



**AALBORG UNIVERSITY**  
DENMARK

**Aalborg Universitet**

## **Wave Star**

*Skala 1:40 modelforsøg : forsøgsrapport 1*

Kramer, Morten; Frigaard, Peter

*Publication date:*  
2004

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*

Kramer, M., & Frigaard, P. (2004). *Wave Star: Skala 1:40 modelforsøg : forsøgsrapport 1*. (1 udg.) Aalborg Universitetsforlag. Hydraulics and Coastal Engineering Nr. 10

### **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 -

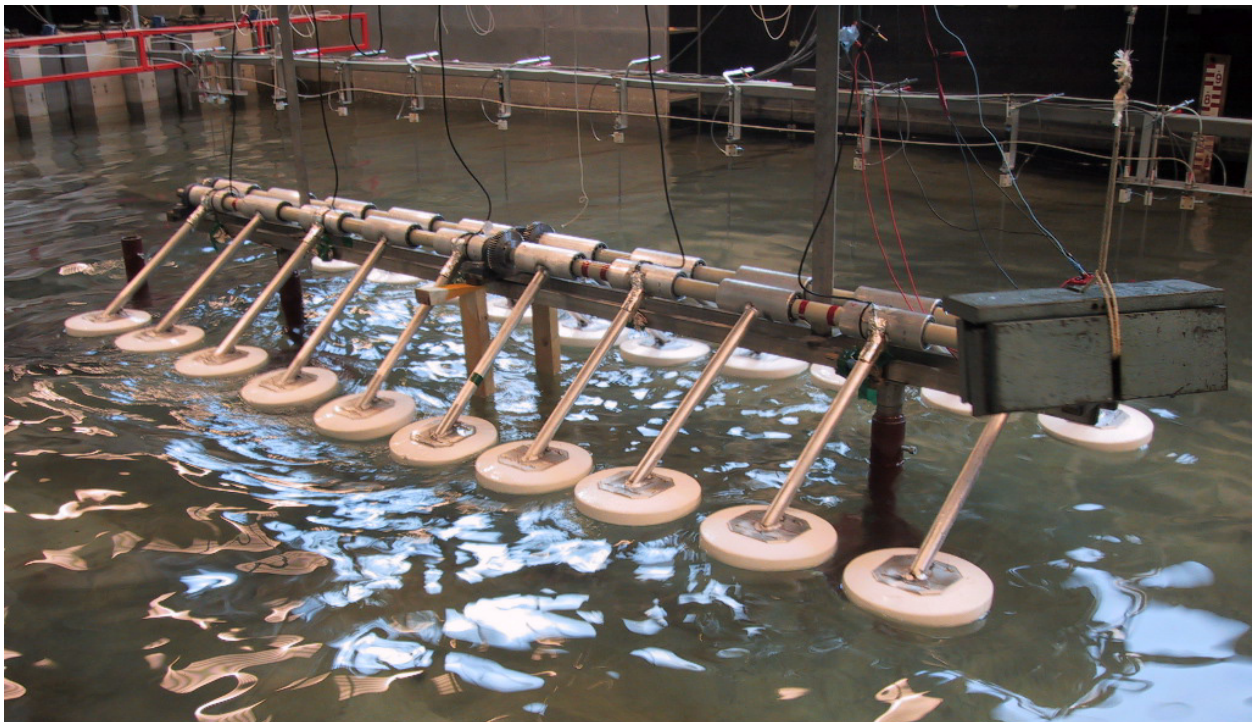
### **Take down policy**

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

–

Skala 1:40 modelforsøg, forsøgsrapport 1



Morten Kramer & Peter Frigaard  
Oktober, 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. 10**

**ISSN: 1603-9874**

## **Wave Star**

Skala 1:40 modelforsøg, forsøgsrapport 1

Morten Kramer & Peter Frigaard



## Forord

Denne rapport beskriver modelforsøg udført på Aalborg Universitet, Institut for Vand, Jord og Miljøteknik med bølgeenergianlægget Wave Star. Forsøgene er foretaget på foranledning af Per Resen Steenstrup, administrerende direktør i Wave Star Energy.

Forud for rapporten er udgivet to rapporter med numeriske beregninger på Wave Star, se Kramer *et al.* 2004a og 2004b. Nærværende rapport er første del af en række forsøgsrapporter med skala 1:40 Wave Star modellen. Rapporten beskriver forsøg foretaget i perioden 13/9-04 til 8/10-04. Næste forsøgsrapport forventes at udkomme i samme skriftserie December 2004.

Under udførelsen af forsøgene blev der løbende skrevet dagbog. Dagbogen blev løbende opdateret og præsenteret på Internettet [www.civil.aau.dk/~i5mkr/ws](http://www.civil.aau.dk/~i5mkr/ws). Dagbogen er gengivet i denne rapport i Appendiks E.

En CD er vedlagt rapporten på indersiden af omslaget. CD'en indeholder kildedata, dokumenter, billeder og Excel regneark med beregninger og figurer.

Kontakter vedr. forsøg/rapport udført af Aalborg Universitet:

Morten Kramer Sohngaardsholmsvej 57 9000 Aalborg Tlf. 96357230 Fax 98142555 E-mail: <a href="mailto:i5mkr@civil.aau.dk">i5mkr@civil.aau.dk</a> Web: <a href="http://www.civil.aau.dk">www.civil.aau.dk</a>
--

eller

Peter Frigaard Sohngaardsholmsvej 57 9000 Aalborg Tlf. 96358479 Fax 98142555 E-mail: <a href="mailto:peter.frigaard@civil.aau.dk">peter.frigaard@civil.aau.dk</a> Web: <a href="http://www.civil.aau.dk">www.civil.aau.dk</a>
---

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: <a href="mailto:info@WaveStarEnergy.com">info@WaveStarEnergy.com</a> Web: <a href="http://www.wavestarenergy.com">www.wavestarenergy.com</a>
--



## Indholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>Indledning</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Skala for model og bølger</b> .....	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Forsøgsopstilling</b> .....	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Uregelmæssige bølger</b> .....	<b>8</b>
4.1	Uregelmæssige bølger, modelskala 1:40 .....	9
<b>5</b>	<b>Forsøgsprogram</b> .....	<b>9</b>
<b>6</b>	<b>Resultater</b> .....	<b>10</b>
6.1	Serie B, effektproduktion i uregelmæssige bølger, ½ maskine .....	10
6.2	Serie E, effektproduktion i regelmæssige bølger .....	13
<b>7</b>	<b>Konklusion</b> .....	<b>17</b>
<b>8</b>	<b>Fremtidigt program</b> .....	<b>17</b>
8.1	Forsøg med flyderudformning, én flyder, regelmæssige bølger.....	18
8.2	Måling på et system bestående af 5 flydere .....	18
8.3	Tests af hele anlægget i uregelmæssige bølger.....	19
8.4	Test af hele anlægget i skråt indkomne uregelmæssige bølger.....	19
<b>9</b>	<b>Referencer</b> .....	<b>19</b>
<b>Appendiks A. Detaljer vedr. layout i bølgebassin</b> .....		<b>20</b>
<b>Appendiks B. Liste over udførte forsøg</b> .....		<b>22</b>
Appendiks B.1	Serie A .....	22
Appendiks B.2	Serie B.....	22
Appendiks B.3	Serie C.....	22
Appendiks B.4	Serie D .....	22
Appendiks B.5	Serie E.....	23
<b>Appendiks C. Kalibrering af instrumenter</b> .....		<b>24</b>
Appendiks C.1	Friktion i maskinen .....	24
Appendiks C.2	Strain gauges til torsionsmåler.....	24
Appendiks C.3	Strain gauges på arme tilkoblet flydere .....	24
Appendiks C.4	Bølgemålere .....	25
Appendiks C.5	Omdrejningstæller.....	25
Appendiks C.6	Bremse .....	25
<b>Appendiks D. Resultater af Serie D, bølger i bassinet</b> .....		<b>26</b>
<b>Appendiks E. Dagbog for modelforsøg</b> .....		<b>27</b>
Appendiks E.1	Mandag d. 13. September .....	27
Appendiks E.2	Tirsdag d. 14. Spetember .....	27
Appendiks E.3	Onsdag d. 15. September .....	28
Appendiks E.4	Torsdag d. 16. september .....	29
Appendiks E.5	Fredag d. 17. september .....	30
Appendiks E.6	Mandag d. 20. september .....	31
Appendiks E.7	Tirsdag d. 21. september .....	34
Appendiks E.8	Onsdag d. 22. september .....	35
Appendiks E.9	Torsdag d. 23. september .....	39
Appendiks E.10	Fredag d. 24. september .....	40
Appendiks E.11	Mandag d. 27. september .....	42
Appendiks E.12	Tirsdag d. 28. september .....	43
Appendiks E.13	Onsdag d. 29. september .....	44
Appendiks E.14	Torsdag d. 30. september .....	44
Appendiks E.15	Fredag d. 1. oktober – Fredag d. 8. oktober .....	46





## 1 Indledning

Formålet med de indledende forsøg er at samle erfaringer med skala 1:40 modellen samt bestemme konceptets effektoptag. Effektoptaget i uregelmæssige bølger er bestemt for et 20-flydersystem svarende til  $\frac{1}{2}$  maskine. Denne maskine er 3 m lang i modelskala. Effektoptaget er bestemt svarende til et typisk forekommende bølgeklima i Nordsøen.

Ydermere er effektoptaget i regelmæssige bølger bestemt for hele maskinen. Resultaterne for disse forsøg er til fremtidig anvendelse ved kommende sammenligninger med beregningsmodeller.

Formålet med nærværende forsøg er at opsamle så meget erfaring med Wave Star konceptet, at væsentlige problemstillinger kan klarlægges, og at en strategi for fremtidige nødvendige analyser kan udformes.

## 2 Skala for model og bølger

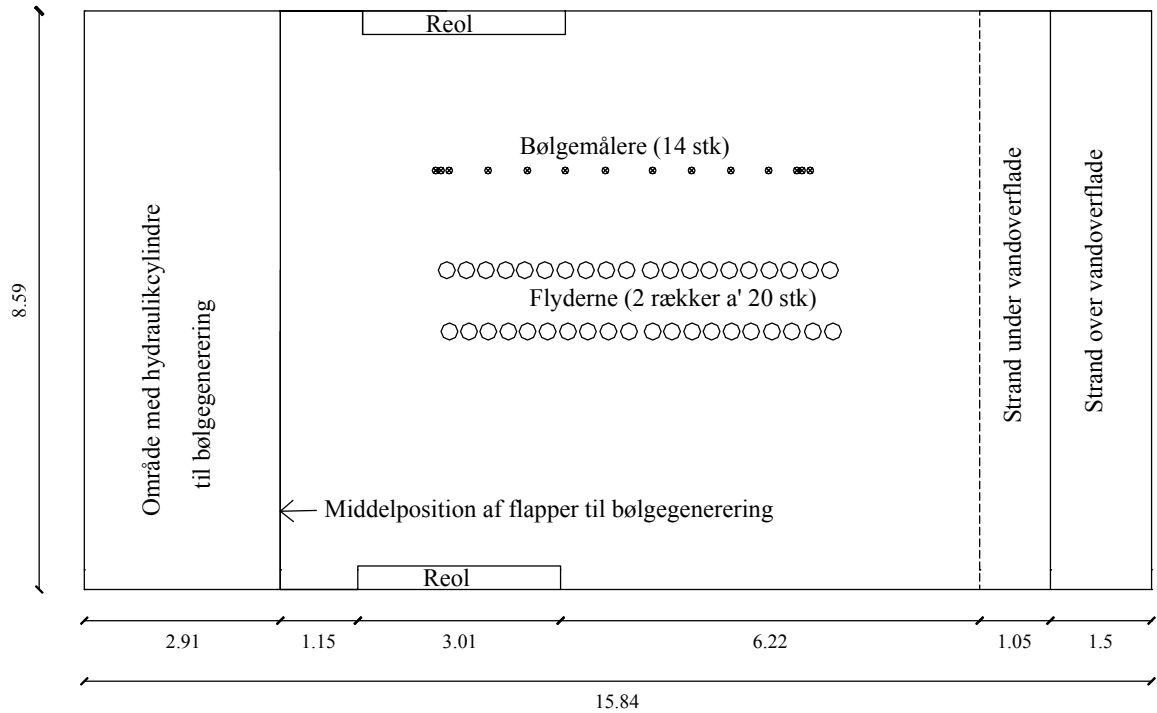
Da de dominerende kræfter i forsøgene er gravitationskræfter, skaleres efter Froudes modellov. Heraf følger ved skala 1:n, hvor  $n = 40$  for Wave Star:

Tabel 1. Skalering af modelparametre.

Parameter	Skala	Enhed
Længde	1 : n	m
Tid	1 : $\sqrt{n}$	s
Vægt	1: $n^3$	kg
Kraft	1: $n^3$	N
Moment	1: $n^4$	Nm
Effekt	1: $n^{3.5}$	W
Effekt pr. længdeenhed	1: $n^{2.5}$	W/m

## 3 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. For detaljer vedr. indretning af bassinet henvises til Appendix A, Figur 10 (side 21). Under forsøgene var maskinen placeret cirka i midten af bassinet, se Figur 1. Forsøgene med  $\frac{1}{2}$  maskine svarende til 20 bøjer udgjorde den bagerste halvdel af bøjerne (ned mod stranden).



Figur 1. Forsøgsstilling. Alle mål i meter.

For detaljer vedr. placering af bøjer og bølgemålere henvises til Appendix A, Figur 8 og Figur 9 (side 20).

## 4 Uregelmæssige bølger

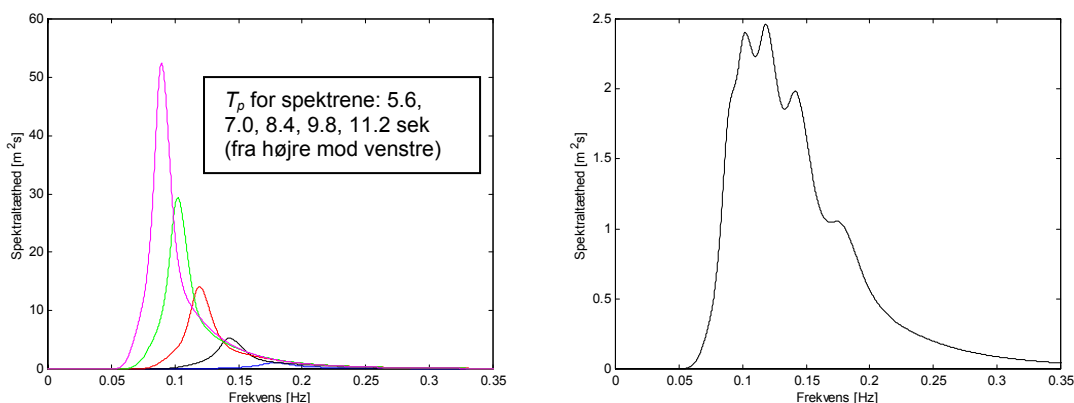
Som angivet i efterfølgende Tabel 2 undersøges Wave Star for et bølgeklima svarende til det typisk forekommende bølgeklima i Nordsøen. Peak Periode  $T_p$  og signifikant bølgehøjde  $H_s$  karakteriserer det anvendte bølgespektrum, i dette tilfælde JONSWAP-spektrret med en peak enhancement faktor på 3,3.

Tabel 2. 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 2 til 16 kW pr. meter bølgefront, jvf. Bølgekraftprogram (2000).

På Figur 2 er spektraltætheden (som svarer til energien i bølgefeltet) vist for de forskellige søtilstande. For at få et indtryk af, ved hvilke frekvenser energien er koncentreret, beregnes summen af de 5 spektre multipliceret med sandsynligheden for den pågældende bølgetilstand. Dette spektrum kan betegnes som et middel-spektrum, se Figur 2 (højre).



Figur 2. JONSWAP spektre. Venstre: De 5 søtilstande. Højre: Middelspektrum for søtilstandene.

#### 4.1 Uregelmæssige bølger, modelskala 1:40

Modellen af Wave Star testes for bølger svarende til de i Tabel 3 angivne. Værdierne i tabellen svarer til Nordsøforholdene i Tabel 2 for skala 1:40.

Tabel 3. Uregelmæssige bølger svarende til de i bølgebassinet testede.

	Søtilstand				
	I	II	III	IV	V
$H_s$ [m]	0,025	0,050	0,075	0,100	0,125
$T_p$ [sek]	0,89	1,11	1,33	1,55	1,77
Effekt pr meter [kW/m]	0,20	1,19	3,16	6,52	11,36
Timer pr. år	4103	1982	944	445	211
Sandsynlighed [%]	46,8	22,6	10,8	5,1	2,4
Bidrag til middeleffekt [kW/m]	0,09	0,27	0,34	0,33	0,27

## 5 Forsøgsprogram

Det gennemførte forsøgsprogram er oversigtsmæssigt angivet i Tabel 4. En komplet liste over udførte forsøg forefindes i Appendiks B.

Tabel 4. Forsøgsserier.

Test serie	Forklaring til test serien
A	Uregelmæssige bølger hvor der belastes med lodder, hele maskinen
B	Uregelmæssige bølger hvor der belastes med lodder, ½ maskine
C	Regelmæssige bølger hvor arm nr. 9 fastholdes, mens alle øvrige flydere løftes fri af vandet
D	Uregelmæssige bølger til test af bølgegenereringsprogram, alle flydere løftes fri af vandet
E	Regelmæssige bølger til test af hele maskinen

Testserie A blev afbrudt, da det ikke var muligt at påføre tilstrækkelig belastning og da den forreste del af maskinen derfor skulle ud af bassinet for at få en ny og kraftigere bremse monteret. Test serie C var tvivlsom, da der efter forsøgene blev opdaget, at flyderen ikke var tilstrækkeligt fastholdt.

Testserierne B, D og E var vellykkede, hvorfor resultaterne fra disse forsøg gengives.

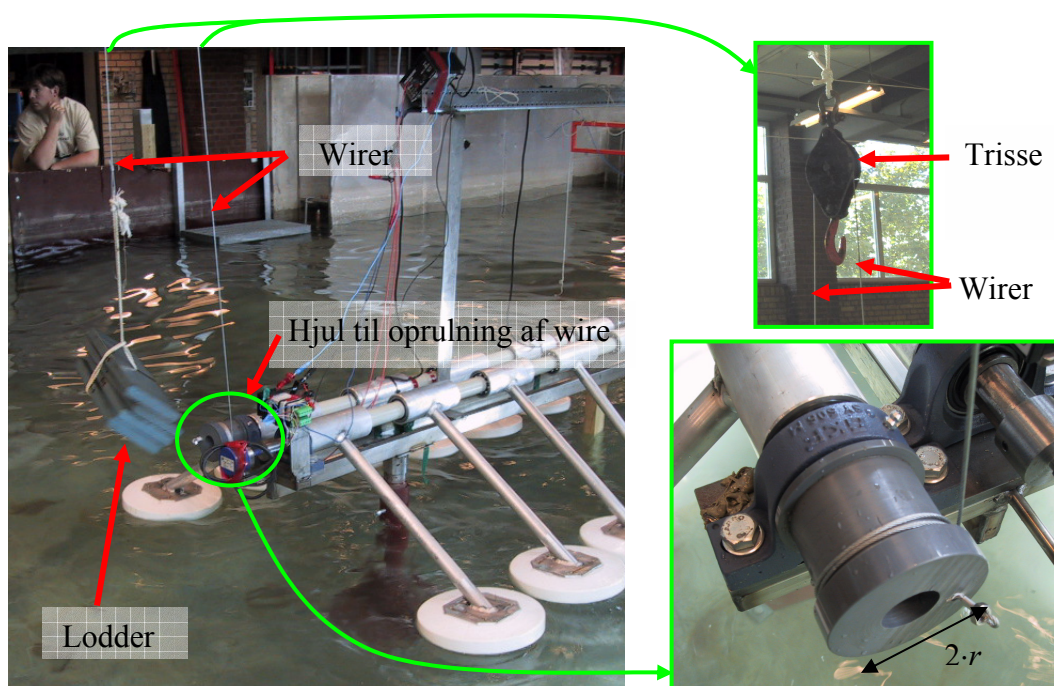
## 6 Resultater

Efterfølgende præsenteres resultater for Serie B og E. Resultaterne for Serie D forefindes i Appendiks D.

### 6.1 Serie B, effektproduktion i uregelmæssige bølger, ½ maskine

De målte data er angivet i Tabel 5 og præsenteret på Figur 4. Toppunkterne for effektkurverne er markeret med rødt og angivet i Tabel 6. I Tabel 6 benyttes toppunkterne i en beregning af maskinens gennemsnitlige effektproduktion. Det bemærkes, at i tabellen anvendes de størst målte effekter selvom en visuel bedømmelse indikerer lidt højere maxima. Den årlige energiproduktion for den halve maskine beregnes ud fra Tabel 6 til 5.03 kWh (modelskala) og 2037 MWh (fuldskala).

Under forsøgene blev maskinen belastet med lodder. Disse lodder var ophængt i en wire påkoblet et hjul med radius  $r$  tilkoblet akslen på Wave Star, se Figur 3. Systemet af wirer og lodder var ophængt i en trisse højt over modellen. Ved påførsel lodder med vægten  $m$ , vil momentbelastningen af akslen være  $M_{\text{lodder}} = m \cdot g \cdot r$  ( $g$  er tyngdeaccelerationen). Friktionen i den halve maskine er jf. Appendiks C målt til  $M_{\text{friktion}} = 4$  Nm. Den samlede belastning af maskinen under kørsel er således  $M = M_{\text{lodder}} + M_{\text{friktion}}$ . Ved kørsel med Wave Star vil omdrejning af akslen medføre, at wiren rulles op omkring hjulet, hvorved lodderne løftes. Dette modsvarer en effektproduktion på  $P = M \cdot \omega$ , hvor  $\omega$  angiver omdrejningshastigheden af akslen. For de fem bølgetilstande er samhørende værdier for belastning og gennemsnitlig effektproduktion etableret, se Tabel 5.



Figur 3. Illustration af belastning med lodder.

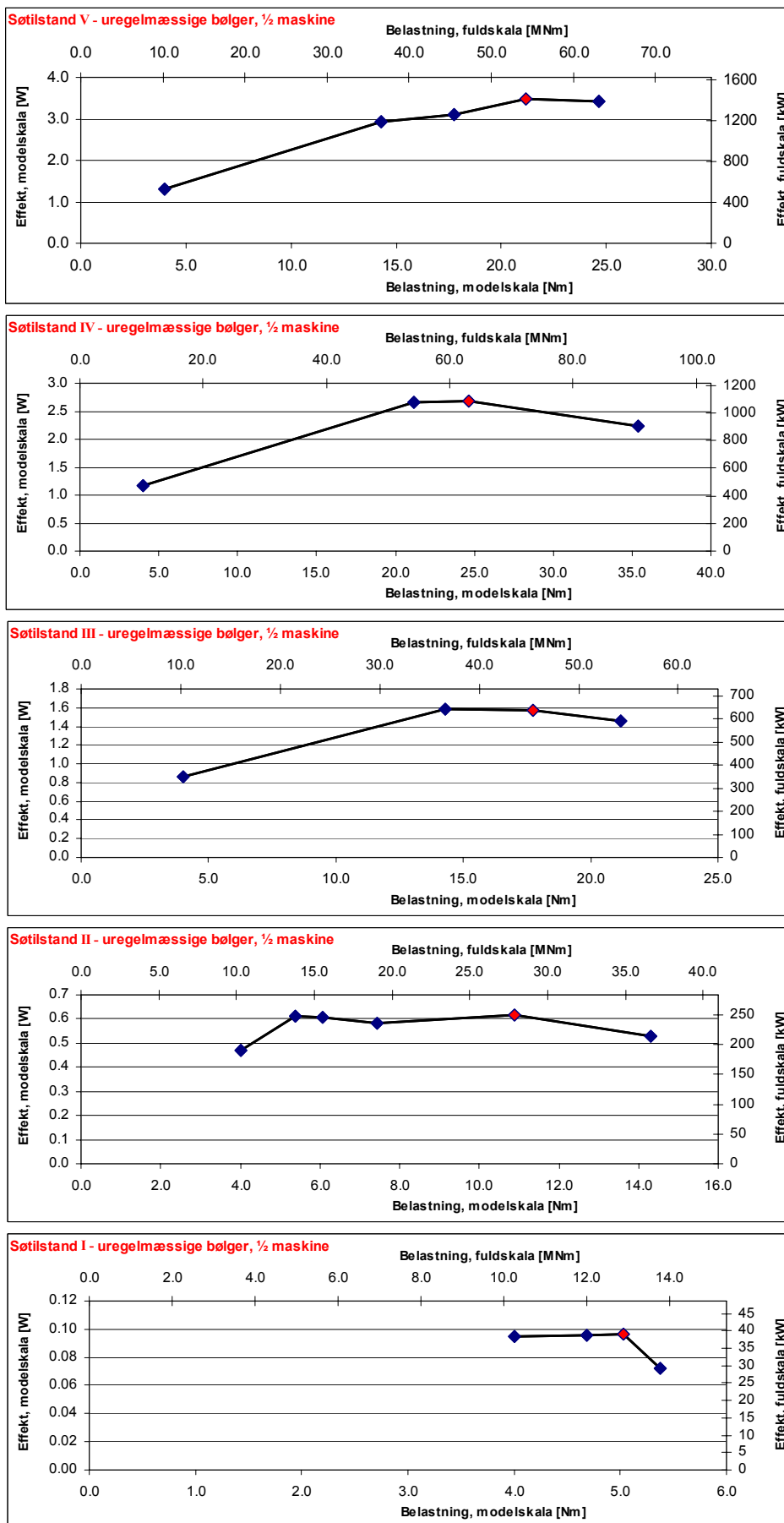
Bemærk: De i Tabel 5 angivne effektproduktioner er middelværdier for målinger over 4 til 8 minutter. Skalaerne for graferne i Figur 4 er forskellige.

**Tabel 5. Resultater for uregelmæssige bølger, ½ maskine, belastning med lodder. "Omd" angiver omdrejningen af akslen i grader over et angivet tidsrum.**

Søtilstand	Modelskala						Fuldskala	
	Belastning <i>m</i> [kg]	Belastning <i>M</i> [Nm]	Omd [°]	Tid [min]	$\omega$ [rad/sek]	Effekt <i>P</i> [W]	Belastning <i>M</i> [MNm]	Effekt <i>P</i> [kW]
V	0.0	4.0	8960	8	0.326	1.303	10.2	527
	30.0	14.3	3500	5	0.204	2.914	36.6	1180
	40.0	17.7	2400	4	0.175	3.098	45.4	1254
	50.0	21.2	2820	5	0.164	3.476	54.2	1407
	60.0	24.6	2390	5	0.139	3.424	63.0	1386
IV	0.0	4.0	9050	9	0.293	1.170	10.2	474
	50.0	21.2	3457	8	0.126	2.663	54.2	1078
	60.0	24.6	3005	8	0.109	2.690	63.0	1089
	40.0	35.4	1520	7	0.063	2.238	90.7	906
III	0.0	4.0	5900	8	0.215	0.858	10.2	347
	30.0	14.3	3040	8	0.111	1.582	36.6	640
	40.0	17.7	2440	8	0.089	1.575	45.4	637
	50.0	21.2	1890	8	0.069	1.456	54.2	589
II	0.0	4.0	3215	8	0.117	0.468	10.2	189
	4.0	5.4	3125	8	0.114	0.611	13.8	247
	6.0	6.1	2760	8	0.100	0.608	15.5	246
	10.0	7.4	2160	8	0.079	0.584	19.0	236
	20.0	10.9	1560	8	0.057	0.617	27.8	250
	30.0	14.3	1020	8	0.037	0.531	36.6	215
I	0.0	4.0	650	8	0.024	0.095	10.2	38
	2.0	4.7	562	8	0.020	0.096	12.0	39
	4.0	5.4	370	8	0.013	0.072	13.8	29
	3.0	5.0	527	8	0.019	0.096	12.9	39

**Tabel 6. Toppunkter for effektkurver i serie B samt birag til middeleffekt.**

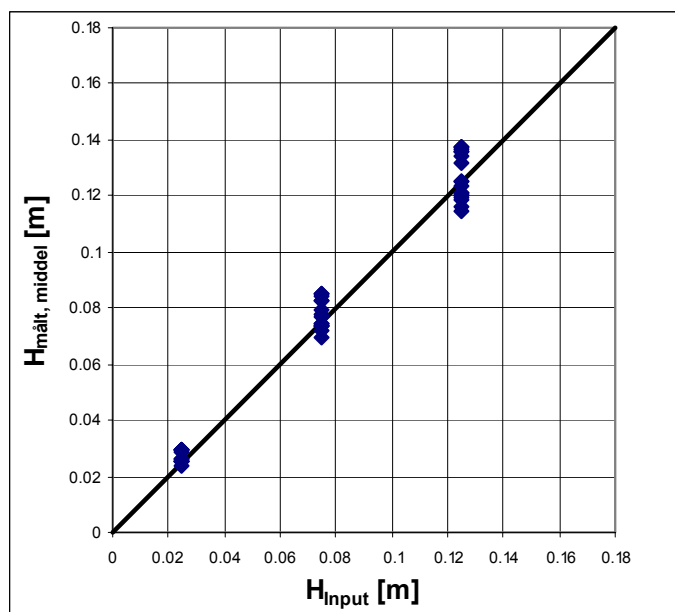
Søtilstand	Modelskala			Fuldskala		
	$H_s$ [m]	Effekt [W]	Bidrag til middeleffekt [W]	$H_s$ [m]	Effekt [kW]	Bidrag til middeleffekt [kW]
V	0.125	3.476	0.083	5	1407	34
IV	0.100	2.690	0.137	4	1089	56
III	0.075	1.582	0.171	3	640	69
II	0.050	0.617	0.139	2	250	56
I	0.025	0.096	0.045	1	39	18
		Sum:	0.576 W		Sum:	233 kW



Figur 4. Resultater for uregelmæssige bølger, ½ maskine, belastning med lodder.

## 6.2 Serie E, effektproduktion i regelmæssige bølger

Middelbølgehøjden for de 14 bølgemålere beregnes for hvert af de 44 forsøg. Disse 44 middelværdier er sammenlignet med inputtet til bølgemaskinen på efterfølgende figur. Det ses, at punkterne ligger tæt på linien. Dette betyder, at inputtet er tæt på det målte.



Figur 5. Sammenligning mellem målte middel-bølgehøjder og input til bølgemaskinen for regelmæssige bølger.

Resultaterne af forsøgene er gengivet i Tabel 7. De tabelerede data er plottet på to forskellige måder i Figur 6 og Figur 7. På figurerne er toppunkterne på kurverne markeret med rødt. Disse punkter indikerer den indstilling af bremsen, som giver den maksimale effektproduktion. Bemærk, at ordinataksene har forskellig skala for graferne i Figur 7.

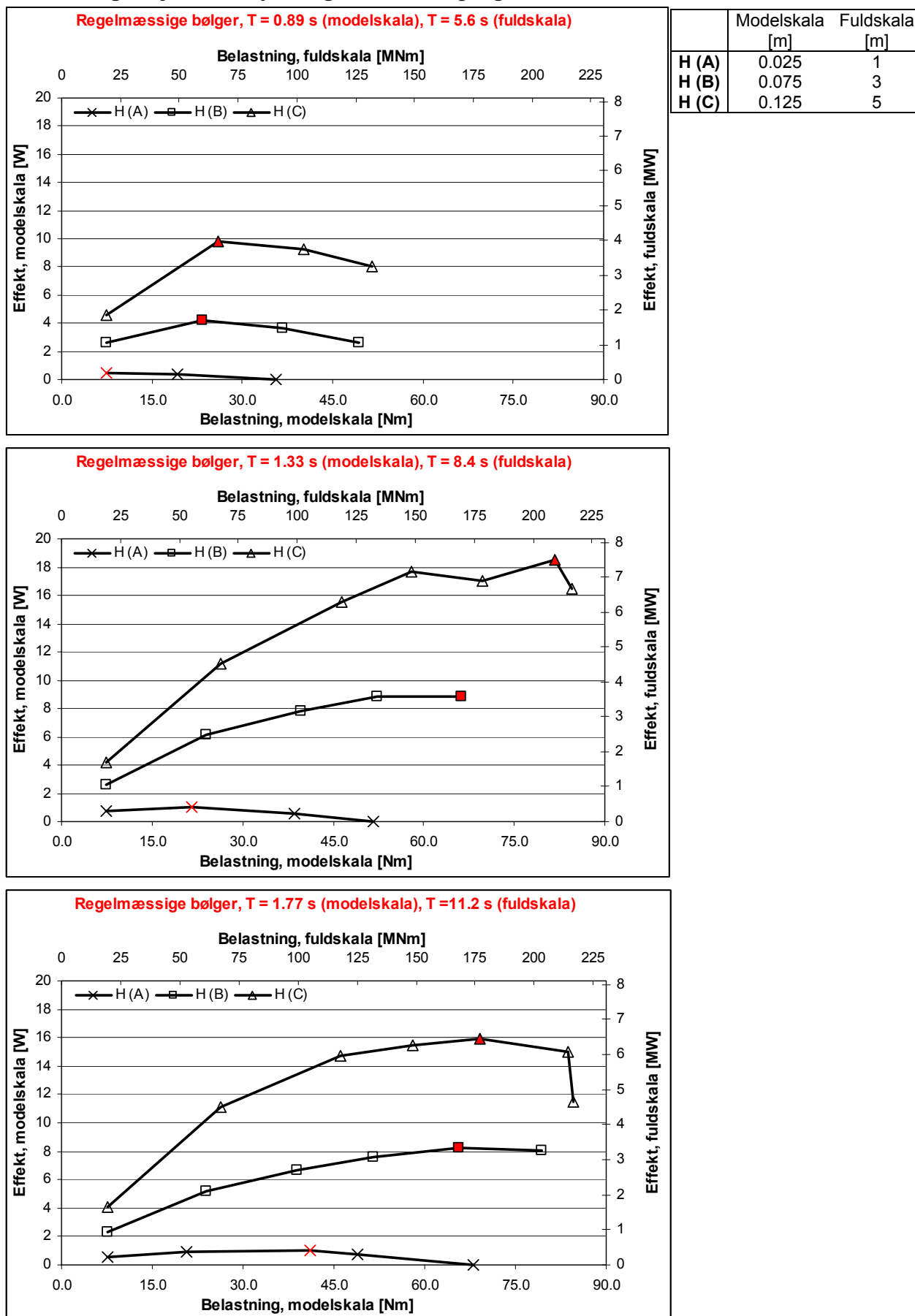
Af Figur 6 fremgår, at højere bølger giver større effektproduktion. Desuden fremgår, at højere bølger kræver mere belastning før maksimal effektproduktion opnås. Med hensyn til bølgeperioden fremgår af Figur 7, at bølgerne med den korte periode giver betydeligt mindre effektproduktion end for de to lange bølgeperioder. For de to lange bølgeperioder opnås omtrent den samme effektproduktion dog ved lidt forskellige belastninger.



Tabel 7. Resultater for regelmæssige bølger, hele maskinen, belastning med bremse.

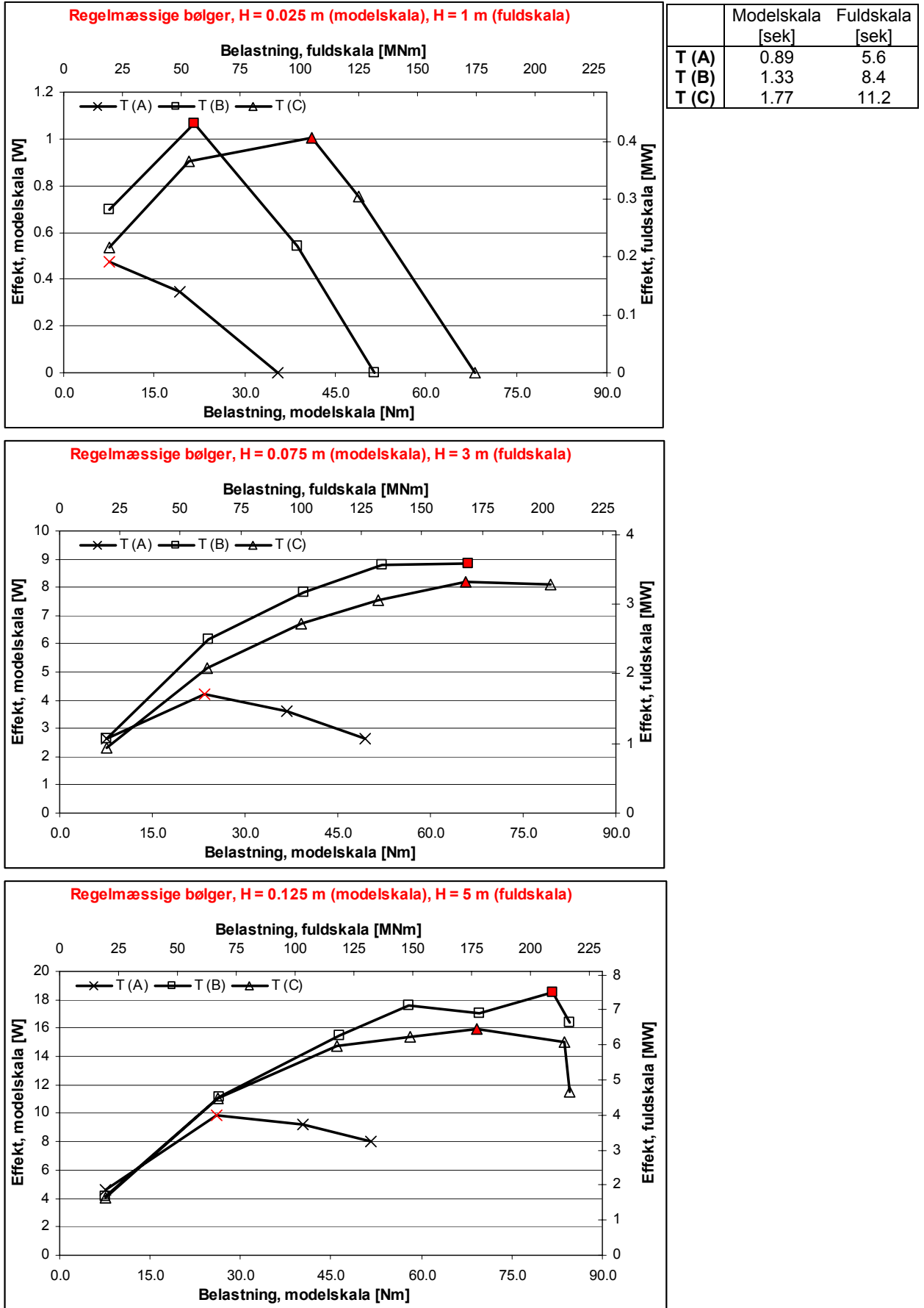
Test	Input			Målt				Beregnet
	H [m]	T [s]	Påført belastning	H [m]	Belastning [N]	Belastning inkl. frik. [Nm]	Omd [rad/sek]	Effekt [W]
038	0.025	0.89	ingen~7.5 Nm	0.025	-0.1	7.5	0.063	0.48
039	0.025	1.33	ingen~7.5 Nm	0.026	-1.2	7.5	0.093	0.70
040	0.025	1.77	ingen~7.5 Nm	0.024	0.7	7.5	0.071	0.53
041	0.075	0.89	ingen~7.5 Nm	0.077	-0.2	7.5	0.349	2.62
042	0.075	1.33	ingen~7.5 Nm	0.083	-0.5	7.5	0.349	2.62
043	0.075	1.77	ingen~7.5 Nm	0.069	-1.2	7.5	0.308	2.31
044	0.125	0.89	ingen~7.5 Nm	0.116	-0.2	7.5	0.611	4.59
045	0.125	1.33	ingen~7.5 Nm	0.132	-0.3	7.5	0.559	4.19
046	0.125	1.77	ingen~7.5 Nm	0.118	-0.1	7.5	0.541	4.06
047	0.025	0.89	0 psi~20.7 Nm	0.029	11.8	19.3	0.018	0.35
048	0.025	1.33	0 psi~20.7 Nm	0.029	14.1	21.6	0.049	1.07
049	0.025	1.77	0 psi~20.7 Nm	0.025	13.2	20.7	0.044	0.90
050	0.075	0.89	0 psi~20.7 Nm	0.074	16.0	23.5	0.180	4.23
051	0.075	1.33	0 psi~20.7 Nm	0.083	16.5	24.0	0.256	6.15
052	0.075	1.77	0 psi~20.7 Nm	0.074	16.4	23.9	0.215	5.14
053	0.125	0.89	0 psi~20.7 Nm	0.114	18.5	26.0	0.378	9.82
054	0.125	1.33	0 psi~20.7 Nm	0.136	18.9	26.4	0.422	11.15
055	0.125	1.77	0 psi~20.7 Nm	0.123	18.7	26.2	0.422	11.07
056	0.025	0.89	10 psi~30.9 Nm	0.029	28.0	35.5	0.000	0.00
057	0.025	1.33	10 psi~30.9 Nm	0.029	31.1	38.6	0.014	0.54
058	0.025	1.77	10 psi~30.9 Nm	0.025	33.6	41.1	0.024	1.00
059	0.075	0.89	10 psi~30.9 Nm	0.078	29.2	36.7	0.099	3.63
060	0.075	1.33	10 psi~30.9 Nm	0.084	32.1	39.6	0.198	7.83
061	0.075	1.77	10 psi~30.9 Nm	0.074	31.5	39.0	0.172	6.69
062	0.125	0.89	10 psi~30.9 Nm	0.119	32.7	40.2	0.230	9.25
063	0.125	1.33	10 psi~30.9 Nm	0.137	38.9	46.4	0.335	15.52
064	0.125	1.77	10 psi~30.9 Nm	0.125	38.5	46.0	0.320	14.72
065	0.025	1.33	20 psi~41.1 Nm	0.029	44.1	51.6	0.000	0.00
066	0.025	1.77	20 psi~41.1 Nm	0.025	41.4	48.9	0.015	0.75
067	0.075	0.89	20 psi~41.1 Nm	0.080	41.9	49.4	0.054	2.64
068	0.075	1.33	20 psi~41.1 Nm	0.085	44.8	52.3	0.169	8.82
069	0.075	1.77	20 psi~41.1 Nm	0.074	44.1	51.6	0.147	7.56
070	0.125	0.89	20 psi~41.1 Nm	0.120	44.1	51.6	0.156	8.03
071	0.125	1.33	20 psi~41.1 Nm	0.137	50.4	57.9	0.305	17.65
072	0.125	1.77	20 psi~41.1 Nm	0.125	50.6	58.1	0.265	15.43
073	0.025	1.77	30 psi~51.3 Nm	0.026	60.6	68.1	0.000	0.00
074	0.075	1.33	30 psi~51.3 Nm	0.085	58.6	66.1	0.134	8.85
075	0.075	1.77	30 psi~51.3 Nm	0.074	58.2	65.7	0.125	8.20
076	0.125	1.33	30 psi~51.3 Nm	0.136	62.1	69.6	0.244	17.02
077	0.125	1.77	30 psi~51.3 Nm	0.121	61.7	69.2	0.230	15.91
078	0.075	1.77	40 psi~61.5 Nm	0.072	71.9	79.4	0.102	8.08
079	0.125	1.33	40 psi~61.5 Nm	0.136	74.2	81.7	0.227	18.53
080	0.125	1.77	40 psi~61.5 Nm	0.120	76.2	83.7	0.180	15.04
081	0.125	1.33	43.5 psi~65.1 Nm	0.134	77.0	84.5	0.194	16.42
082	0.125	1.77	43.5 psi~65.1 Nm	0.121	77.0	84.5	0.136	11.50

### 6.2.1 Bølgehøjdens betydning for effektoptaget



Figur 6. Effektproduktion i regelmæssige bølger. Bølgehøjdens betydning for effektoptaget.

### 6.2.2 Bølgeperiodens betydning for effektoptaget



Figur 7. Effektproduktion i regelmæssige bølger. Bølgeperiodens betydning for effektoptaget.

## 7 Konklusion

Friktionen i modellen er målt til 4 Nm for en ½ maskine og 7,5 Nm for hele maskinen. For skala 1:40 svarer dette til en friktion på hhv. 10 MNm og 19 MNm. For en virkelig prototype i fuld skala vil friktionen imidlertid være væsentligt mindre, da modellens friktion ikke er skalerbar. 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. For en ½ maskine er den gennemsnitlige effekt i Nordsøbølgerne målt til 0,58 W (svarende til 233 kW i fuld skala). Dette svarer til en årlig energiproduktion på 5,0 kWh (svarende til 2037 MWh i fuld skala).

Gennem de indledende forsøg med Wave Star er der opnået en del erfaringer med modellen. Forsøgene viser, at anlægget er i stand til at producere energi i korte og lange bølger for såvel lave som høje bølger.

Igennem de indledende forsøg er der blevet eksperimenteret en del med måleapparatet. Nogle komponenter er ændret eller skiftet, f.eks. er der påsat ny bremse, således de ønskede måleresultater kan opnås.

Anlægget har dog stadig nogle børnesygdomme. Det er forfatterens vurdering, at den nuværende konfiguration af Wave Star ikke yder den optimalt mulige effektivitet. Gennem de indledende forsøg er det erfaret, at nogle flydere ofte bliver overskyllt med energitab til følge. Ligeledes slipper flyderne nogle gange vandoverfladen, ligeledes med et energitab til følge. En detaljeret eksperimentel undersøgelse af flyderdesignet (form, vægt, etc.), forventes at kunne øge maskinens effektivitet.

## 8 Fremtidigt program

Det anbefales, at træde et skridt tilbage og lave et detaljeret testprogram med forskellige flyderdesign inden de "endelige" effektivitetsmålinger foretages. Eventuelt foretages først tests med kun én flyder for at kunne eliminere eventuelle skyggeeffekter fra andre flydere. Ydermere foretages tests hvor flyderen ikke kan bevæges, således den lodrette bølgekraft og de hydrodynamiske kræfter grundet bevægelsen af flyderen (svarende til hydrodynamisk masse og dæmpning) kan kortlægges.

Forsøgene rapporteres i en kommende rapport, som forventes udgivet December 2004. Rapporten udgives i samme skriftserie som denne rapport og de øvrige rapporter af Kramer *et al.*, se referencerne i kapitel 9.

### **Forslag til forsøgsplan:**

#### ***Oktober 2004:***

Punkt 1 "Flyderudformning" og 2 "5 flydere" angivet efterfølgende.

#### ***November – December 2004:***

Punkt 3 "uregelmæssige bølger" og 4 "skrå uregelmæssige bølger".

De ekstremt mange detaljerede forsøg som er angivet efterfølgende, må måske skæres kraftigt ned for at muliggøre overholdelse af den meget stramme tidsplan.

## 8.1 Forsøg med flyderudformning, én flyder, regelmæssige bølger

Hovedsageligt måles de vandrette og lodrette bølgekræfter på én flyder (bøje nummer 9). I disse forsøg måles desuden bølgerne langt fra flyderen samt bølgerne lige efter flyderne således flyderens skyggevirksomhed kan kortlægges.

Liste over flyderforme til afprøvning:

- Normal flyder Ø250mm
- Normal flyder, men med dobbelt højde.
- Kugleformet flyder Ø250mm
- Næse-flyderen, Ø225mm
- Næseflyderen med afskåret næse
- Flyder med fri bevægelighed i pitch (med fjedre eller elastikker)

### 1) Tests med én fastholdt flyder

Målinger:

- Bølgemålinger ved WG7, WG15, WG16, WG17
- Kræfter: vandrette og lodrette på flyder 9

Variable:

- Flyderform
- Bølgehøjde
- Bølgeperiode

### 2) Tests med én bevægelig flyder

Målinger:

- Bølgemålinger ved WG7, WG15, WG16, WG17
- Kræfter: vandrette og lodrette på flyder 9
- Belastning og omdrejningshastighed

Variable:

- Flyderform
- Bølgehøjde
- Bølgeperiode
- Belastning

### 3) Tests hvor akslen drejes rundt

Målinger og variable som for test 2) ovenfor. Disse forsøg udføres om muligt helst med påtvungen forudbestemt omdrejningshastighed. Hvis ikke dette er muligt, afprøves med mange flydere, således de øvrige flydere kan trække akslen rundt.

## 8.2 Måling på et system bestående af 5 flydere

Til direkte sammenligning med de numeriske beregninger gennemføres forsøg med 5 flydere tilkoblet. Indledningsvis foretages forsøg med fastholdte flydere hvor der udelukkende måles lodrette kræfter på flyderne i regelmæssige bølger. Disse kræfter vil direkte kunne sammenlignes med resultaterne af Kramer *et al.* (2004b). Efterfølgende foretages forsøg, hvor flyderne ikke fastholdes. Der påføres belastning svarende til det i Rambølls model anvendte. Herved er direkte sammenligning, mellem det fysisk målte effektoptag og det af Rambøll beregnede effektoptag, mulig.

Målingerne gennemføres både for  $gab = 0.2 \cdot \text{flyderdiameter}$  og  $gab = 1.0 \cdot \text{flyderdiameter}$  hvis tiden tillader det.

### **8.3 Tests af hele anlægget i uregelmæssige bølger**

Forsøg med samtlige flydere (40 stk) tilkoblet foretages i uregelmæssige bølger svarende til de fem Nordsøtilstande. Forsøgene gennemføres med både den normale flyderform og den optimerede flyderudformning.

### **8.4 Test af hele anlægget i skråt indkomne uregelmæssige bølger**

Samme forsøg som angivet i afsnit 8.3 udføres, hvor konstruktionen er drejet eksempelvis  $30^\circ$  og  $60^\circ$ . Forsøgene udføres udelukkende med den optimerede flyderform.

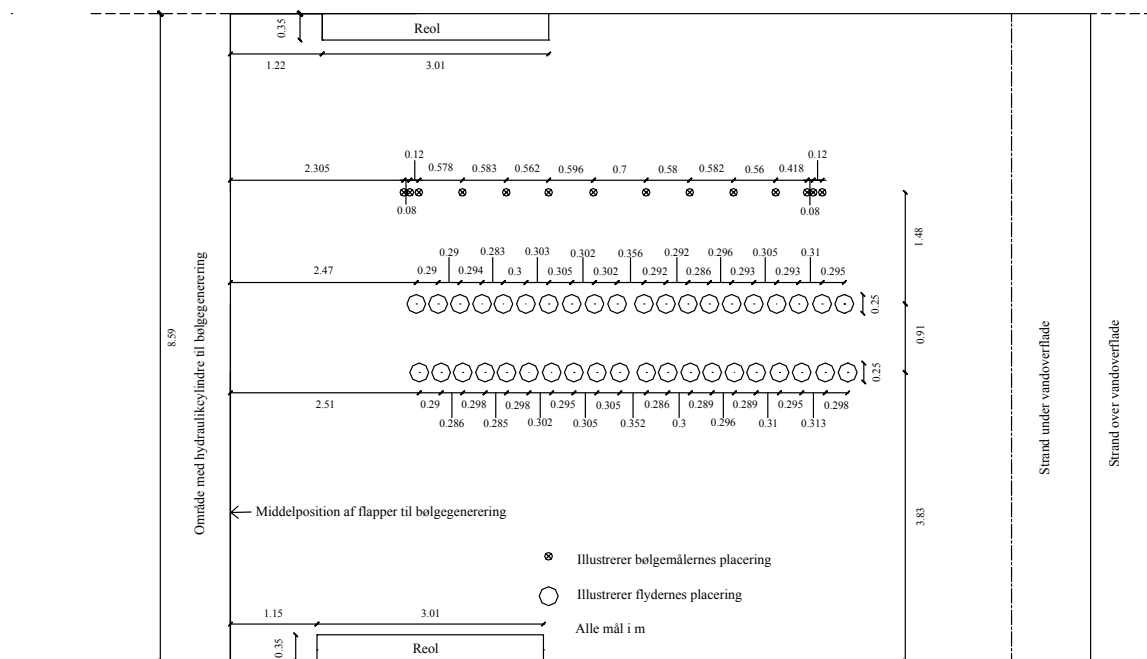
## **9 Referencer**

*Bølgekraftprogram (2000)*, Bølgekraftudvalgets Sekretariat, Januar 2000.

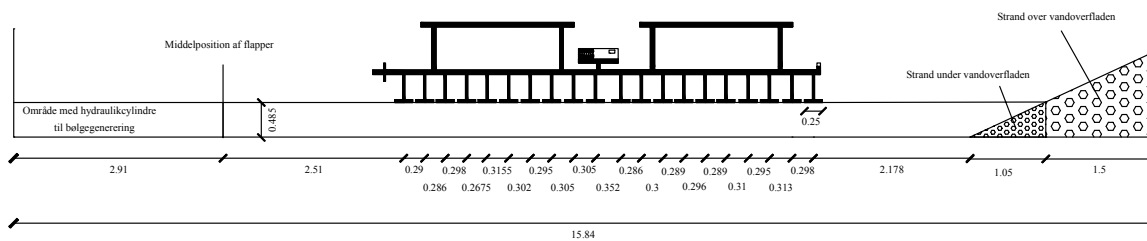
Kramer, M., Brorsen, M., Frigaard, P (2004a). Wave Star – Indledende undersøgelse af flydergeometri. *Hydraulics and Coastal Engineering* No. 4. ISSN: 1603-9874. Aalborg University, Department of Civil Engineering.

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.

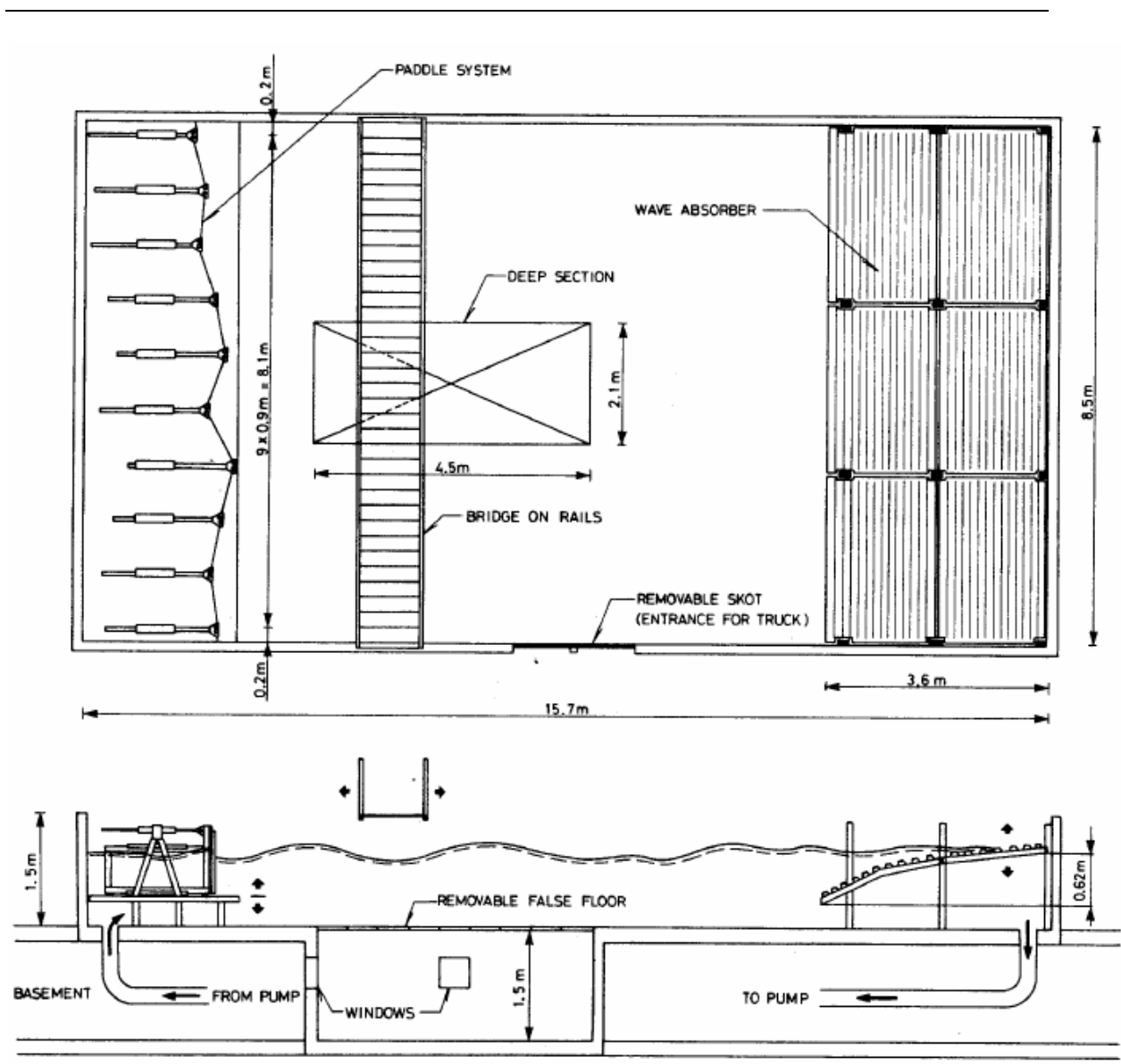
## Appendiks A. Detaljer vedr. layout i bølgebassin



Figur 8. Layout af bølgebassin med detaljer vedr. placering af bølger og bølgemålere.



Figur 9. Tværsnit af bølgebassin med detaljer vedr. placering af bøjerne.



Figur 10. Detaljer vedr. indretning af bølgebassin.



## Appendiks B. Liste over udførte forsøg

### Appendiks B.1 Serie A

Test nr.	Bølgetype	Hs [m]	Tp [s]	Belastning [kg]	Trisse dia. [cm]
001	UR	0.025	0.885	2.00	16
002	UR	0.025	0.885	0.00	16
003	UR	0.025	0.885	0.50	16
004	UR	0.025	0.885	0.70	16
005	UR	0.025	0.885	0.40	16
006	UR	0.025	0.885	0.50	16
007	UR	0.025	0.885	0.00	16
008	UR	0.050	1.107	0.00	16
009	UR	0.050	1.107	2.00	16
010	UR	0.050	1.107	1.00	16
011	UR	0.050	1.107	1.00	7

Målingerne blev stoppet, da det ikke var muligt at påføre tilstrækkeligt belastning.

### Appendiks B.2 Serie B

Serien omfatter tests på ½ maskine i uregelmæssige bølger. Ingen målinger blev foretaget på computer. Målinger udelukkende ved aflæsning på tacho-tælleren.

### Appendiks B.3 Serie C

Test nr.	Bølgetype	H [m]	T [s]	Belastning	Bemærkninger
013	R	0.02	1	Fastholdt	Ingen over eller underskyl
014	R	0.02	1.5	Fastholdt	Ingen over eller underskyl
015	R	0.02	2	Fastholdt	Ingen over eller underskyl
016	R	0.04	1	Fastholdt	Lidt overskyl, mere og mere i løbet af de første sek. Ingen underskyl
017	R	0.04	1.5	Fastholdt	Lidt overskyl, mere og mere i løbet af de første sek. Ingen underskyl
018	R	0.04	2	Fastholdt	Lidt overskyl, mere og mere i løbet af de første sek. Ingen underskyl
019	R	0.06	1	Fastholdt	Meget overskyl ingen underskyl
020	R	0.1	1	Fastholdt	Rigtig meget overskyl ingen underskyl
021	R	0.1	1.5	Fastholdt	Rigtig meget overskyl lidt underskyl

### Appendiks B.4 Serie D

Test nr.	Bølgetype	Hs [m]	Tp [s]	Belastning	Bemærkninger
022	UR	0.025	0.885	Ingen	Awasy, gain 74 %
023	UR	0.050	1.107	Ingen	Awasy, gain 74 %
024	UR	0.075	1.330	Ingen	Awasy, gain 74 %
025	UR	0.100	1.550	Ingen	Awasy, gain 74 %
026	UR	0.125	1.770	Ingen	Awasy, gain 74 %
027	UR	0.175	1.770	Ingen	Awasy, gain 74 %
028	UR	0.025	0.885	Ingen	Awasy, gain 100 %
029	UR	0.050	1.107	Ingen	Awasy, gain 100 %
030	UR	0.075	1.330	Ingen	Awasy, gain 100 %
031	UR	0.100	1.550	Ingen	Awasy, gain 100 %
032	UR	0.125	1.770	Ingen	Awasy, gain 100 %
033	UR	0.075	1.330	Ingen	Prof Waco, gain 74 %
034	UR	0.025	0.885	Ingen	Prof Waco, gain 74 %
035	UR	0.050	1.107	Ingen	Prof Waco, gain 74 %
036	UR	0.100	1.550	Ingen	Prof Waco, gain 74 %
037	UR	0.125	1.770	Ingen	Prof Waco, gain 74 %

## Appendiks B.5 Serie E

Test nr.	Bølgetype	H [m]	T [s]	Belastning	Impulser/min
038	R	0.025	0.89	ingen ~ 7.5 Nm	218
039	R	0.025	1.33	ingen ~ 7.5 Nm	320
040	R	0.025	1.77	ingen ~ 7.5 Nm	245
041	R	0.075	0.89	ingen ~ 7.5 Nm	1200
042	R	0.075	1.33	ingen ~ 7.5 Nm	1200
043	R	0.075	1.77	ingen ~ 7.5 Nm	1060
044	R	0.125	0.89	ingen ~ 7.5 Nm	2102
045	R	0.125	1.33	ingen ~ 7.5 Nm	1920
046	R	0.125	1.77	ingen ~ 7.5 Nm	1860
047	R	0.025	0.89	0 psi ~ 20.7 Nm	62
048	R	0.025	1.33	0 psi ~ 20.7 Nm	170
049	R	0.025	1.77	0 psi ~ 20.7 Nm	150
050	R	0.075	0.89	0 psi ~ 20.7 Nm	620
051	R	0.075	1.33	0 psi ~ 20.7 Nm	880
052	R	0.075	1.77	0 psi ~ 20.7 Nm	740
053	R	0.125	0.89	0 psi ~ 20.7 Nm	1300
054	R	0.125	1.33	0 psi ~ 20.7 Nm	1450
055	R	0.125	1.77	0 psi ~ 20.7 Nm	1450
056	R	0.025	0.89	10 psi ~ 30.9 Nm	0
057	R	0.025	1.33	10 psi ~ 30.9 Nm	48
058	R	0.025	1.77	10 psi ~ 30.9 Nm	84
059	R	0.075	0.89	10 psi ~ 30.9 Nm	340
060	R	0.075	1.33	10 psi ~ 30.9 Nm	680
061	R	0.075	1.77	10 psi ~ 30.9 Nm	590
062	R	0.125	0.89	10 psi ~ 30.9 Nm	790
063	R	0.125	1.33	10 psi ~ 30.9 Nm	1150
064	R	0.125	1.77	10 psi ~ 30.9 Nm	1100
065	R	0.025	1.33	20 psi ~ 41.1 Nm	0
066	R	0.025	1.77	20 psi ~ 41.1 Nm	53
067	R	0.075	0.89	20 psi ~ 41.1 Nm	184
068	R	0.075	1.33	20 psi ~ 41.1 Nm	580
069	R	0.075	1.77	20 psi ~ 41.1 Nm	504
070	R	0.125	0.89	20 psi ~ 41.1 Nm	535
071	R	0.125	1.33	20 psi ~ 41.1 Nm	1048
072	R	0.125	1.77	20 psi ~ 41.1 Nm	912
073	R	0.025	1.77	30 psi ~ 51.3 Nm	0
074	R	0.075	1.33	30 psi ~ 51.3 Nm	460
075	R	0.075	1.77	30 psi ~ 51.3 Nm	429
076	R	0.125	1.33	30 psi ~ 51.3 Nm	840
077	R	0.125	1.77	30 psi ~ 51.3 Nm	790
078	R	0.075	1.77	40 psi ~ 61.5 Nm	350
079	R	0.125	1.33	40 psi ~ 61.5 Nm	780
080	R	0.125	1.77	40 psi ~ 61.5 Nm	618
081	R	0.125	1.33	43.5 psi ~ 65.1 Nm	668
082	R	0.125	1.77	43.5 psi ~ 65.1 Nm	468

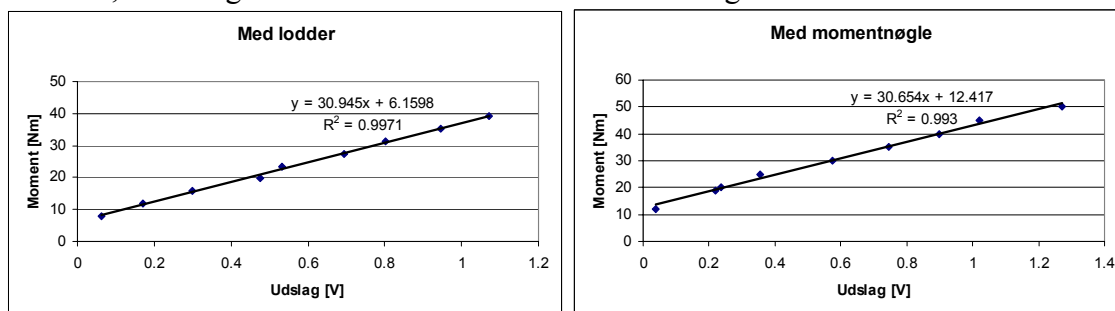
## Appendiks C. Kalibrering af instrumenter

### Appendiks C.1 Friktion i maskinen

Friktionen er mange gange målt dels med lodder, dels med momentnøgler. De sidste og mest præcise målinger for hele maskinen viser, at friktionen er 7.5 Nm. For ½ maskine er friktionen målt til 4 Nm.

### Appendiks C.2 Strain gauges til torsionsmåler

Bemærk, at udslaget i volt ikke var nulstillet inden forsøgene.



Kalibreringsfaktoren for torsionsmåleren vælges ud fra figurerne til 30.8 Nm/V. Kalibreringsfaktoren er multipliceret med målingerne, således målingerne i datafilerne fra torsionsmåleren er angivet i Nm.

### Appendiks C.3 Strain gauges på arme tilkoblet flydere

Lodret kræfter				
Arm nr.	1 kg h.side af flyder [V]	1 kg v.side af flyder [V]	Middelværdi [V]	Kalibreringsfaktor [N/v]
1	-0.4890	-0.4910	-0.4900	20.0200
3	-0.4780	-0.4710	-0.4745	20.6740
5	-0.4920	-0.4920	-0.4920	19.9390
7	-0.4690	-0.4730	-0.4710	20.8280
9	-0.4660	-0.4750	-0.4805	20.4160
11	-0.4980	-0.5110	-0.5045	19.4450
13	-0.4780	-0.4840	-0.4810	20.3950
15	-0.4770	-0.4770	-0.4770	20.5660
17	-0.4850	-0.4780	-0.4815	20.3740
19	-0.4930	-0.4930	-0.4930	19.8990

Vandrette kræfter				
Arm nr.	1 kg h.side af flyder [V]	1 kg v.side af flyder [V]	Middelværdi [V]	Kalibreringsfaktor [N/v]
1	0.6150	-0.5900	0.6025	16.2820
9	0.5650	-0.5700	0.5675	17.2800

Kalibreringsfaktoren er multipliceret med målingerne, således målingerne i datafilerne fra alle strain gauges er angivet i N.

Lodrette kræfter regnes positive for opadrettede kræfter (når flyderen trykkes opad).

Vandrette kræfter regnes positive for kræfter langs maskinen fra enden mod bølgemaskinen til enden mod stranden (i nærværende forsøg svarer dette til bølgeudbredelsesretningen).

## Appendiks C.4 Bølgemålere

Bølgemålerne kalibreres hver dag, da målingerne er lidt afhængige af temperaturen. Dette foregår ved at hæve alle bølgemålerne præcis 10 cm og foretage en aflæsning på DC volt-signalet. Kalibrering er hurtig, da bølgemålerne er monteret med cylindre som vha. trykluft kan bevæges præcis 10 cm op eller ned.

Målingerne i datafilerne er i volt, og disse skal således multipliceres med kalibreringsfaktorerne for bølgemålerne inden dataanalyse. Disse kalibreringsfaktorer kan findes i Excel arket "Serie D - Kalibrering\_bølgemålere.xls".

## Appendiks C.5 Omdrejningstæller

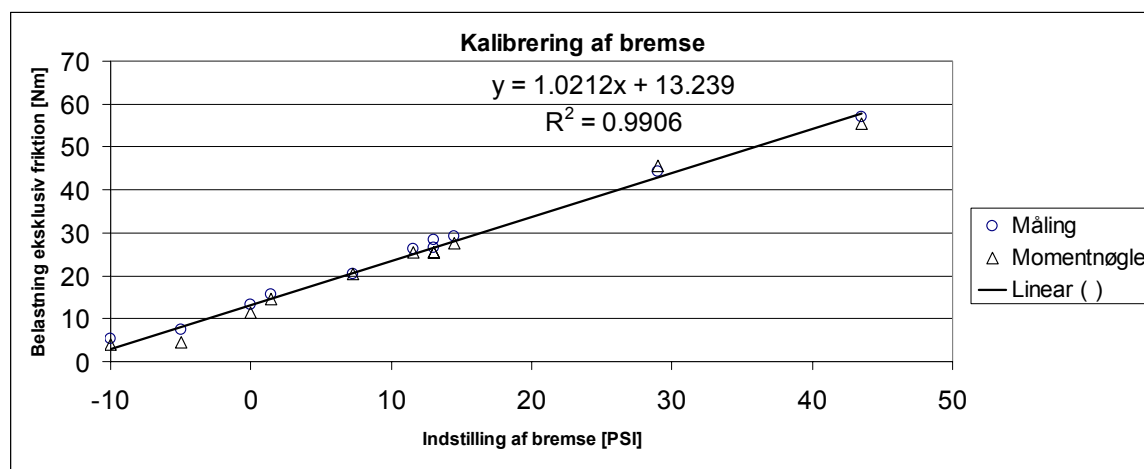
Omdrejningstælleren også kaldet tacho-måleren giver en impuls for hver grad akslen drejes. Ydermere er der et lille display på omdrejningstælleren, hvor disse impulser tælles. De i denne rapport angivne resultater benytter udelukkende resultater fra manuelle aflæsninger på dette display.

## Appendiks C.6 Bremse

Bremsen er kalibreret ud fra skalaen angivet på trykreduktionsventilen. Denne skala starter ved -10 PSI, og selvom indstillingen er -10 PSI bremses stadig med 3 Nm jf. kalibreringsfaktoren.

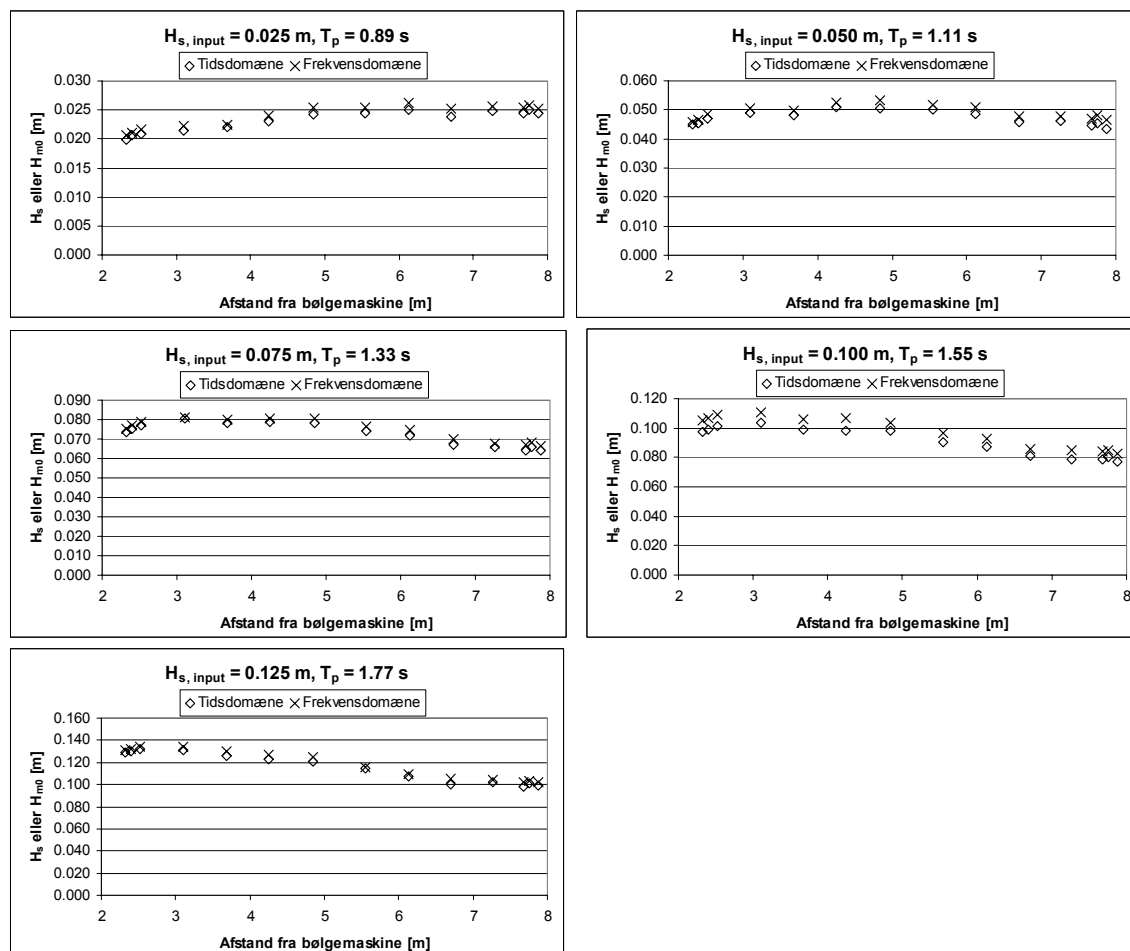
Beregning af bremsekraften er således:

- Ingen bremse tilkoblet lufttryk: Friktion = 7.5 Nm
- Bremse tilkoblet lufttryk: Belastning =  $1.02 \cdot \text{PSI} + 13.2$  + friktion



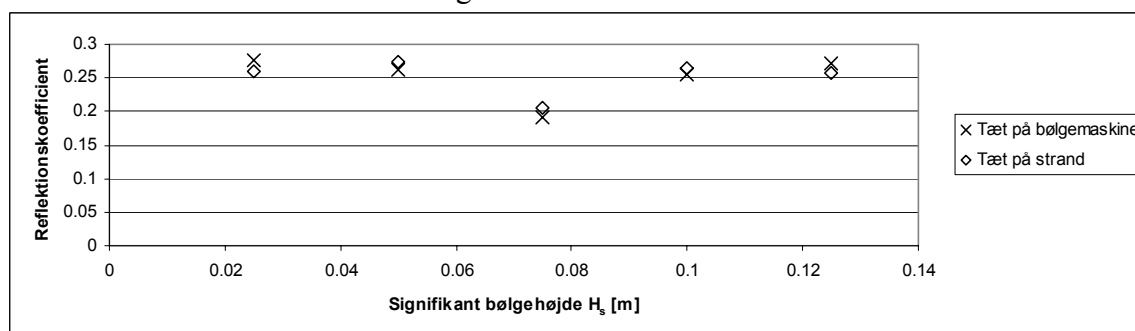
## Appendiks D. Resultater af Serie D, bølger i bassinet

Denne serie blev udført uden flydere i vandet for at måle bølgerne i bassinet. Af Figur 11 fremgår, at bølgehøjderne varierer lidt ned gennem bassinet. Dette skyldes stående bølger i bassinet. I gennemsnit måles imidlertid ret præcist de samme signifikante bølgehøjder som ønsket ( $H_{s, \text{input}}$ ). Det bemærkes desuden, at resultaterne af tidsdomæne analyserne og frekvensdomæne analyserne er omtrent ens.



Figur 11. Resultater af bølgemålinger i bassinet for de 5 uregelmæssige bølgetilstande.

De to sæt af bølgemålere benyttes i en refleksionsanalyse. Som det fremgår af Figur 12 måles samme refleksionskoefficient for systemet af bølgemålere tæt ved stranden og systemet af bølgemålere tæt ved bølgemaskinen. Det fremgår, at refleksionerne fra stranden er omtrent 25% uanset bølgetilstanden.



Figur 12. Refleksioner i bassinet.

---

## Appendiks E. Dagbog for modelforsøg

### Appendiks E.1 Mandag d. 13. September

Modellen ankommer kl. 17:00 til laboratoriet på Sohngaardsholmsvej 57, 9000 Aalborg. Per, Keld og Niels har kørt den herop. Morten og Peter tager imod og vi bærer den ind i det dybe bassin.

Deltagere:

Morten Kramer	AAU
Peter Frigaard	AAU
Per Resen	Wave Star Energy
Keld Arpe	Wave Star Energy
Niels Arpe	Wave Star Energy

### Appendiks E.2 Tirsdag d. 14. September



Niels, Keld og Per er her også i dag. Stranden etableres og modellen bores fast i bassingulvet. Vi installerer flyderne på armene. Vi afprøver omdrejningstælleren og tilkobler skivebremsen. Strain gauge forstærkeren monteres på modellen, og kabler trækkes til denne. Straingauges testes og det konstateres at 2 tilkoblinger er gået i stykker. Der aftales at disse forsøges repareret i morgen.

Vi forsøger at benytte det indbyggede interface i strain gauge forstærkeren til hentning af data gennem RS232 forbindelsen. Det viser sig at være særdeles problematisk.

Følgende problemer lokaliseres:

- Samplingsfrekvensen kan tilsyneladende ikke sættes. Dette formodes at skyldes, at apparatet ikke indeholder et ur. Dette problem lader til ikke at kunne løses på fornuftig vis.
- Selvom vi får systemet op og køre bliver synkronisering med de øvrige data besværlig, da systemet kun kan køre for sig selv og vi derfor skal benytte to computere til opsamling.

Forstærkeren har imidlertid en analog udgang efter strainingauge broerne. Gennem denne kan signalet ledes til en anden computer og samles op på traditionel vis. Dette testes og det viser sig at virke fortrinligt.

Vi bliver enige om, at den bedste og mest pålidelige opsamlingsmåde uden tvivl er at samle alle data op på den samme computer. Da dette tilmed er den letteste måde at sample på og efterfølgende analysere dataene, vælges det ikke at arbejde videre med det i strainingauge forstærkeren indbyggede interface.

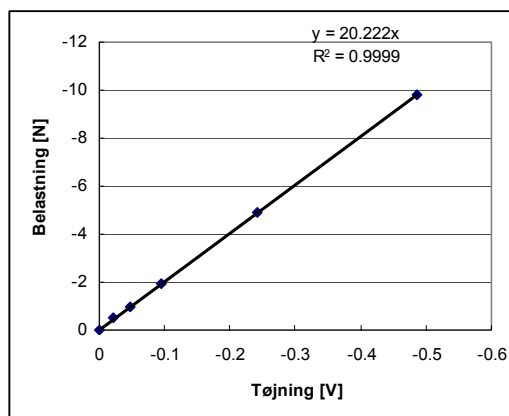
Liste over sammenhæng mellem kanaler på forstærkeren og strainingauge placeringer etableres i Excel regnearket "Opsætning\_af\_kanaler.xls".

Deltagere:

Morten Kramer	AAU
Peter Frigaard	AAU
Kurt Sørensen	AAU
Niels Drustrup	AAU
Per Resen	Wave Star Energy
Keld Arpe	Wave Star Energy
Niels Arpe	Wave Star Energy

### Appendiks E.3 Onsdag d. 15 September

Dagbogen opstartes. Gain og excitations spænding påstrainingauges justeres. De 2 strainingauges repareres med succes.



System til kalibrering af strain gauges afprøves. Ovenfor ses eksempel af belastning af flyder 5 med 50g, 100g, 200g, 500g og 1000g. Det fremgår at lineariteten er i orden, og at udslaget i volt er acceptabelt. Det vælges at regne kræfter positive for opadrettede kræfter (modsat den påsatte kraft). Kalibreringsfaktorer er herved cirka 20 N/V.

Jeppe og Thomas fra B9 i Esbjerg dukker op og får en rundvisning i laboratoriet. Vi snakker lidt løst om målemetoder og udstyr. Vi påtænker, at vi efter de første målinger påsætter flytningsmålere på en eller måske to af bøjerner.

De første 3 stik til omformning af stik fra strainingauge-forstærkerens type til den type som anvendes i laboratoriet laves og afprøves.

En mere præcis metode til kalibrering af strainingauges end den ovenfor viste tænkes udført i morgen.

---

Computer opsættes til opsamling fra straingauges.

Deltagere:

Morten Kramer	AAU
Carl Carstens	AAU
Jeppe Moesgaard	AAU, Esbjerg
Thomas S Sørensen	AAU, Esbjerg

#### **Appendiks E.4 Torsdag d. 16. september**

Tilslutning af omdrejningstæller til computer og kontrol af signal foretages. Det virker fint, men vi skal lave et program til omregning fra impulser til omd/min.

Kort samtale med Per Resen telefonisk: Vinkel mellem arme og flydere er 37 grader.

Herved kan flyderne placeres præcis vandret vha. en speciel vinkelmåler med indbygget vaterpas. Dette er især nyttigt til brug ved kalibrering af SG's.



Samtlige kanaler til straingauges er nu tilkoblet computeren og der er gode signaler igennem.

Bremeskive med straingauges til moment-måling demonteret og kalibreret:

Kalibreringsfaktor 29.3 Nm/V.

Systemet med straingauges til momentmåling skal ændres. Systemet er ustabil og ikke holdbart i længden pga. ledningen som oprulles. Peter Frigaard foreslår et system af gauges monteret direkte på bremsearmen. Dette system vil uden tvivl være meget mere pålideligt og tilmed præcisere, da ledningen ikke ruller med omkring akslen når systemet kører. Men, da systemet skal stå (næsten) klar på mandag er det urealistisk at få færdigt inden (det tager nok mindst en uge at lave dette system). Vi må derfor nøjes med de monterede straingauges til momentmåling i første omgang.

Vanddybden i bassinet skal være 49-50cm.

Straingauges til måling af lodrette kræfter er kalibreret. De to vandrette mangler stadig, og der er stadig ikke "guf" omkring gauges.

Deltagere:

Morten Kramer	AAU
Peter Frigaard	AAU
Kurt Sørensen	AAU
Niels Drustrup	AAU



---

## Appendiks E.5 Fredag d. 17. september

Kalibrering af SG's til vandrette kræfter. Alle SG's er nu kalibreret.



Opmåling af modstand i systemet: Skivebremsen demonteret under disse målinger, da den slæber lidt. 2 systemer til måling af moment er udført:

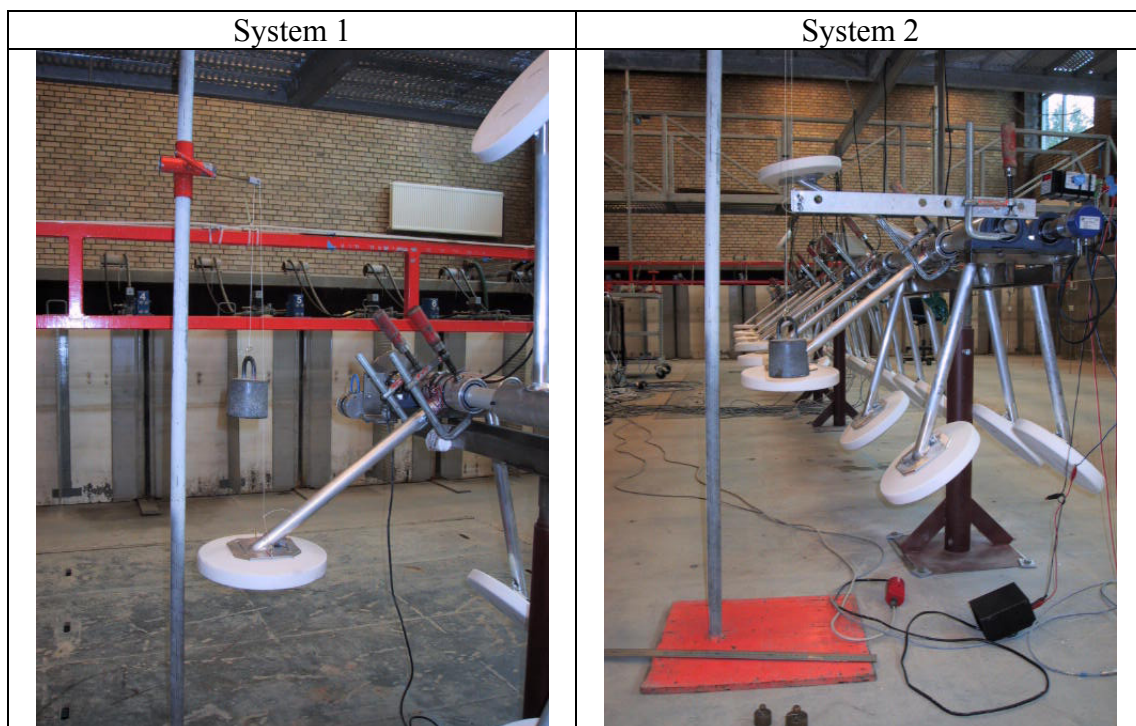
- 1) Én flyder løftes vha. lodder. Der måles hvor mange kilo der skal til før akslen drejer. Følgende resultater måles:

Flyder	Kg
1v	2.0
3v	2.0
7v	2.1
13v	2.2
19v	2.2
19h	1.95
13h	1.95
7h	2.1
4h	2.0
<b>Gennemsnit:</b>	<b>2.1</b>

De 2.1 kg svarer til en kraft på 20.2 N, hvilket igen svarer til et moment på 7.9 Nm.

Problem: Nogle få af bøjerne drejer lidt med, hvorved der sandsynligvis måles en lidt for lille modstand. Derfor udføres måling efter system 2.

- 2) Arm monteres direkte på akslen og vha. lodder drejes akslen. Pga. at drejningen af akslen opstår mere pludseligt end efter system 1, synes denne måling mere præcis. Ingen bøjer drejer med. Der måles et friktions-moment på 8.1 Nm.



Bølgemålere er sat op (14 stk) og kabler trækkes. 2 sæt bølgemålere til refleksionsanalyse (et sæt ved bøje 1 og et ved bøje 19) og én bølgemåler ud for hver bøje med straingauges.



Deltagere:

Morten Kramer	AAU
Abdullah Mohammed	AAU
Kurt Sørensen	AAU
Niels Drustrup	AAU

### Appendiks E.6 Mandag d. 20. september

Omdrejningsmåler tjekkes igen mere præcist: Der drejes en kvart omgang (= 90 grader) og samles op på computer. Efterfølgende er signalet analyseret tjekket på computeren og antallet af peaks (svarende til grader) er talt til 90.

---

En af ledningerne fra strainingaugene er ikke isoleret ordentligt. Den repareres med isolationslak.

Jørgen begynder på at lave en nøgle til at vride akslen med et bestemt moment.

Keld, Niels, Jeppe og Thomas begynder at sætte guf omkring gaugene. Der er nu guf på alle gauges og vi har tjekket kalibrering og signaler.



Kalibrering af bremse. Der opstår et problem: Bremsen vil ikke bremse kraftigt nok. Vi tror at maksimal trykket fra regulatoren på 3 bar måske er for lidt. Vi prøver derfor at slutte bremsen direkte til kompressoren.

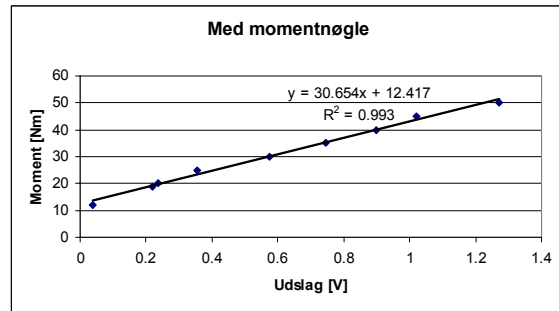
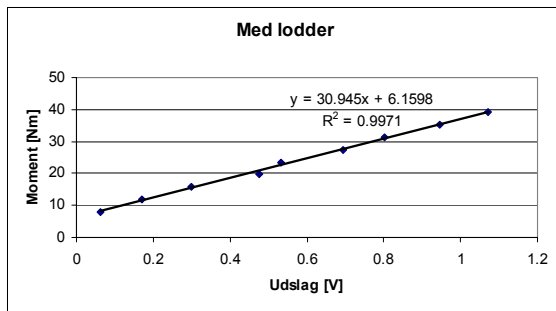
Vi kalibrerer torsionsmåleren igen for at være helt sikker på kalibreringen. Vi kalibrerer på to måder: 1) Med lodder fastgjort i snorsystem til arm monteret på akslen, 2) Med momentnøgler.

1)



2)





Bemærk, at vi ikke nulstillede kanalen inden kalibreringen. Kalibreringsfaktoren måles således til 30.9 Nm/V og 30.7 Nm/V for hhv. måling med lodder og med momentnøgle. Sidste gang Morten kalibrerede torsionsmåleren var kalibreringsfaktoren 29.3 Nm/V. At Morten målte lidt mindre sidste gang skyldes, at han ikke kompenserede den påførte vægt med vægten af armen. De sidste målinger er således mest præcise. Vi vælger derfor at benytte kalibreringsfaktoren 30.8 Nm/V for torsionsmåleren.

Vi måler friktionen i systemet gentagende gange. Vi benytter både momentnøglen og systemet med lodder. Der er lidt forskel mellem målingerne, således giver de maksimale målinger cirka 9 Nm og de mindste cirka 6.5 Nm. I gennemsnit måler vi cirka det samme som Morten målte sidst, altså 8 Nm.

Vi tømmer bassinet for computere mv og påbegynder at fylde vand i.



Om aftenen mødes vi på restaurant O' Sole Mio. Bagefter går vi en tur i byen.

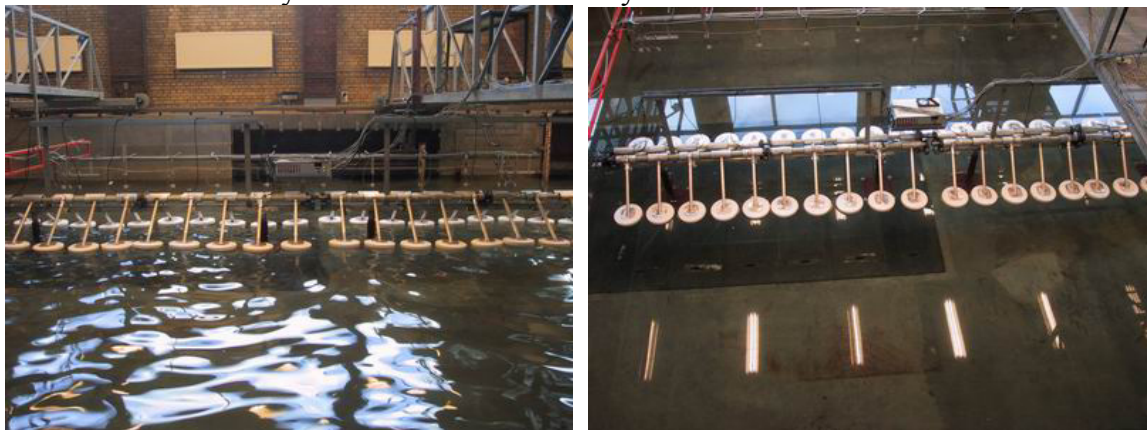
Deltagere:

Morten Kramer	AAU
Peter Frigaard	AAU
Jørgen Sørensen	AAU
Lars Damkilde	AAU, Esbjerg
Per Resen	Wave Star Energy
Keld Arpe	Wave Star Energy
Niels Arpe	Wave Star Energy
Jeppe Moesgaard	AAU, Esbjerg
Thomas S Sørensen	AAU, Esbjerg

---

## Appendiks E.7    Tirsdag d. 21. september

Vi fortsætter med at fylde vand i til bassinet er fyldt.



De sidste kabler trækkes til bølgemålere og opsætning af computeren til opsamling fra bølgemålere foretages.

Vi tester opsætningen i forskellige regelmæssige bølger og prøver at påsætte forskellige belastningsmomenter. Det viser sig tydeligt, at bremsen ikke er kraftig nok. Det er således ikke muligt at finde toppunkt for effektkurven. Vi prøver at påsætte ekstra belastning med skruevinger og brædder monteret omkring bremseskiven. Dette er imidlertid heller ikke nok til at trække tilstrækkeligt med effekt ud. Vi vil arbejde videre med dette i morgen.

Det observeres, at der er en lille fjedervirkning i systemet. Endvidere er der meget slør i to af maskinens mekaniske systemer. 1) Mekanisk slør i tandhjul mellem aksler på højre og venstre side. 2) Mekanisk slør i kobling mellem foraksel og bagaksel (gummipakning). Disse to forhold vil blive forsøgt udbedret i morgen.

Straingaugen ved arm 19 har været i stykker siden kort efter at der blev monteret guff omkring gaugen. Guffen fjernes og straingaugen repareres med succes.



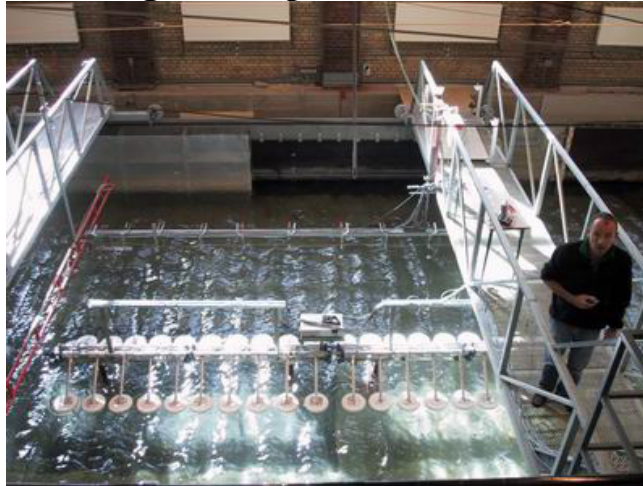
Det viser sig at computeren til opsamling af data er ustabil. Morten forsøger at rette dette men må tilsidst give op. Vi aftaler, at beholde den nuværende konfiguration under de indledende forsøg. Morten vil senere forsøge at forbedre opsamlingsystemet evt. med en ny computer. Da dette vil tage en lille uges til udskydes det til senere og skrives på ønskelisten.

---

Deltagere:

Morten Kramer	AAU
Peter Frigaard	AAU
Per Resen	Wave Star Energy
Keld Arpe	Wave Star Energy
Niels Arpe	Wave Star Energy
Jeppe Moesgaard	AAU, Esbjerg
Thomas S Sørensen	AAU, Esbjerg

## Appendiks E.8 Onsdag d. 22. september



Niels går i gang med at lave et system til en ny bremse. Denne skal fungere efter Tusindben-princippet med et loddssystem som trækkes af en snor forbundet omkring akslen. Herved vil der kunne skabes store modstandsmomenter.

Vi aftaler at lave to små forsøg ( $T = 1.2$  s,  $H = 0.1$  m, belastning = bremse med fuld tryk samt et bremse inkl. skruetvinger) før mekanisk slør fjernes. Disse forsøg vil efterfølgende gentages efter sløren er fjernet, hvorved effekten ved indgrebet kan vurderes.

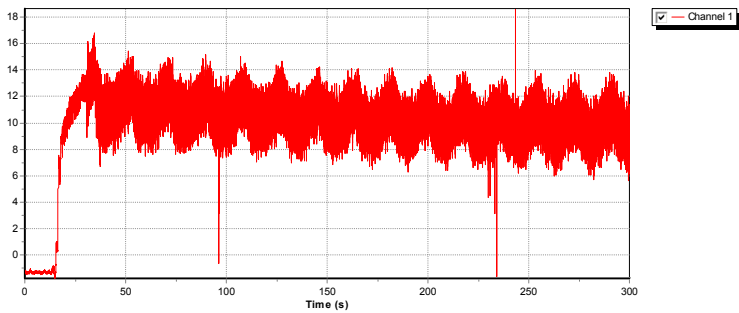
Ønskesedlen ser nu således ud:

- Ny computer til dataopsamling
- Lave program til beregning af omdrejningstal og effektudtag
- Bøjer placeres med præcist gap
- Slør i maskinen fjernes
- Bremsesystem som virker og er pålideligt

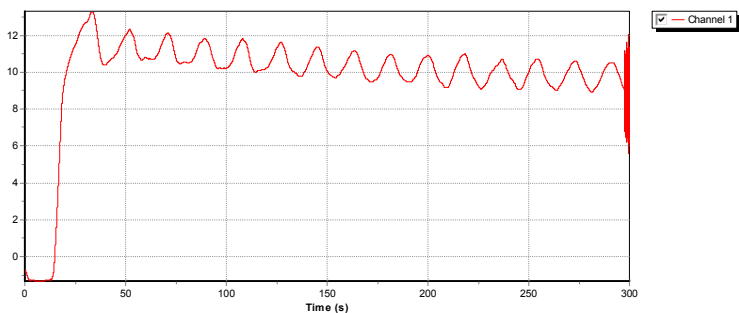
**Forsøg inden slør i systemet fjernes. (Regelmæssige bølger  $T=1.2$  s,  $H = 0.1$  m).**

### 1) Bremse = 3 bar

- Omdrejninger: 1250 grader /min svarende til 17 sek/omgang.
- Målinger ved at se på SG-forstærker: Uden bremse: 0 Nm, i løbet af forsøget: 9.2 Nm, efter forsøget med bremsetryk = 6.2 Nm (svarende til friktion i systemet), efter bremsen er løsnet måles 0 Nm igen.
- Målinger ved opsamling fra torsionsmåler (værdier i Nm):



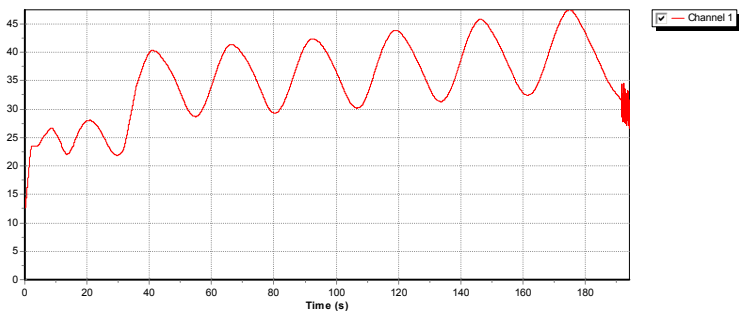
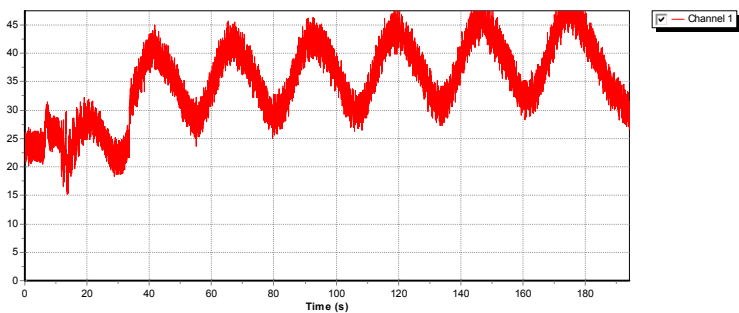
Ved et gennemsnits filter med en filterlængde på 400 punkter svarende til 5 sekunder (80Hz) fås følgende:



Målingerne giver således omtrent 10 Nm, hvilket er det samme som det observerede. To “mærkelige” fænomener observeres. 1) Bremskraften falder over tiden (formentlig efterhånden som bremsen bliver varm). 2) Der er en harmonisk svingning væsentligt længere end bølgeperioden. Denne svingning har en periode på knap 20 sek.

## 2) Bremse = 3 bar + skruetvinger monteret på skive “rimeligt hårdt”

- Omdrejninger: 810 grader /min = 27 sek/omgang



Bemærk at begge akser er anderledes en på de forige. Tidsskalaen kun går til 180 sek, hvor den på den forige graf gik til 300s (grunden til dette er, at forsøget blev afbrudt, da én kom til at slukke for bølgemaskinen).

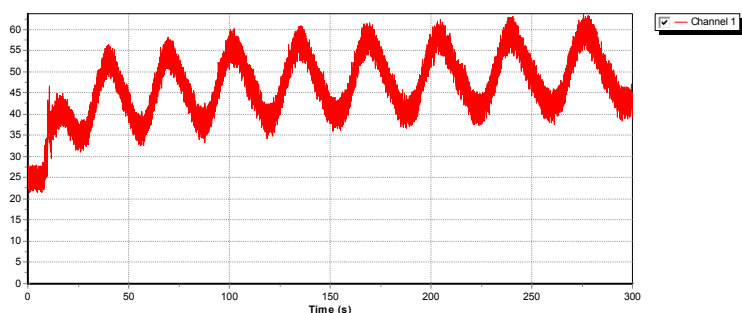
Der observeres et gennemsnitligt moment på omtrent 40 Nm. Ydermere ses, at momentet varierer temmeligt meget i tiden. Amplituden for det oscillerende moment er væsentligt større end for den mildere indstilling af bremsekraften. Ydermere er perioden væsentligt længere, hvor den nu er ca. 27 sek (før var den knap 20 sek). Dette indikerer, at disse store fluktuationer ikke skyldes uønskede bølger i bassinet, men derimod formodes det at skyldes, at bremsen bremses skævt eller også er der en skævhed i akslen.

Vi påbegynder at fjerne slør i maskineriet.

**Forsøg efter slør i systemet er fjernet. (Regelmæssige bølger  $T=1.2$  s,  $H = 0.1$  m).**

Med belastning med trækloids:

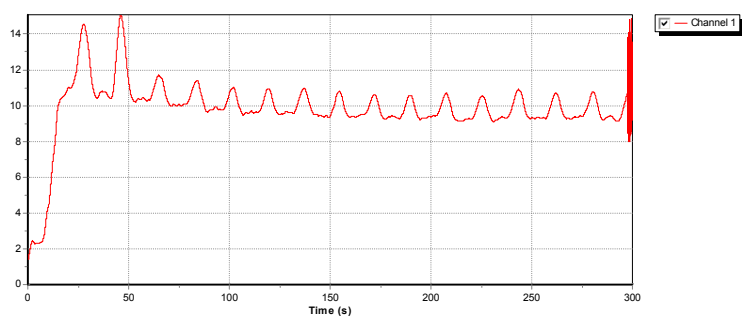
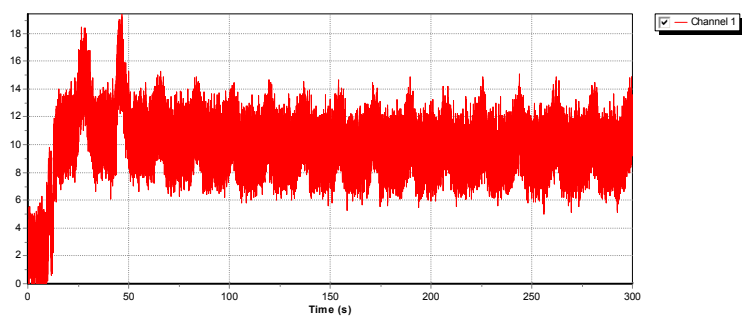
- Omdrejningerne falder cirka 30 grader/min for hver gang der måles (cirka hvert minut). Dette indikerer, at bremsen bremses mere og mere (momentet stiger også). Vi måler cirka 650 grader/min. Dette svarer til 1.8 omd/min, hvilket svarer til en omdrejningsperiode på  $60\text{sek}/1.8 = 33$  sek/omgang. Som det ses af nedenstående svarer dette til den målte fluktuation i bremsekraften.



Forsøgene kan således ikke bruges.

Uden trækloids, men med 3 bar på bremsen:

- 1280 grader/min. Det observeres, at omdrejningerne falder en lille smule som tiden går (efter ca. 5min er den 1250 grader/min)





---

Vi måler således både samme moment (cirka 10 Nm) og omdrejningstal som før sløren i systemet blev fjernet.

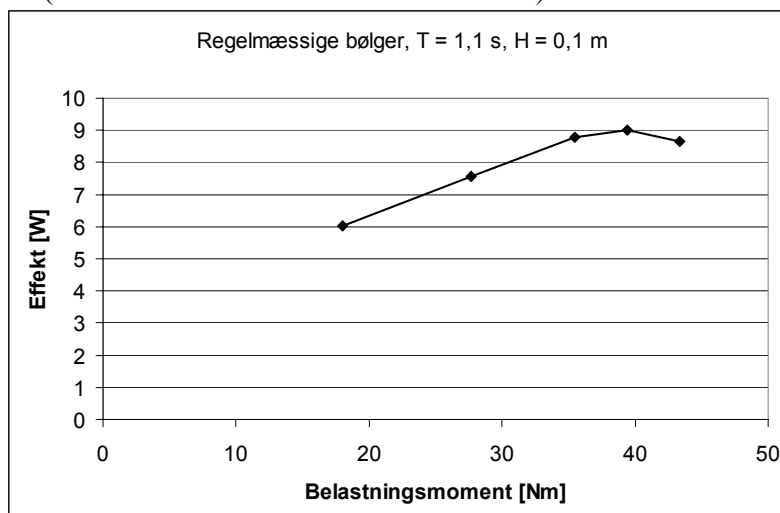
**Konklusionen på forsøgene er, at bremsen bremses skævt eller også er der en skævhed i akslen.**

Kl 14.00 påsættes der en trisse på 8 cm og lod på 12,7 kg, i stedet for den påsatte luftbremse. Dette gøres for at få bedre målinger mere konstante målinger. Loddet og trissen vil kunne give en konstant bremsning af systemet da modstandsmomentet er konstant, dog vil WS ikke kunne køre i længere tid, da drifttiden afhænger af snorens længde.

Ved at foretage et forsøg med luftbremsen med et givet driftmoment, og foretage et forsøg med lod og trisse, med tilsvarende driftmoment, som ved luftbremsen, kan det konstanteres om der er overensstemmelse mellem disse 2 bremsesystemer.

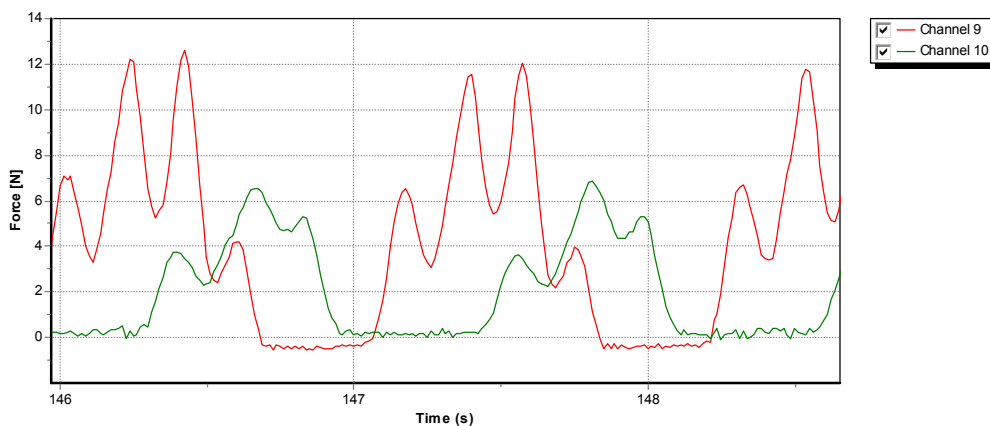
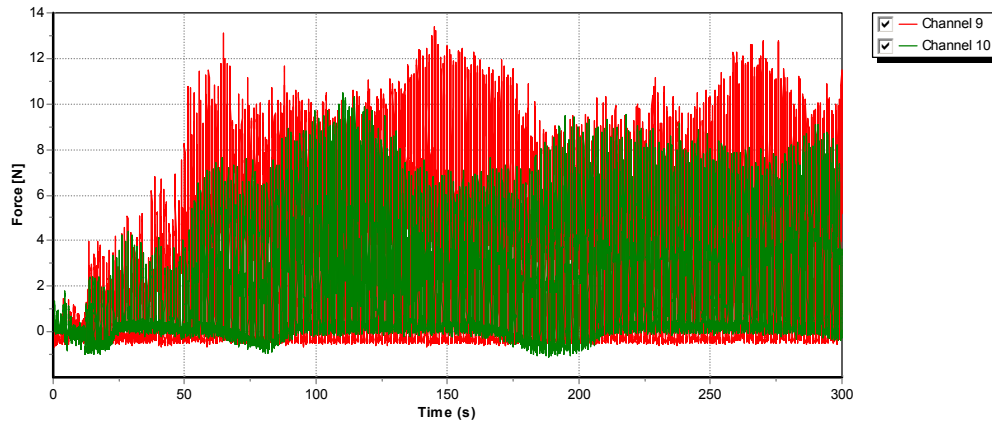
Efter at have foretaget forsøget, med et driftmoment på 18 Nm, svarende til maksimal bremskraft med den anvendte bremse, ses det, at flyderne tættest på bølgerne, ikke bliver trykket ned i vandet. Dvs. anvendelsen af lod og trisse måske giver bedre resultater.

Vi kører forsøg med korte regelmæssige bølger med fast bølgehøjde  $T = 1.1$  s,  $H = 0.1$  m. Der belastes med større og større modstandsmoment, hvorved effektkurven for bølgetilstanden kan optegnes, se efterfølgende figur. Det fremgår, at effektkurven topper ved cirka 40 Nm. Det er derfor (igen) tydeligt, at den anvendte bremse ikke er kraftig nok (den kan maksimalt bremse 12 Nm). Ved den afprøvede bølgetilstand svarer toppunktet til en effekt på 9 W (i fuldskala 1:40 svarer det til 3.6 MW).



Det prøves med fuld Wave Star og en  $\frac{1}{2}$  WS. Der køres med en periode på 1,1 sek. og en bølgehøjde på 10 cm.

Det erfarer, at kraftens maksimale udsving på én flyder varierer en del over længere tid, se første efterfølgende figur. Efter mange forsøg ses det desuden, at den målte tidlige variation af kraften på en flyder, ikke giver en blød kurve tæt på en sinuskurve, men derimod optræder mange små sekundære toppe over én bølgeperiode ( $T = 1,1$  sekund), se efterfølgende figur nummer to som er et udsnit over ca. 2,5 bølgeperioder.



Det konstateres, at flydere og flyderarme ikke følger en rolig konstant bevægelse, men derimod foregår bevægelsen i små ryk. Vi vil undersøge dette nærmere i morgen.

Deltagere:

Morten Kramer	AAU
Peter Frigaard	AAU
Niels Drustrup	AAU
Per Resen	Wave Star Energy
Keld Arpe	Wave Star Energy
Niels Arpe	Wave Star Energy
Jeppe Moesgaard	AAU, Esbjerg
Thomas S Sørensen	AAU, Esbjerg

### Appendiks E.9 Torsdag d. 23. september

Niels Hjørnet kommer til fremvisning og en snak med Per.

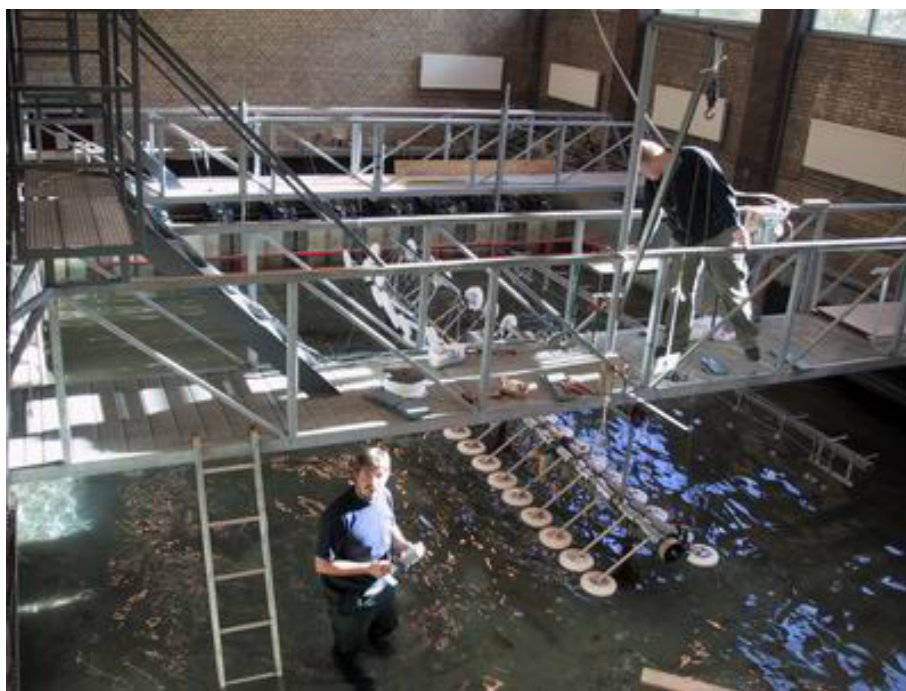
Vi lægger planer for den næste tid inden på onsdag:

- Vi vil køre uregelmæssige bølger med den nuværende konfiguration med en halv maskine. Herved er direkte sammenligning med resultater for Tusindben mulig.
- Herefter vil vi fastholde én flyder (alle andre flydere oppe) og måle kræfterne på denne for en regelmæssig bølge med både en kort periode og en meget lang periode.

- Det samme gentages for en række af flydere med ens afstand mellem flyderne (alle fastholdt).
- Måling af skyggevirkning med bølgemålere efter én fastholdt flyder
- Flyder med fri mulighed for rotation i pitch og roll laves (kugleleje og fjedre) og testes
- Tusindben testes igen sammen med Wave Star.

Vi diskuterer muligheder for afprøvning af forskellige flyderudformninger.

**Vi har følgende deadline inden på onsdag: Wave Stars effektproduktion i uregelmæssige bølger skal fastlægges for den nuværende konfiguration med ½ maskine og sammenlignes med Tusindben.**



Inden dagen er omme får vi kørt de første uregelmæssige bølgeserier med Wave Star. Vi skifter til en mindre trisse for at kunne køre i længere tid.

Vi måler friktionen i systemet med ½ maskine.

Deltagere:

Morten Kramer	AAU
Niels Hjørnet	Niels Hjørnet-Yachtdesign
Per Resen	Wave Star Energy
Keld Arpe	Wave Star Energy
Niels Arpe	Wave Star Energy
Jeppe Moesgaard	AAU, Esbjerg
Thomas S Sørensen	AAU, Esbjerg

### **Appendiks E.10 Fredag d. 24. september**

Vi laver forsøg med én fastholdt flyder. Flyder nr. 9 anvendes, da der ved denne kan måles både vandrette og lodrette kræfter. Efter de første forsøg opdager vi, at flyderen har rystet sig løs. Det er derfor tvivlsomt at forsøgene kan bruges.



Vi går i gang med kontrol af bølgemålinger. Vi afprøver to positioner af bølgemålerne: I øverste position og i nederste position. Vi måler samme bølgehøjder for de to positioner. Der måles generelt lavere bølgehøjder i bassinet end svarende til det angivne i bølgegenereringsprogrammet Awasys. På mandag vil vi justere gain af maskinen, således bølgehøjderne passer.

Bølgehøjderne varierer noget ned gennem bassinet. For små korte bølger stiger bølgehøjden generelt jo nærmere bølgerne kommer på stranden. For store lange bølger falder bølgehøjderne ned mod stranden. Dette forhold er beskrevet fint vha. de opstillede bølgemålere.

Vi måler reflektionen fra stranden til 10-30% afhængig af bølgetilstanden.

Vi bærer den foreste del af maskinen ud af bassinet, og Jørgen påbegynder at montere den nye skivebremse.



Det observeres, at nogle af flyderne slipper vandoverfladen ved høje bølger.

Gaugene på arm19 er nu gået helt i stykker. Det er nødvendigt at montere nye SG's.

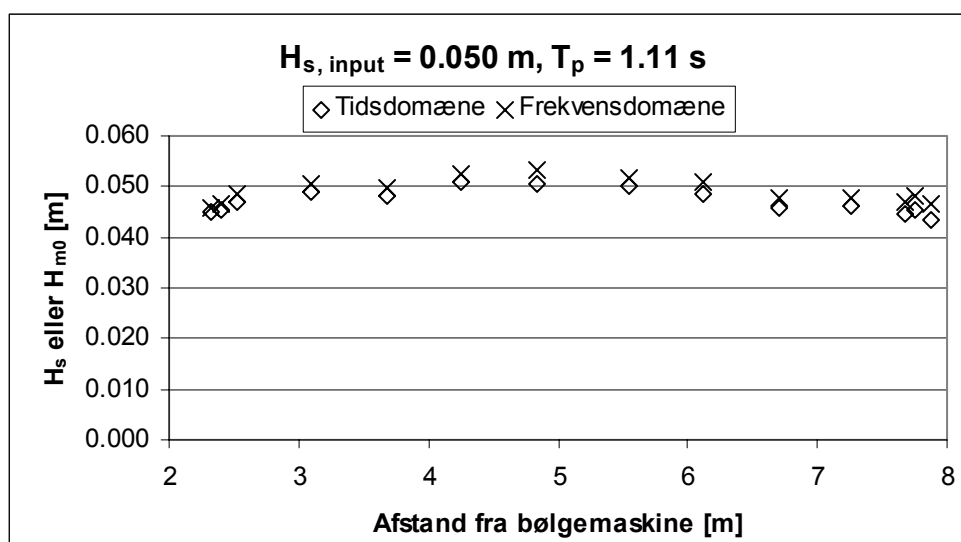
Deltagere:

Morten Kramer	AAU
Jørgen Sørensen	AAU
Jens Peter Kofoed	AAU
Keld Arpe	Wave Star Energy
Niels Arpe	Wave Star Energy
Jeppe Moesgaard	AAU, Esbjerg
Thomas S Sørensen	AAU, Esbjerg

### Appendiks E.11 Mandag d. 27. september

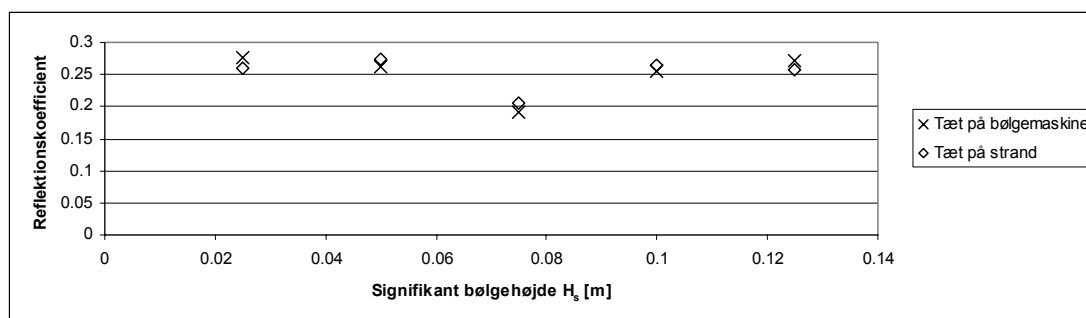
Vi tester bølgerne i bassinet igen med alle flydere løftet. Vi opnår gode bølger meget tæt på det ønskede ved benyttelse af programmet "ProfWaco" til bølgegenerering.

Variationen af bølgehøjderne gennem bassinet beskrives og vises på grafer for hver søtilstand, se følgende eksempel for  $H_s = 0.05\text{m}$  (svarende til 2 m i fuldskala)

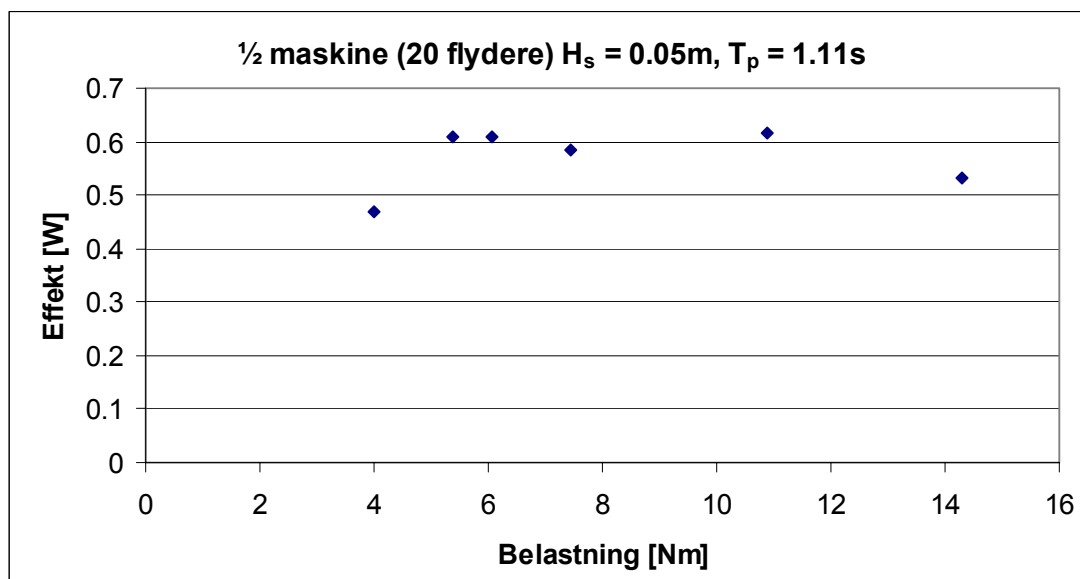


Det observeres (igen) at når belastningerne er store flytter flyderne sig ikke. Desuden ses, at når der kommer en stor bølge kan den første flyder ikke trække akslen hurtigt, hvorfor den neddykkes.

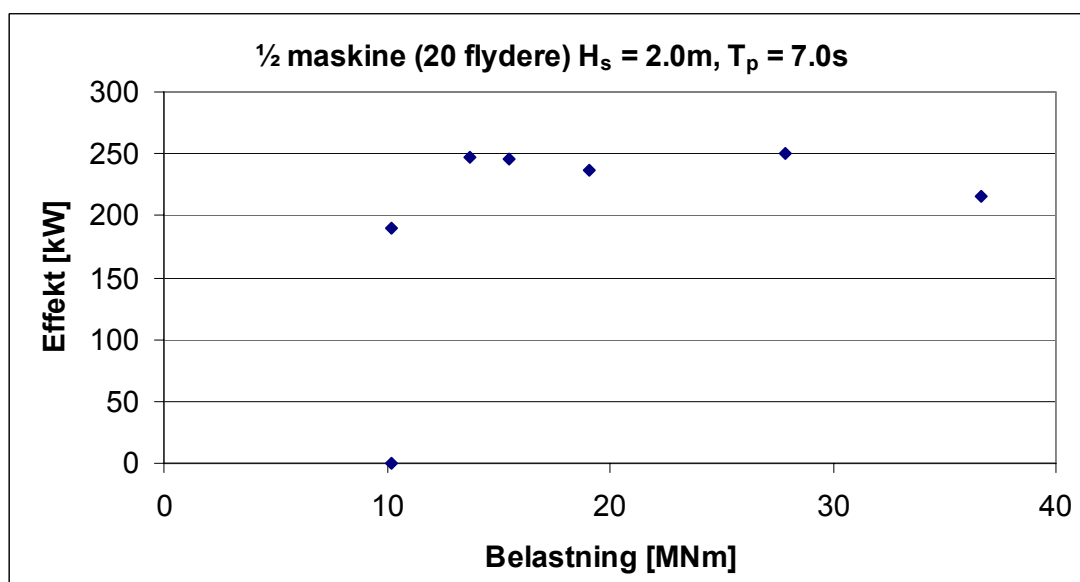
Der måles reflektionskoefficienter på cirka 25%.



Vi påfører forskellige belastninger, hvorved effektkurverne kan optegnes:



I fuldskala svarer ovenstående til:



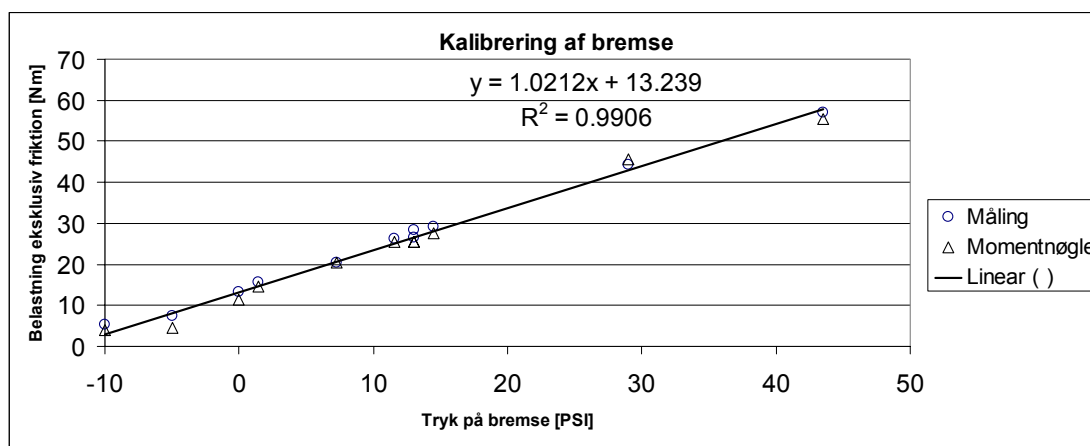
Deltagere:

Morten Kramer	AAU
Jørgen Sørensen	AAU
Keld Arpe	Wave Star Energy
Niels Arpe	Wave Star Energy
Jeppe Moesgaard	AAU, Esbjerg
Thomas S Sørensen	AAU, Esbjerg

### Appendiks E.12 Tirsdag d. 28. september

Vi bærer den forreste halvdel af maskinen ind og forbinder de to halvdele. Vi afprøver lidt bølger, og bremsen synes at fungere fint.

Vi kalibrerer bremsen med en momentnøgle ligesom tidligere. Vi foretager aflæsning på momentnøglen og vi foretager aflæsning på torsionsmåleren for forskellige indstillinger af bremsen (psi).



Friktionen i systemet måles med god præcision til 7.5 Nm.

Vi foretager målinger med regelmæssige bølger med  $H = 0.025$  m (1m fuldskala),  $H = 0.075$  m (3 m fuldskala) og  $H = 0.125$  m (5 m i fuldskala). Samtlige kombinationer med perioderne 0.89 s, 1.33 og 1.77 s. I alt 9 forsøg for hver indstilling af bremsen (ingen bremsning, 0 psi, 10 psi, 20 psi, 30 psi, 40 psi, 43.5 psi).

Vi når ikke at analysere forsøgene inden dagen er omme.

Deltagere:

Morten Kramer	AAU
Jørgen Sørensen	AAU
Keld Arpe	Wave Star Energy
Niels Arpe	Wave Star Energy
Jeppe Moesgaard	AAU, Esbjerg
Thomas S Sørensen	AAU, Esbjerg

### Appendiks E.13 Onsdag d. 29. september

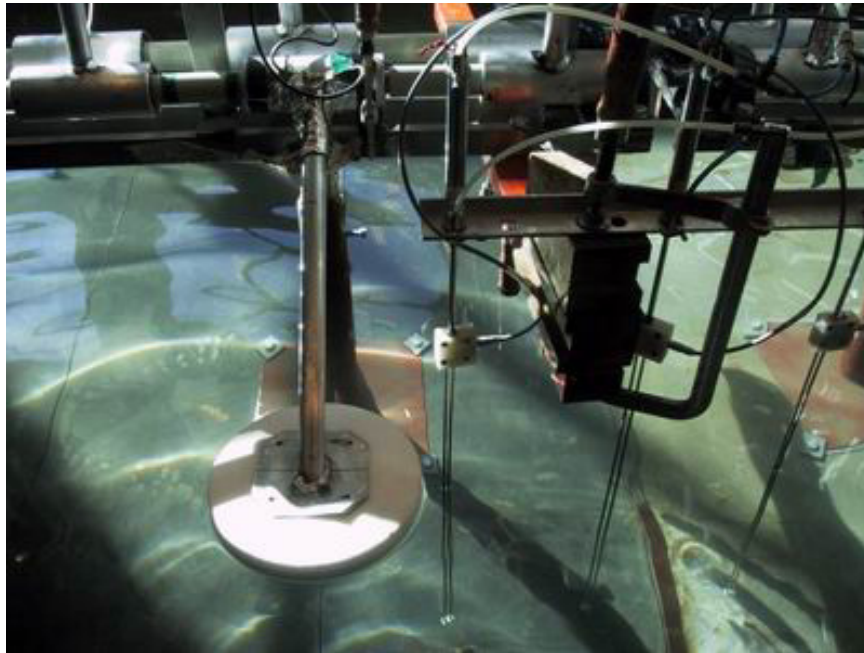
Per kommer i dag. Der er PSO-møde "hands on" kl. 10:00, hvor alle nedenfor anførte deltagere var tilstede. Vi snakker lidt Wave Star og spiser frokost på Det Hvide Hus. Vi afslutter med at se lidt bølger i laboratoriet.

Deltagere:

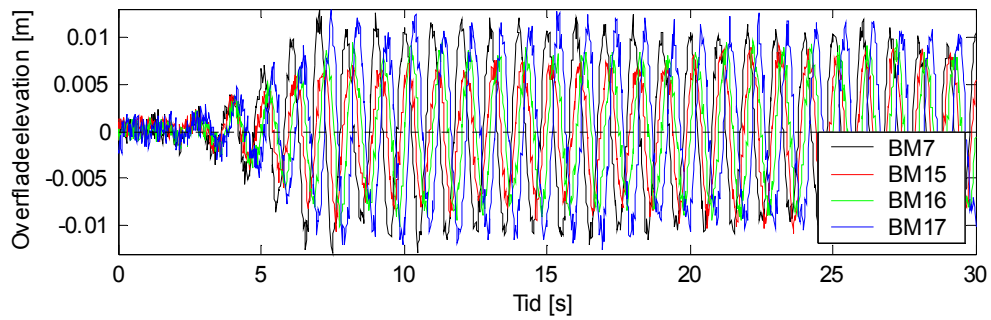
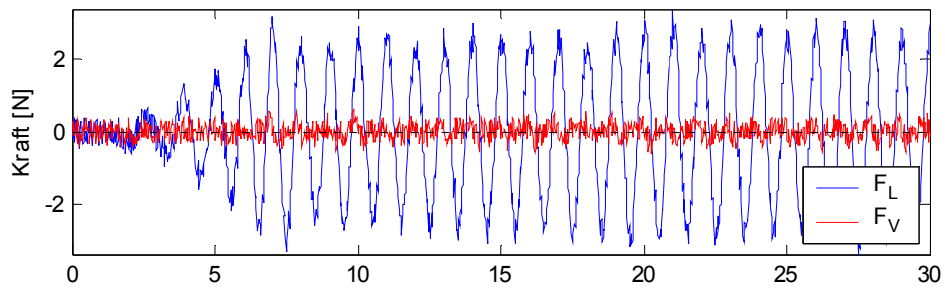
Morten Kramer	AAU
Peter Frigaard	AAU
Palle Meinert	AAU
Per Resen Steenstrup	Wave Star Energy
Niels Arpe	Wave Star Energy
Jeppe Moesgaard	AAU, Esbjerg
Thomas S Sørensen	AAU, Esbjerg
Stig Vindeløv	Formand, Bølgekraftforeningen
Henriette	Eltra
Ole	Elkraft

### Appendiks E.14 Torsdag d. 30. september

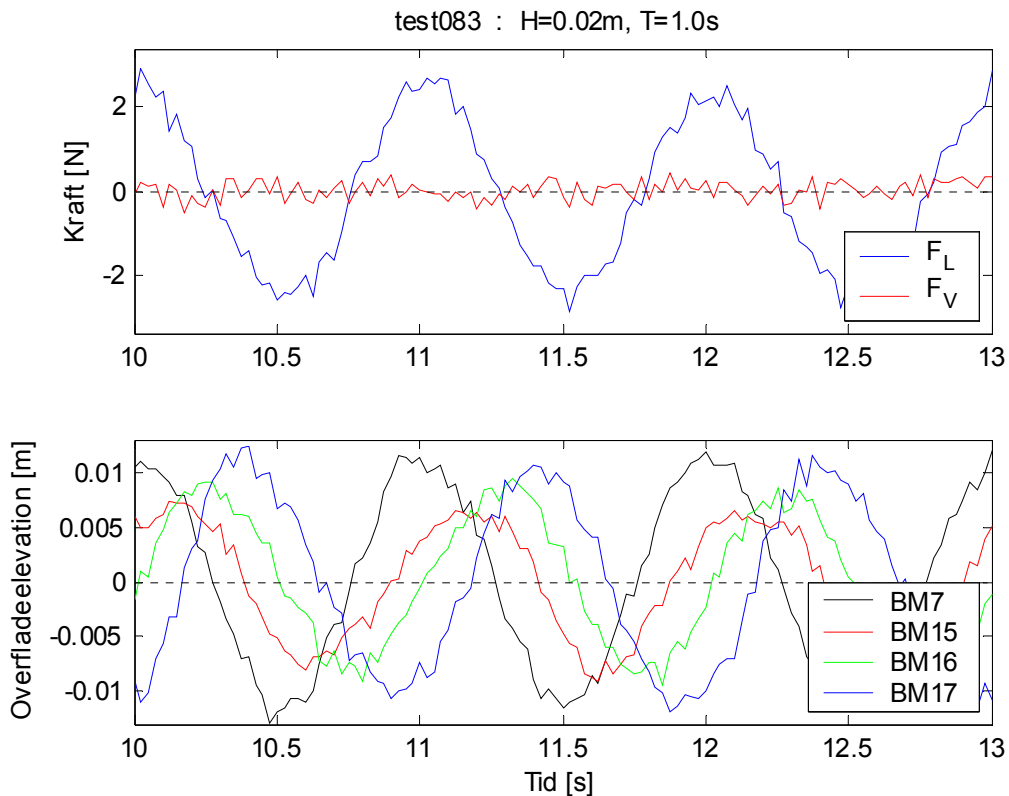
Vi sætter op til måling på én fastholdt flyder. Vi monterer en række af 3 bølgemålere (BM 15, 16 og 17) lige bag flyderen. Således kan skyggeeffekten visualiseres. Vi foretager de første målinger på flyderen.



test083 : H=0.02m, T=1.0s







Deltagere:

Morten Kramer	AAU
Jeppe Moesgaard	AAU, Esbjerg
Thomas S Sørensen	AAU, Esbjerg

### Appendiks E.15 Fredag d. 1.oktober – Fredag d. 8. oktober

Morten samler op på trådene og ordner småting. Nyt program til dataopsamling på PC'en bestilles og installeres. Frekvensomformer til tacho-måleren bestilles.

Hjemmesiden ang. modelforsøgene opdateres. Siden er nu:

[www.civil.aau.dk/~i5mkr/ws/](http://www.civil.aau.dk/~i5mkr/ws/)

Der etableres password på nogle af dokumenterne.

Morten skriver nærværende forsøgsrapport.

Deltagere:

Morten Kramer	AAU
---------------	-----