

12. juni 2012

## PSO-F&amp;U Slutrapport

<b>1. Projekttitle</b>	Optimisation of kWh production and reliability of WS unit, ForskEL part
<b>2. Projektidentifikation</b>	2009-1-10239
<b>3. Projektperiode (dato,år)</b>	1. juni 2010 til 31. marts 2012 (forlænget)
<b>4. Projektansvarlig virksomhed</b>	Wave Star A/S
<b>5. Rapporteringsperiode</b>	1. juli 2011 til 31. december 2011

**6. Den underskriftansvarliges underskrift**

Dato: 12. juni 2012

Navn: Bent Kristensen

Underskrift: .....  .....

## 7. Status for projektet (inklusive eventuelle afvigelser med og uden økonomiske ændringer)

Igennem 2011 blev der arbejdet intenst med pålidelighed, drift og optimering af processer på testanlægget i Hanstholm. Fra januar 2011 overgik driften til fuldautomatik og forsøg med 24-timers drift blev indledt. Som afslutning på projektet har testanlægget i Hanstholm har kørt 24-timers fuldautomatisk og ubemandet produktion i en tremåneders periode (feb-april 2012) med test af de sidste optimerede kontrolparametre for energioptagelse samt optimeret PTO-system. Formålet har været at holde en kontinuerlig effektivitet og driftstid.

Optimering af kontrolparametrene er videreført med avancerede modelforsøg med små skalamodeller af Wavestar i et bølgebassin på Aalborg Universitet

Det nye fuldautomatiske smøringssystem til lejer, som styres via kontrolsystemet, er nu implementeret og fungerer tilfredsstillende.

Vejeceller mellem cylinder og arme er netop blevet monteret og de første målinger er genereret og under bearbejdelse. Vejecellerne måler den præcise kraft, som bliver overført fra bølge til PTO-system, og vil medvirke til at optimere parametrene yderligere i fremtiden samt beregne de mere præcise laster til optimering af strukturen.

Der er udviklet en beregningsmodel, som med stor sikkerhed estimerer energiproduktionen ved forskellige geografiske placeringer og i forhold til maskinkonfiguration (geometrisk udformning, flyderstørrelse og flyderantal). Systemet bygger på en model, som er verificeret gennem afprøvninger på testanlægget i Hanstholm. Ved at kende et specifikt områdes bølgeklime ved hjælp af scatter-diagrammer, kan der præcist beregnes produktionsomkostninger, energiproduktion og dermed cost of energy.

Odense Maritime Technology (OMT) har i perioden leveret de første prisestimeringer på strukturen, som viser en mulig omkostningsreduktion i størrelsesordenen 10-15% i forhold til de oprindelig beregninger. På baggrund af de opnåede optimeringer af driftstid og effektivitet samt cost-optimeringer kan der nu præsenteres en estimeret udvikling af cost of energy, som inden for 10 år nærmer sig det nuværende niveau for havvindmøller.

## 8. Opnåede resultater

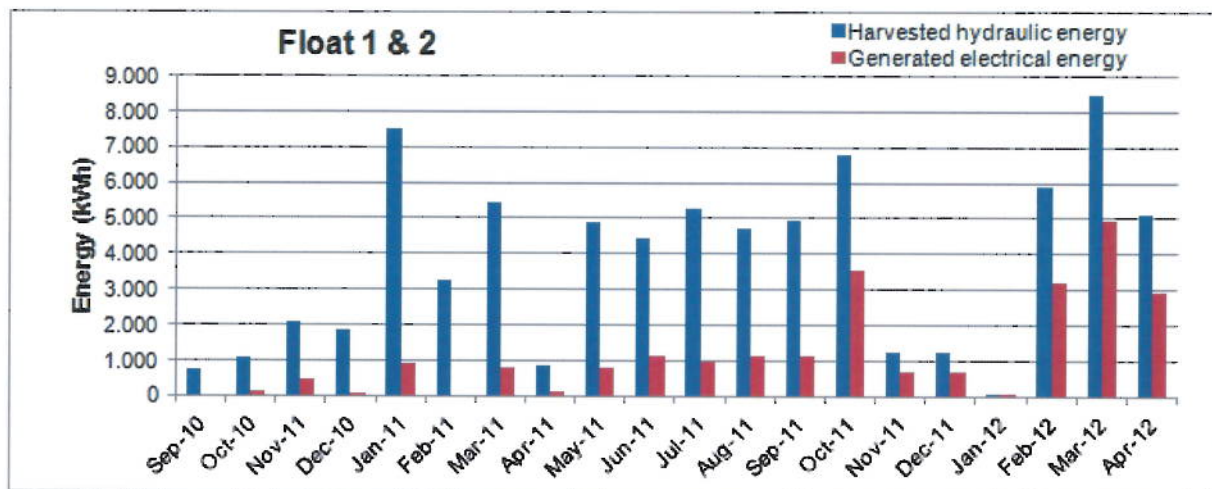
Den gennemsnitlige driftstid har i de tre måneder (feb-april 2012) været på 96%. Effektiviteten i PTO-systemet har på begge flydere været mellem 54-58% i perioden, og har nu vist sig mere konstant.

Float 1 & 2									
Month	Operational time (of total time) [%]	Production (of operational time) [%]	Storm (of operational time) [%]	Calm sea (of operational time) [%]	Transitions [%]	Harvested hydraulic energy [kWh]	Generated electrical energy [kWh]	PTO efficiency [%]	Max generated electrical power [kW]
Sep-10	9,8	54,1	9,9	0,0	35,9	739	-69	-9,4	23,6
Oct-10	7,6	88,8	1,5	0,0	10,2	1.064	149	14,0	22,9
Nov-11	14,4	73,7	6,1	7,3	13,0	2.101	460	21,9	24,7
Dec-10	28,1	73,3	5,2	14,7	6,7	1.880	43	2,3	23,4
Jan-11	81,7	80,6	0,0	18,3	1,1	7.521	918	12,2	23,1
Feb-11	66,1	59,6	21,5	15,3	3,5	3.265	-104	-3,2	25,0
Mar-11	64,1	61,7	3,9	32,4	2,0	5.469	790	14,4	23,4
Apr-11	23,1	47,7	14,3	32,0	5,9	830	105	12,7	25,9
May-11	90,7	55,6	2,5	38,8	3,2	4.859	827	17,0	25,8
Jun-11	92,3	44,8	3,2	49,8	2,2	4.420	1.111	25,1	23,2
Jul-11	90,3	71,7	0,8	24,7	2,7	5.278	992	18,8	21,5
Aug-11	93,4	61,0	6,4	31,2	1,4	4.721	1.128	23,9	28,1
Sep-11	78,6	63,3	11,3	23,7	1,7	4.941	1.127	22,8	25,3
Oct-11	68,6	70,5	3,7	24,1	1,7	6.790	3.524	51,9	29,0
Nov-11	46,3	36,2	11,8	50,2	1,7	1.256	666	53,0	15,9
Dec-11	16,7	73,4	12,7	0,1	13,8	1.272	715	56,2	16,3
Jan-12	1,5	77,0	0,0	0,0	23,0	62	24	39,4	4,5
Feb-12	98,4	66,4	9,3	22,3	2,0	5.915	3.210	54,3	32,8
Mar-12	96,5	79,1	1,0	19,1	0,8	8.465	4.920	58,1	35,7
Apr-12	93,2	62,3	0,2	35,0	2,5	5.131	2.901	56,5	30,0

Der er på de 3 måneder genereret mere strøm på anlægget end nogensinde før.

I de 7 måneder i perioden 1. juni 2010 til 31. december 2011 blev der produceret i alt ca. 12.000 kWh på testanlægget. På de 3 måneder fra 1. februar til 30. april 2012 blev der produceret 11.031 kWh, hvilket svarer til mere end en fordobling af produktionen.

Produktionstiden er gået fra 70,5% i oktober 2011 til 96% i den sidste periode.



Dette er en milepæl i projektet, men arbejdet med optimering fortsættes, bl.a. med udviklingen af det nye hydrauliske PTO-system sammen med Aalborg Universitet. Testbænken er fortsat under konstruktion og de første resultater forventes at foreligge i august 2012. Der arbejdes også på andre alternative løsninger til PTO, herunder en magnetskrue, en digital pumpe samt PolyPower folie.

Anlægget i Hanstholm har vist en stor driftssikkerhed og bevist, at der kan produceres energi på et fornuftigt niveau sammenlignet med stedets forhold. Med de opnåede optimeringer på både effektivitet og driftssikkerhed, er det realistisk at forvente en årlig produktion ved Horns Rev 2 på 1,4 GWh på en fuldskalamaskine med 20 stk. flydere på 6 meter i diameter.

Desuden har anlægget påvist, at PTO-systemet skal optimeres yderligere, og der arbejdes p.t. sammen med AAU på konkrete løsninger til at øge produktiviteten. Erfaringerne fra anlægget omkring kontrolstrategi har vist sig at danne grundlag for videre forskning ved AAU, som giver yderligere muligheder for optimering af energioptagelsen.

## 9. Teknisk redegørelse

De første erfaringer med bølgeenergi var baseret på en testopstilling med en flyderdiameter på 0,25 meter i perioden 2004-2005 på Aalborg Universitet. Hovedformålet var at undersøge konceptets validitet i kendte bølgeforhold.

Herefter blev der arbejdet med en større model med en flyderdiameter på 1 meter i Nissum Bredning i perioden 2006-2010. Det var vigtigt at få praktisk viden om især pålidelighed, når anlægget blev udsat for varierende bølge- og vejrforhold (storm, frost, sne, osv.).

Baseret på de erfaringer blev testanlægget i Hanstholm installeret med en flyderdiameter på 5 meter. Fokus med dette testanlæg var optimering af energiproduktion og videreudvikling af PTO-systemet.

To principper har været gældende for forløbet af konceptets udvikling: gradvis opskalering af forsøgsmodeller og løbende dokumentation og sammenholdelse af empiri og teori. Dette har skabt et solidt fundament for projektets succes og for det videre arbejde.

Efter installationen af testanlægget i Hanstholm viste indledende forsøg, at anlægget fungerede tilfredsstillende, og at der kunne høstes energi som forventet [bilag 1]. En simpel kontrolstrategi baseret på tidligere erfaringer blev implementeret, hvor cylinderens kraft modsætter sig flyderens bevægelse.

Herefter blev der udviklet en mere detaljeret matematisk model af anlægget i samarbejde med Aalborg Universitet. En strategi, hvor kraften af cylinderen indeholder en reaktiv komponent, blev simuleret og testet på anlægget [bilag 2]. Et mere overordnet billede af anlæggets ydeevne gives her [bilag 3].

En af de vigtigste parametre i et bølgeanlæg er cost of energy, dvs. prisen for den leverede energi til el-nettet. Denne parameter kan optimeres til dels ved at øge virkningsgraden af Power Take-Off (PTO) systemet og til dels ved at optimere kontrolstrategien. Ved at inkludere virkningsgraden af undersystemerne i den matematiske model af PTO'en, kan kontrolstrategien optimeres yderligere [bilag 4].

I [bilag 5] blev virkningsgraden af PTO-systemet behandlet baseret på en matematisk model fra bølge til el-net af det hydrauliske PTO-koncept i Roshage. Her blev det konkluderet, at effektiviteten af en fuld optimeret version af dette PTO-koncept aldrig vil overstige 60% i snit [bilag 6]. Derfor er et nyt hydraulisk PTO-system under udvikling. Hovedkonceptet består i at anvende digital cylinder-areal-variation til styring af cylinderkraften i stedet for at variere trykket som i dag. Herved undgås de ineffektive variable hydraulikmotorer, der indgår i trykstyringen. I stedet kan alle de hydrauliske cylindere på Wavestar's flydere levere olie til en fælles tryklinje. Denne tryklinje er udstyret med få centrale hydraulikmotorer med generatorer, som opererer ved en nær konstant belastning. Dette opnås ved at udføre udglatning af energien fra bølgerne vha. gas-akkumulatorer, samt at alle flydere forsyner samme hydraulikmotorer, som driver generatorerne [bilag 6, bilag 7].

For at sikre en forsat optimering af konceptet, blev der lavet en ny opstilling på Aalborg Universitet, med en flyderdiameter på 0.25 meter, som giver mulighed for at undersøge et mere komplekst sammenspil mellem bølger og flydere end det tidligere har været muligt med den oprindelige testopstilling fra 2004-2005. Der kan genereres på forhånd bestemte bølgesekvenser, hvor tre flydere kan styres individuelt. Arbejdet centreret om denne opstilling [bilag 8] vil være med til at give bedre kendskab og præcise hydrodynamiske modeller af flyderne. Det er vigtig viden, som

kan udnyttes til at videreudvikle PTO-systemet og kontrolstrategien for en optimal konvertering af bølgeenergi til elektricitet.

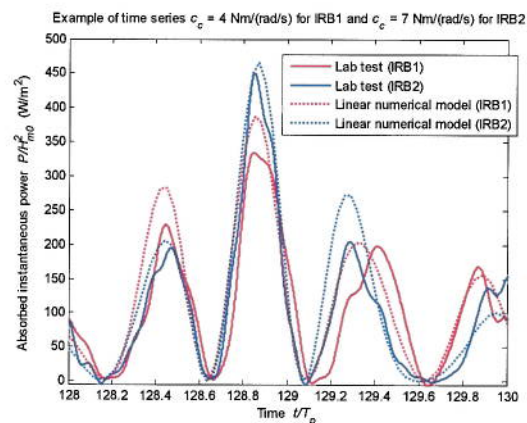
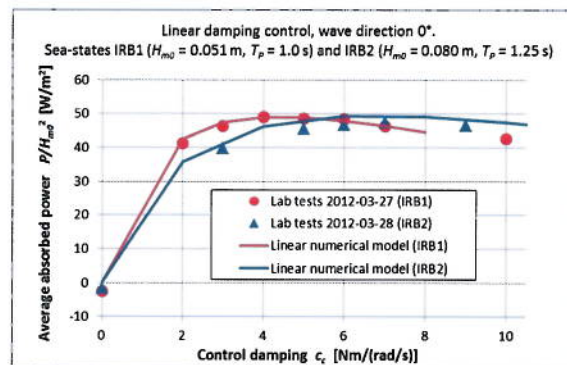
### **Bilag**

- 1) *First Power Production figures from the Wave Star Roshage Wave Energy Converter - L. Marquis et al.*
- 2) *Modelling and Control of the Wavestar Prototype - R. H. Hansen et al.*
- 3) *Performance Evaluation of the Wavestar Prototype - M. M. Kramer et al.*
- 4) *Control Performance Assessment and Design of Optimal Reactive Control to Harvest Ocean Energy - E. Vidal et al.*
- 5) *Model based design of efficient power take-off systems for wave energy converters - R. H. Hansen et al.*
- 6) *PTO Concept with four pressure lines - R. H. Hansen*
- 7) *Analysis of Discrete Pressure Level Systems for Wave Energy Converters - R. H. Hansen et al.*
- 8) *Experimental Validation of Numerical Models for Wave Energy Absorbers - M. Kramer et al.*

## 9.2. Laboratoriearbejde med kontrolstrategier

I januar og marts 2012 blev der gennemført avancerede modelforsøg med små skalamodeller af Wavestar i et bølgebassin på Aalborg Universitet (skala 1:20). Hovedformålene var at undersøge begrænsninger i gyldighedsområder for lineære numeriske hydrodynamiske modeller, og at validere eller kalibrere mere avancerede ikke-lineære modeller. Undersøgelserne blev udført for varierende bølgeforhold og under anvendelse af forskellige kontrolstrategier. Målingerne på ydelsen viser god overensstemmelse med en traditionel lineær numerisk model for små og moderate bølger, hvorimod den lineære numeriske model overvurderer ydelsen i høje bølger. Resultaterne fra de nye forsøg og videreudvikling af ikke-lineære numeriske modeller vil muliggøre mere korrekt estimering af ydelsen i høje bølger. Herved vil ydelsen fra Wavestar-anlægget kunne øges i høje bølger.

Et billede fra forsøgene og eksempler på målingerne er vist nedenfor, og for nærmere beskrivelse af resultater henvises til de to bilag angivet sidst i kapitlet, hvilke indeholder en del resultater som allerede er blevet offentliggjort gennem et symposium i forskningsprojektet SDWED afholdt den 26. April 2012 på DTU.



De tre vigtigste fremskridt med laboratoriearbejdet siden december 2011 er:

1. Set-up'et er forbedret betydeligt, således målinger nu er af langt bedre kvalitet (forbedringer i fysisk set-up, kontrolregulering, Simulink modelstruktur, signalbehandlinger). Der er nu næsten perfekt overensstemmelse mellem ønsket opnået kraft og den faktiske målte kraft, og reguleringen udføres med væsentlig højere præcision end tidligere.
2. Der blev identificeret et stort problem med de tidligere bølgemålinger, som under visse omstændigheder førte til stor undervurdering i højde og stejlehed af de målte bølgetoppe (undervurderinger på op til 40%). Årsagen til problemet blev fundet, og en ny bølge sensor blev designet, bygget og installeret. Bølgemålinger fra bassinet er nu pålidelige og af god kvalitet.
3. Et accelerometer blev installeret på modellen, og tilsluttet det online styresystem. Signalet er af tilstrækkelig kvalitet til at udføre online-kontrol. Kontrol bliver nu gennemført ved hjælp af: Position (lasermålinger), hastighed (online differentiering af laserens positionssignal), acceleration (accelerometer målinger).

#### **Bilag**

- 9) *Experimental Validation of Numerical Models for Wave Energy Absorbers. Morten Kramer, Francesco Ferri, Andrew Zurkinder, Enrique Vidal, Jens P. Kofoed. In "Book of extended abstracts" for "2nd SDWED Symposium: Advances in Modeling of Wave Energy Devices". ISSN 1901-726X DCE Technical Report No. 144. Kan downloades via <http://www.sdwed.civil.aau.dk/Events/Event//2nd-sdwed-symposium--advances-in-modeling-of-wave-energy-devices.cid59775>*
- 10) *Experimental Validation of Numerical Models for Wave Energy Absorbers. Morten Kramer, Francesco Ferri, Andrew Zurkinder, Enrique Vidal, Jens P. Kofoed. Presentation 4.4 at "2nd SDWED Symposium: Advances in Modeling of Wave Energy Devices". Kan downloades via <http://www.sdwed.civil.aau.dk/Events/Event//2nd-sdwed-symposium--advances-in-modeling-of-wave-energy-devices.cid59775>*

### 10. Opgørelse af el-produktion

Fra idriftsættelsen til og med projektets afslutning i marts 2012 er den genererede elektriske effekt i alt 23.458 kWh. I tabellen nedenfor fremgår el-produktionen pr. måned, og viser en klar stigning som følge af de gennemførte optimeringer.

Måned	Genereret elektrisk effekt i kWh
July 2010	0
August 2010	21
September 2010	-69
October 2010	149
November 2010	460
December 2010	43
January 2011	918
February 2011	-104
March 2011	790
April 2011	105
May 2011	827
June 2011	1111
July 2011	992
August 2011	1128
September 2011	1127
October 2011	3524
November 2011	666
December 2011	715
January 2012	24
February 2012	3210
March 2012	4920
April 2012	2901