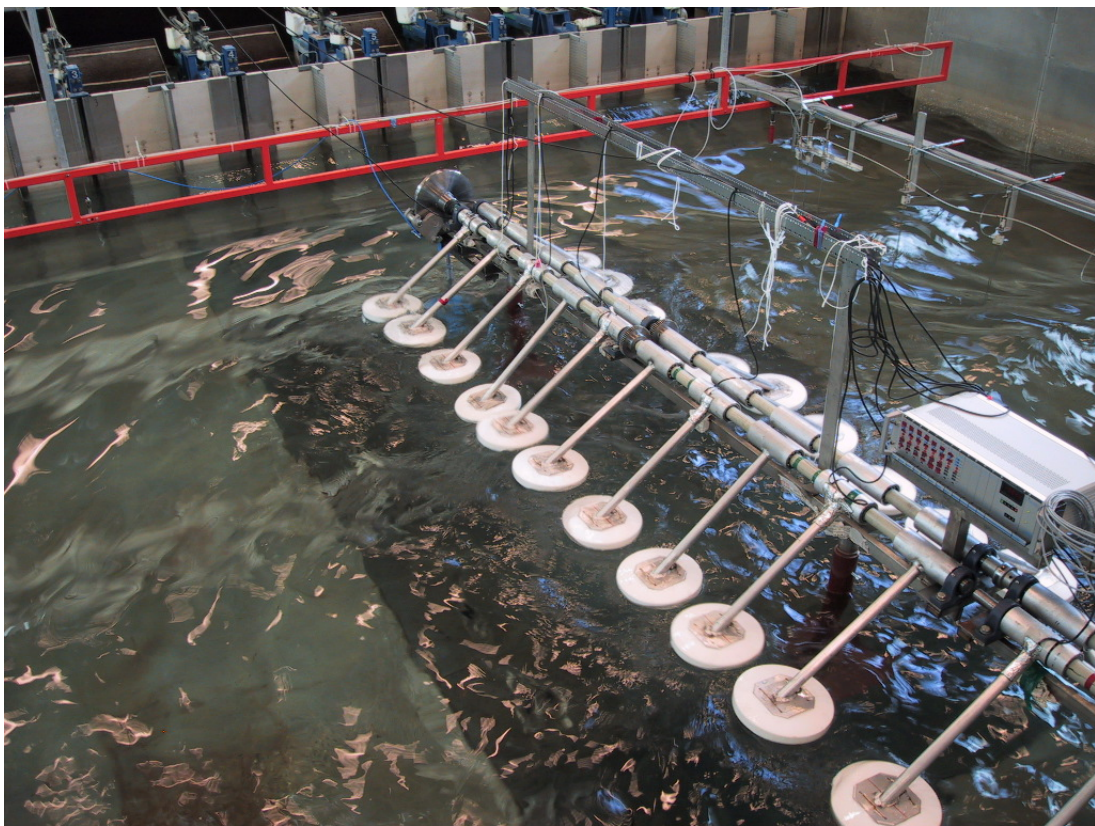
### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# Wave Star

–

Foreløbige hovedkonklusioner på skala 1:40 modelforsøg



Under PSO2004-projektet FU4301

Morten Kramer, Peter Frigaard & Michael Brorsen  
November, 2004





# DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

AALBORG UNIVERSITY

SOHNGAARDSHOLMSVEJ 57 DK-9000 AALBORG DENMARK

TELEPHONE +45 96 35 80 80 TELEFAX +45 98 14 25 55

**Hydraulics and Coastal Engineering No. 12**

**ISSN: 1603-9874**

## Wave Star

Foreløbige hovedkonklusioner på skala 1:40 modelforsøg

Morten Kramer, Peter Frigaard & Michael Brorsen



## Forord

Nærværende skrift beskriver foreløbige hovedkonklusioner på modelforsøg udført på Aalborg Universitet, Institut for Vand, Jord og Miljøteknik med bølgeenergianlægget Wave Star i perioden 13/9-04 til 12/11-04. Forsøgene er foretaget på foranledning af Per Resen Steenstrup, administrerende direktør i Wave Star Energy.

Forud for dette skrift er fra Aalborg Universitets side udgivet to rapporter med numeriske beregninger på Wave Star, se Kramer *et al.* 2004a og 2004b samt én rapport vedr. forsøg foretaget i perioden 13/9-04 til 8/10-04, se Kramer & Frigaard 2004.

Den afsluttende forsøgsrapport forventes at udkomme December 2004 eller Januar 2005.

Kontakter vedr. forsøg udført af Aalborg Universitet:

Morten Kramer Sohngaardsholmsvej 57 9000 Aalborg Tlf. 96357230 Fax 98142555 E-mail: i5mkr@civil.aau.dk Web: www.civil.aau.dk
--

eller

Peter Frigaard Sohngaardsholmsvej 57 9000 Aalborg Tlf. 96358479 Fax 98142555 E-mail: peter.frigaard@civil.aau.dk Web: www.civil.aau.dk
--

Kontakt vedr. Wave Star kan rettes til den administrerende direktør:

Per Resen Steenstrup Wave Star Energy Maglemosevej 61 DK-2920 Charlottenlund  Tlf: +45 3940 4696 Fax: +45 3940 4697 E-mail: info@WaveStarEnergy.com Web: www.wavestarenergy.com
---



## Indholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>Indledning</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Konklusion</b> .....	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Referencer</b> .....	<b>8</b>
<b>Bilag I.</b>	<b>Forsøgsopstilling</b> .....	<b>9</b>
<b>Bilag II.</b>	<b>Uregelmæssige Nordsøbølger</b> .....	<b>9</b>
<b>Bilag III.</b>	<b>Uddrag af resultater</b> .....	<b>10</b>
	Bilag III.A Effektproduktion i uregelmæssige bølger .....	10
	Bilag III.B Effektiviteten i uregelmæssige bølger .....	11
	Bilag III.C Effektproduktion i regelmæssige bølger .....	12





## 1 Indledning

Gennem modelforsøgene med Wave Star er der samlet erfaringer med en skala 1:40 model af Wave Star konceptet, og konceptets effektoptag er bestemt i såvel regelmæssige og uregelmæssige bølger svarende til et typisk forekommende bølgeklima i Nordsøen.

Forsøgsopstillingen i bølgebassinet fremgår af Bilag I og de anvendte Nordsøbølger fremgår af Bilag II. Et udpluk af forsøgsresultaterne vedr. effektoptag er gengivet i Bilag III. Det bemærkes, at effektoptaget er målt direkte på modellens power take off svarende til en generator belastning. Modellens effektoptag er fundet som vridningsmomentet i akslen multipliceret med rotationshastigheden, hvor begge parametre er målt direkte på akslen.

Hovedformålet med modelforsøgene er at optimere flyderdesignet (form, vægt, etc.) således konceptets effektoptag maksimeres. Forsøgene er endnu ikke tilendebragt, men ud fra de hidtil udførte 286 forsøg, tegner der sig alligevel et generelt billede af de hovedkonklusioner, som præsenteres efterfølgende.

## 2 Konklusion

Gennem de indledende forsøg med Wave Star er der opnået væsentlige erfaringer med modellen. Forsøgene viser, at anlægget er effektivt i regelmæssige og uregelmæssige bølger for både korte og lange bølger for såvel lave som høje bølger.

Ved afprøvning af flydere med forskellige diametre i trin fra 7, 8 og 10 m i fuld skala (Ø175, Ø200 og Ø250 mm i modelskala) og forskellig geometrier fra flade, svagt krumme og kugleformede flydere, giver kugleflydere det højeste effekt niveau når kuglevægten øges, således kuglen omtrent trykkes ned i vandet til centrum af kuglen.

For en maskine med 40 stk. kugleflydere med en diameter på 8 m i fuld skala er den gennemsnitlige effekt i Nordsøbølgerne målt til 631 kW i fuld skala, hvilket svarer til en årlig energiproduktion på 5516 MWh. På grund af maskinens orientering i forhold til bølgeretningen vil en maskine med halvt så mange flydere, 20 stk., yde et større effektoptag pr. flyder, da skyggevirkningerne fra foran liggende flydere generelt er mindre. For en maskine med 20 flydere, er den gennemsnitlige effekt i Nordsøbølgerne målt til 338 kW i fuld skala, hvilket svarer til en årlig energiproduktion på 2949 MWh.

Maskinen er placeret, således rækken af flydere er parallel med bølgeudbredelsesretningen, se Figur 1. Baggrunden for valget af denne orientering skyldes et ønske om at kunne skabe et forholdsvis kontinuert effektoptag fra maskinen. Dette opnås, da maskinen på den lange led er længere end de længste bølger. Det er bemærkelsesværdigt, at maskinen på trods af den skyggevirkning, som skyldes orienteringen i forhold til bølgerne, er i stand til at opnå høje effektiviteter. I gennemsnit over et år kan maskinen producere 2,5 gange så meget energi, som der er til rådighed i de indkomne bølger, som rammer de to forreste flydere. Dette skyldes, at bølgeenergien pga. diffraktion strømmer til fra siderne. Se evt. mere om anlæggets effektivitet i Bilag III.B.

Det er væsentligt at konstatere, at effektarbejdskurverne for transmissionssystemet er kendetegnet ved en flad karakteristik. Dette giver en simpel og effektiv generator drift og reguleringen af generatorbelastningen lettes.

Hver gang en flyder bevæges op og ned mistes energi pga. det mekaniske transmissions-system. Dette skyldes de to forhold, at før flyderen kan bidrage i transmissionssystemet kræves en vis flytning af flyderen (overvindelse af slør i modellen) og en vis hastighed for at opnå tilkobling til akslen. Såfremt virkningen af disse forhold kan mindskes for et anlæg i fuld skala, kan effektniveauerne for et anlæg i fuld skala forventes større end svarende til de i dette skrift præsenterede.

Det er forfatterens vurdering, at effektoutputtet fra Wave Star er stort i forhold til maskinens fysiske udstrækning. Maskinen arbejder godt i både små og store bølger og den ”flade motorkarakteristik” for transmissionssystemet er en stor fordel for konceptet. Den fortsatte optimering af flyderdesignet og armvinklen, som foregår i laboratoriet vha. yderligere modelforsøg, forventes at kunne øge maskinens effektivitet, således effektproduktionen fra Wave Star modellen kan øges en smule i forhold til det i dette skrift præsenterede. Disse forsøg udføres og afsluttes inden udgangen af December 2004.

### 3 Referencer

Bølgekraftudvalgets Sekretariat (2000). Bølgekraftprogram (2000).

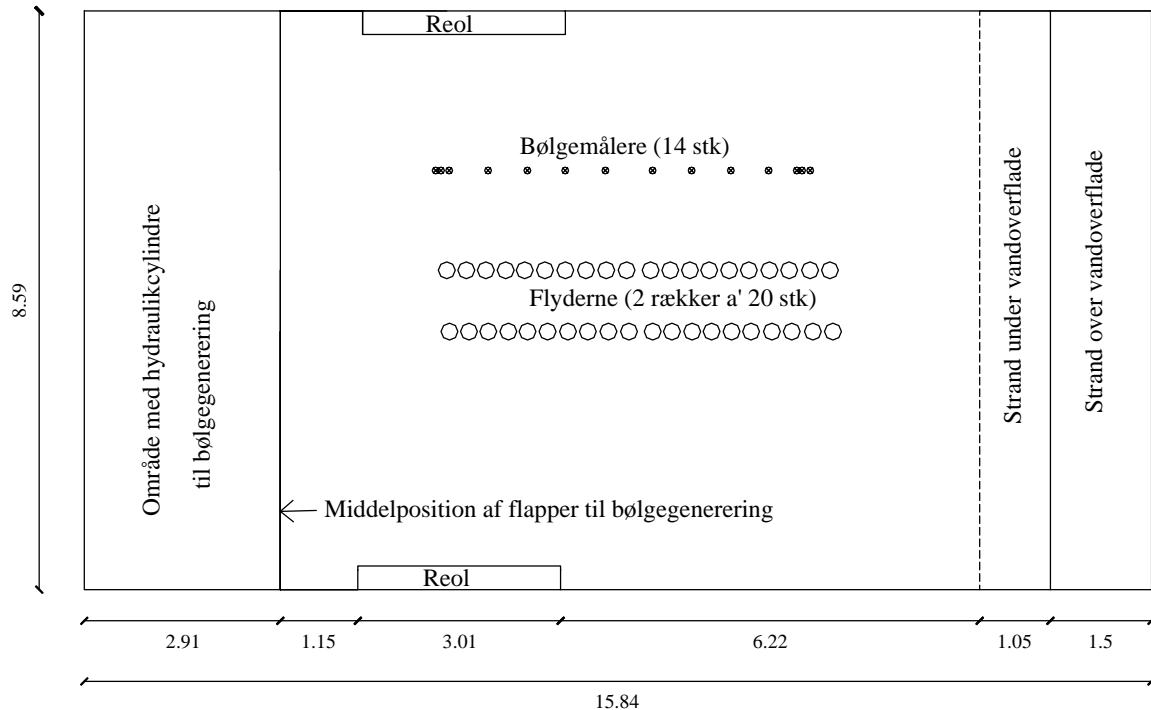
Kramer, M., Frigaard, P (2004). Wave Star – Skala 1:40 modelforsøg, forsøgsrapport 1. Hydraulics and Coastal Engineering No. 10. ISSN: 1603-9874. Aalborg University, Department of Civil Engineering.

Kramer, M., Brorsen, M., Frigaard, P (2004a). Wave Star – Indledende undersøgelse af flydergeometri. Hydraulics and Coastal Engineering No. 4. ISSN: 1603-9874. Aalborg University, Department of Civil Engineering.

Kramer, M., Brorsen, M., Frigaard, P (2004b). Wave Star – Hydrodynamisk interaktion mellem 5 flydere. Hydraulics and Coastal Engineering No. 7. ISSN: 1603-9874. Aalborg University, Department of Civil Engineering.

## Bilag I. Forsøgsopstilling

Forsøgene er foretaget på Aalborg Universitet, Institut for Vand, Jord og Miljøteknik i det dybe bølgebassin. Bølgebassinet har dimensionerne 15.8 x 8.6 x 1.5m. Under forsøgene var maskinen placeret cirka i midten af bassinet, se Figur 1. Forsøgene med 1/2 maskine svarende til 20 bøljer udgjorde den forreste halvdel af bøljerne (til venstre mod bølgemaskinen).



Figur 1. Forsøgsopstilling. Alle mål i meter.

## Bilag II. Uregelmæssige Nordsøbølger

Som angivet i efterfølgende Tabel 1 undersøges Wave Star for et bølgeklima svarende til det typisk forekommende bølgeklima i Nordsøen, jvf. standard bølgespektrere fra Bølgekraftudvalgets Sekretariat (2000). Peak Periode  $T_p$  og signifikant bølgehøjde  $H_s$  karakteriserer det anvendte bølgespektrum, i dette tilfælde JONSWAP-spektrere med en peak enhancement faktor på 3,3.

Tabel 1. Bølgeklima i Nordsøen på en lokalitet på ca. 50 m dybt vand, ca. 100km ud fra Vestkysten.

		Søtilstand					
		I	II	III	IV	V	
$H_s$ [m]	<0.5	1	2	3	4	5	>5.5
$T_p$ [sek]		5,6	7,0	8,4	9,8	11,2	
Effekt pr meter [kW/m]	-	2	12	32	66	115	>145
Timer pr. år	966	4103	1982	944	445	211	119
Sandsynlighed [%]	11,0	46,8	22,6	10,8	5,1	2,4	1,4
Bidrag til middeleffekt [kW/m]	-	0,94	2,71	3,46	3,37	2,76	2,77

Den gennemsnitlige effekt til rådighed i bølgerne beregnes som summen af den nederste række i Tabel 1 til 16 kW pr. meter bølgefront.

### Bilag III. Uddrag af resultater

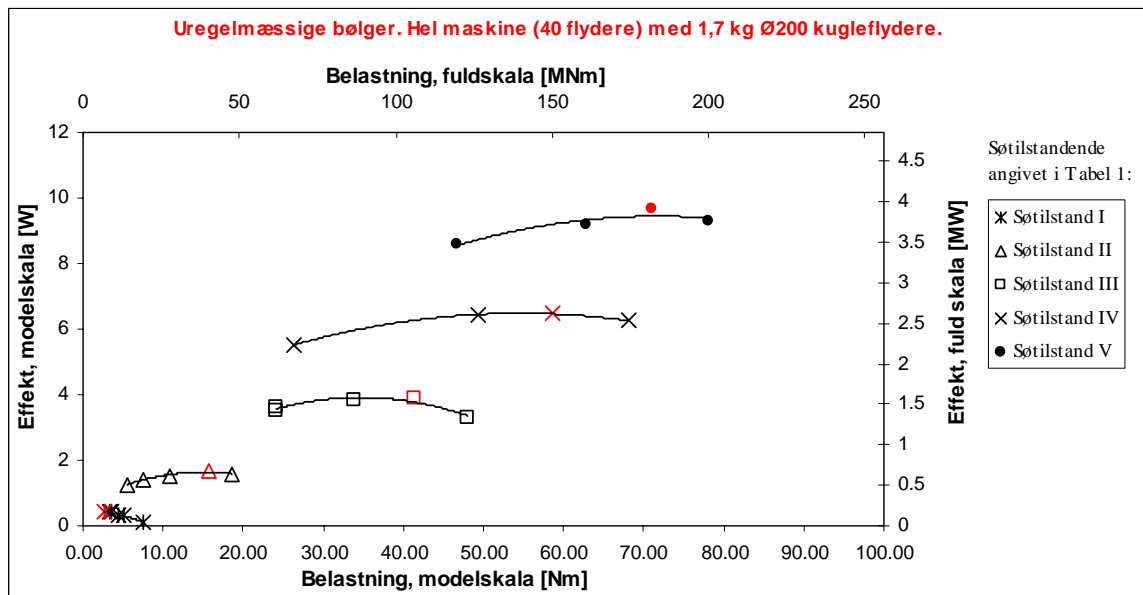
Efterfølgende præsenteres et uddrag af forsøgsresultaterne med konceptet. Mange flyderdesign er testet, men de hidtil største effektproduktioner fra konceptet er opnået med tunge (1,7 kg for Ø200 kugleformen og 0,95 kg for Ø175 kugleformen) kugleformede flydere, hvorfor det er valgt at gengive resultater med denne flydertype.

Friktionen i modellen er målt til 7,5 Nm. For skala 1:40 svarer dette til en friktion på 19 MNm i fuld skala hvis Froudes modellov anvendes. For en virkelig prototype i fuld skala vil friktionen imidlertid være væsentligt mindre, da modellens friktion ikke skaleres korrekt med Froudes modellov. Den målte friktion i modellen er derfor medtaget som belastning ved beregning af konceptets effektoptag. Effektkurverne i dette skrift svarer således til produktionen fra et koncept uden friktion.

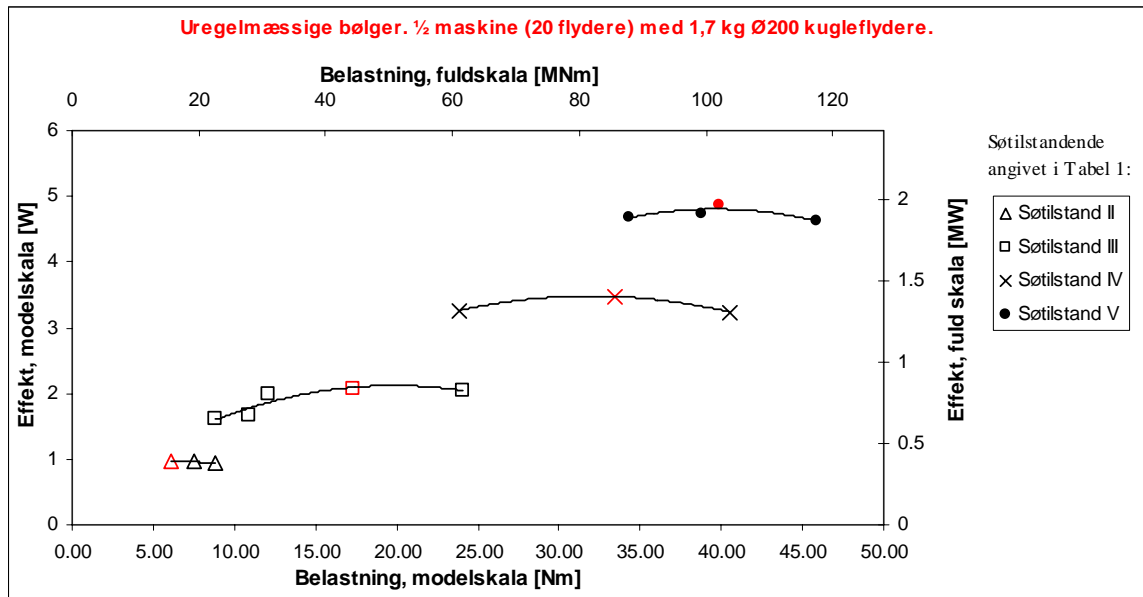
#### Bilag III.A Effektproduktion i uregelmæssige bølger

I dette kapitel præsenteres to forsøgsserier foretaget med Ø200 kugleflydere belastet til en total vægt på 1,7 kg. Ved denne belastning opnås, at kuglen omtrent trykkes ned i vandet til centrum af kuglen. Den ene forsøgsserie omfatter tests på hele maskinen monteret med 40 stk. flydere, og i den anden forsøgsserie var maskinen monteret med 20 stk. flydere.

På Figur 2 og Figur 3 er måleresultaterne gengivet. På figurerne er toppunkterne for effektproduktionen i de enkelte søtilstande markeret med rødt. Disse punkter angiver den indstilling af belastningen, som giver den maksimale effektproduktion. Effektniveauet for toppunkterne er gengivet i Tabel 2 og anvendt i beregningen af konceptets årlige energiproduktion.



Figur 2. Effektproduktion i uregelmæssige bølger for Wave Star med 40 stk Ø200 kugleflydere.



Figur 3. Effektproduktion i uregelmæssige bølger for Wave Star med 20 stk Ø200 kugleflydere.

Tabel 2. Effektproduktion i uregelmæssige bølger for Wave Star med Ø200 kugleflydere.

	Effekt for en hel maskine (40 flydere)		Effekt for ½ maskine (20 flydere)	
	Modelskala [W]	Fuld skala [kW]	Modelskala [W]	Fuld skala [kW]
Søtilstand I	0.42	171	0.21 <sup>*)</sup>	86 <sup>*)</sup>
Søtilstand II	1.69	683	0.97	391
Søtilstand III	3.87	1565	2.06	835
Søtilstand IV	6.48	2624	3.48	1407
Søtilstand V	9.68	3920	4.86	1969
Årsmiddeleffekt	1.56	631	0.83	338
Årsproduktion	13.6 kWh	5516 MWh	7.3 kWh	2949 MWh

<sup>\*)</sup> Effektproduktionen for en ½ maskine i søtilstand I er ikke målt, men derimod konservativt estimeret som halvdelen af effektproduktionen for en hel maskine.

### Bilag III.B Effektiviteten i uregelmæssige bølger

Effektiviteten af bølgeenergianlæg er en ofte beregnet og omdiskuteret størrelse. Effektiviteten  $P$  beregnes som:

$$P = \frac{\text{Effektproduktionen af Wave Star}}{\text{Effekten i den indkomne bølge svarende til en strækning } L} \cdot 100\%$$

Effektiviteten afhænger imidlertid i høj grad af den anvendte referencetrækning  $L$ . Det er her valgt at beregne effektiviteten efter følgende tre modeller:

**P1:** For strækningen  $L$  benyttes 2·Flyderdiametere = 16m (svarer til den del af maskinen som bølgen møder ved fronten)

**P2:** For strækningen  $L$  benyttes bredden af maskinen = 40m

**P3:** For strækningen  $L$  benyttes maskinens længste udstrækning = 240m

Ud fra effekterne angivet i Tabel 1 og Tabel 2 er effektiviteterne angivet i Tabel 3 beregnet.

Tabel 3. Effektiviteten af Wave Star med 40 stk. Ø200 kugleflydere.

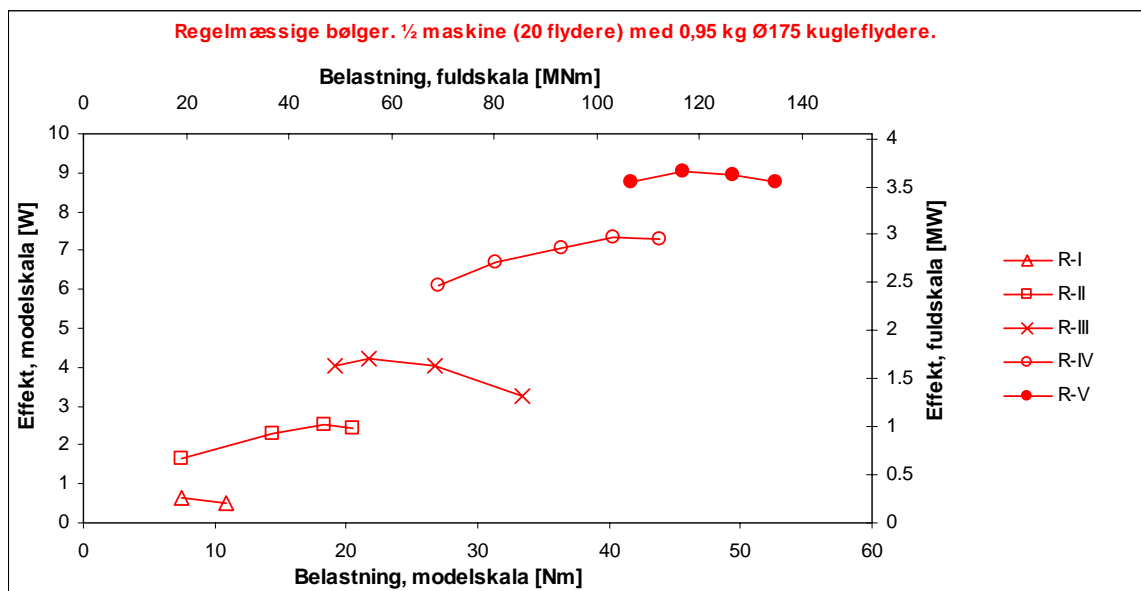
Søtilstand	P1 [%]	P2 [%]	P3 [%]
I	535	214	36
II	356	142	24
III	306	122	20
IV	248	99	17
V	213	85	14
Årsmiddel	247	99	16

### Bilag III.C Effektproduktion i regelmæssige bølger

I dette kapitel vises, at Wave Star også er effektiv i regelmæssige bølger. Efterfølgende præsenteres resultater af en forsøgsserie foretaget med Ø175 kugleflydere belastet til en total vægt på 0,95 kg. Forsøgene blev gennemført for ½ maskine (20 flydere) i 5 regelmæssige bølgeserier. Disse 5 søtilstande er i Tabel 4 benævnt R-I, R-II, R-III, R-IV og R-V. Bølgeserierne er valgt, således H svarer til  $H_s$  og T til  $T_p$  for de uregelmæssige søtilstande I, II, III, IV og V. Det bemærkes, at de opnåede effekter i disse regelmæssige søtilstande overstiger det, der kan forventes i de tilsvarende uregelmæssige søtilstande.

Tabel 4. Forsøg med regelmæssige bølger for Ø175 flyderen.

Søtilstand	Modelskala		Fuld skala	
	H [m]	T [s]	H [m]	T [s]
R-V	0.125	1.77	5	11.2
R-IV	0.100	1.55	4	9.8
R-III	0.075	1.33	3	8.4
R-II	0.050	1.11	2	7.0
R-I	0.025	0.89	1	5.6



Figur 4. Effektproduktion i regelmæssige bølger for Wave Star med 20 stk Ø175 kugleflydere.

Det fremgår af Figur 4, at maskinen er i stand til at producere effekt i såvel de korte lave bølger som i de lange høje bølger, men effektproduktionen er naturligvis størst i de største bølger. Ydermere fremgår, at den belastning som giver anledning til optimalt effektoutput afhænger af søtilstanden. For store bølger er det mest optimalt at påføre stor belastning.