

Experimenteel onderzoek naar  
point-absorberkarakteristieken met als doel:  
optimalisatie van de energie-absorptie

Kim De Beule

Promotoren: prof. dr. ir. Marc Vantorre, prof. dr. ir. Julien De Rouck  
Begeleider: Griet De Backer

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van  
Burgerlijk bouwkundig ingenieur

Vakgroep Mechanische constructie en productie  
Voorzitter: prof. dr. ir. Joris Degrieck

Vakgroep Civiele techniek  
Voorzitter: prof. dr. ir. Julien De Rouck

Faculteit Ingenieurswetenschappen  
Academiejaar 2007-2008





Experimenteel onderzoek naar  
point-absorberkarakteristieken met als doel:  
optimalisatie van de energie-absorptie

Kim De Beule

Promotoren: prof. dr. ir. Marc Vantorre, prof. dr. ir. Julien De Rouck  
Begeleider: Griet De Backer

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van  
Burgerlijk bouwkundig ingenieur

Vakgroep Mechanische constructie en productie  
Voorzitter: prof. dr. ir. Joris Degrieck

Vakgroep Civiele techniek  
Voorzitter: prof. dr. ir. Julien De Rouck

Faculteit Ingenieurswetenschappen  
Academiejaar 2007-2008



# Voorwoord

*Golfenergie is een vorm van hernieuwbare energie die de dag van vandaag steeds meer aan belangstelling wint. Men begint door de hoge brandstofprijzen overtuigd te geraken dat hernieuwbare energie niet iets is wat enkel voor de 'groenen' bestemd is, maar dat het ook een noodzakelijk kwaad is om te blijven voldoen aan de stijgende energiebehoeftes. Over zonne- en windenergie zijn al veel studies gebeurd, het zijn technologieën die wijdverspreid zijn. Golfenergie is onbekender, de ontwikkeling ervan staat ook nog niet zo ver. De vele recente theoretische, numerieke en experimentele studies uitgevoerd op schaalmodellen tonen aan dat deze tak sterk in ontwikkeling is. Ik ben dan ook zeer blij dat ik met dit afstudeerwerk een bijdrage kan leveren aan dit onderzoek.*

*Zonder hulp was dit werk niet tot stand gekomen. In de eerste plaats moet ik mijn begeleidster Griet bedanken. Naast het beantwoorden van mijn vele vragen, heeft ze me ook geholpen en gesteund bij de experimentele proeven, waarvoor mijn dank. Tevens wens ik mijn promotoren te bedanken voor hun hulp bij de moeilijke problemen en voor hun vertrouwen in mij.*

*Daarnaast ben ik ook een zeer grote dank verschuldigd aan het technisch personeel van het AWW. Zonder de hulp en praktische kennis van Herman, Tom, Sam en Dave was de proefopstelling nooit geworden tot wat ze nu is. Ook ben ik Frans van het Waterbouwkundig Laboratorium in Borgerhout veel dank verschuldigd om mij steeds direct te willen helpen bij eender wat probleem. Tot slot bedank ik ook Tri voor het uitvoeren van proeven en voor de numerieke berekeningen.*

*Voor hun steun en de kansen die ze me gegeven hebben door me te laten studeren, mijn ouders. Dank u wel.*

*Niet in het minste, verdient mijn vriendin Annemieke een woord van dank. Voor het nalezen, voor de steun, voor het vertrouwen, omdat je er steeds voor me bent, voor alles!*

*Kim De Beule, juni 2008*



# Toelating tot bruikleen

“De auteur geeft de toelating deze scriptie voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de scriptie te kopiëren voor persoonlijk gebruik.

Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze scriptie.”

Kim De Beule, juni 2008

# **Experimenteel onderzoek naar point-absorber karakteristieken met als doel: optimalisatie van de energie-absorptie**

door

Kim DE BEULE

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van  
Burgerlijk bouwkundig ingenieur

Academiejaar 2007-2008

Promotoren: prof. dr. ir. M. VANTORRE, prof. dr. ir. J. DE ROUCK

Begeleider: ir. G. DE BACKER

Faculteit Ingenieurswetenschappen

Universiteit Gent

Vakgroep Mechanische constructie en productie

Voorzitter: prof. dr. ir. J. DEGRIECK

Vakgroep Civiele techniek

Voorzitter: prof. dr. ir. J. DE ROUCK

## **Samenvatting**

In dit werk wordt gepoogd om via een experimentele studie optimale point absorber karakteristieken te vinden die leiden tot een maximale energie-absorptie. Daartoe wordt eerst een literatuurstudie gedaan die meer inzicht in de werking van point absorbers verschaft. Vervolgens wordt een nieuwe opstelling gebouwd, gebaseerd op een oudere proefopstelling. Daarnaast wordt een proeventabel opgesteld. De resultaten van de proeven worden geanalyseerd en vergeleken met numerieke resultaten. Hieruit kunnen conclusies getrokken worden over de energie-absorptie.

## **Trefwoorden**

Point absorber, dompbeweging, optimalisatie energie-absorptie

# Experimental research on point absorber characteristics leading to optimal energy absorption

Kim De Beule

Supervisor(s): Marc Vantorre, Julien De Rouck, Griet De Backer

**Abstract**—This article summarizes the results of experimental research on a linear damped point absorber in heave. Optimal values of buoy shape, buoy draft, supplementary mass and damping force are determined. The results are compared with numerical data.

**Keywords**—Point absorber, heave, optimization power absorption

## I. INTRODUCTION

THE oil crisis in the seventies was a stimulant for scientific investigation and development of exploitation of renewable energy resources. For solar and wind energy, this research has lead to the installation of many energy converters all over the world. Due to the growing energy demand, further research and development of wave energy converters is carried out at several public and private instances.

This research is a part of the SEEWEC project on a resonant heaving point absorber. Point absorbers are wave energy converters with small horizontal dimensions compared to the wave length. Energy is captured from the relative motion of a buoy in respect to a platform or an anchor. The principle is that the converters move in resonance with the incoming wave frequencies. A generator that damps the vertical motion of the buoy is used to convert the hydraulic power into electrical power.

This paper investigates by means of an experimental study the effect of several parameters on the wave power absorption. The parameters are the buoy shape and buoy draft, the supplementary mass and the damping force. Supplementary mass is used to change the buoy's natural frequency  $\omega_n$ . The damping force ( $b_{ext}$ ) simulates the generator. Experimental results are compared with numerical data.

## II. GENERAL CONSIDERATIONS

The working principle is sketched in figure 1 [1]. Wave exciting forces cause the buoy to oscillate in the heave motion. A supplementary mass is used to tune the natural frequency of the system to the optimal frequency in respect to the wave frequency. An external damping force simulates a generator.

In a linear approach with an incompressible irrotational fluid, the governing differential equation of the system described is given by:

$$(m + m_a + m_{sup}) \cdot \ddot{z}(t) + (b + b_{ext}) \cdot \dot{z}(t) + c \cdot z(t) = F(t) \quad (1)$$

with  $m_a$  the added mass,  $m_{sup}$  the supplementary mass,  $b$  the hydrodynamic damping coefficient,  $b_{ext}$  the external damping coefficient,  $c$  the hydrostatic restoring force and  $F(t)$  the wave exciting force. All the parameters, except for the controlled parameters  $m_{sup}$  and  $b_{ext}$ , depend on the shape and draft of the buoy and are frequency dependant.

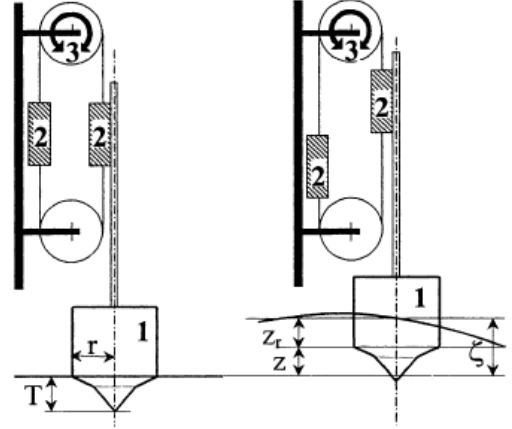


Fig. 1. Point absorber. 1 = buoy, 2 = supplementary mass ( $m_{sup}$ ), 3 = external damping ( $b_{ext}$ )

Solving the above equation gives the response  $z(t)$  of the buoy on the incoming wave. The absorbed power is found by  $P_{abs} = b_{ext} \dot{z}(t)$ . The absorbed power is often expressed as the wave power over a crest with length  $\lambda_{cap}$ , the so called *absorption length* or *capture length*. In a regular wave with frequency  $\omega$  and wave length  $\lambda$ , the capture length is [2]:

$$\lambda_{cap} = \frac{2\lambda}{\pi} \frac{b(\omega)b_{ext}\omega^2}{[c - (m + m_a + m_{sup})\omega^2]^2 + [b(\omega) + b_{ext}]^2\omega^2} \quad (2)$$

In a regular wave, theoretical maximum energy absorption is achieved when the two conditions below are fulfilled:

$$b_{ext} = b(\omega) \quad (3a)$$

$$c - (m + m_a + m_{sup})\omega^2 = 0 \quad (3b)$$

That is: the external damping coefficient equals the hydrodynamic damping coefficient and the system is in resonance with the wave frequency.

A common used manner to describe the absorbed power is by comparing it to the wave power over a crest length of the buoy diameter. That is called the efficiency:  $\eta = P_{abs}/P_{wave} = \lambda_{cap}/2r$ .

## III. EXPERIMENTAL RESEARCH

Experimental research has been carried out in Flanders Hydraulics laboratory. The test facilities consisted of a wave flume with a length of 70 m and a width of 4 m. The water level was 1 m. Tests are taken for regular and irregular waves for two different buoy shapes, as in figure 2.

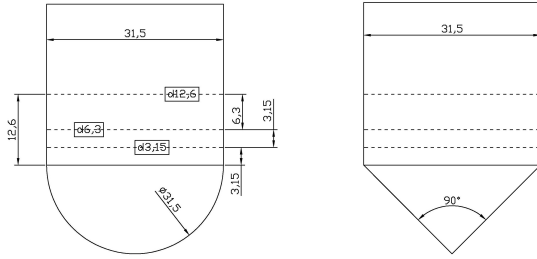


Fig. 2. Different buoy shapes that are used. Left = hemisphere, right = cone

### A. Regular waves

In figure 3 a summary of the results of several power absorption tests is plotted. It seems that the closer  $\omega/\omega_n$  approaches 1, the higher the absorbed power is. Another conclusion is that the efficiency is not very much affected by the damping force if  $b_{ext}/b > 3$ . For lower values, the efficiency is affected in a rather drastic manner.

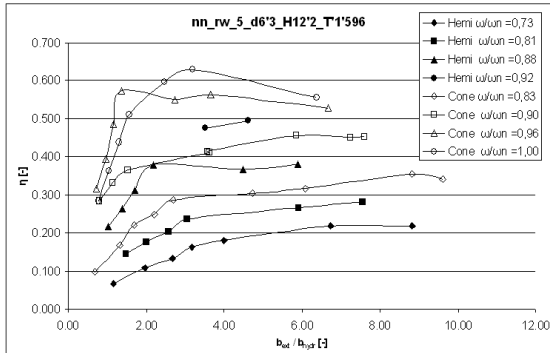


Fig. 3. Efficiency versus (dimensionless) damping force. Regular wave  $H = 10,2$  cm,  $T = 1,597$  s. Draft =  $0,221$  m

### B. Irregular waves

In irregular waves, tests are conducted with 2 different waves, characterized by their (JONSWAP)spectrum. The first wave has a significant wave height of  $7,3$  cm and peak period of  $1,463$  s, corresponding on full scale with a wave of  $H_s = 1,16$  m and  $T_p = 5,83$  s. The second wave has the following characteristics (model scale):  $H_s = 10,7$  cm and  $T_p = 1,707$  s, corresponding on full scale with  $H_s = 1,70$  m and  $T_p = 6,80$  s.

Figure 4 shows the results of absorption test on the conical buoy on full scale. A similar result can be obtained for the hemisphere. The figure shows an optimal power absorption when the damping force is  $12$  kN and when the natural frequency of the system reaches  $95\%$  of the peak wave frequency. The absorbed power is then  $9,4$  kW.

## IV. COMPARISON WITH NUMERICAL DATA

### A. Regular waves

For the case of regular waves, equation (2) can be solved analytically. It is found that for low values of the damping force  $b_{ext}/b < 3$ , the numerical results are in average  $15\%$  higher

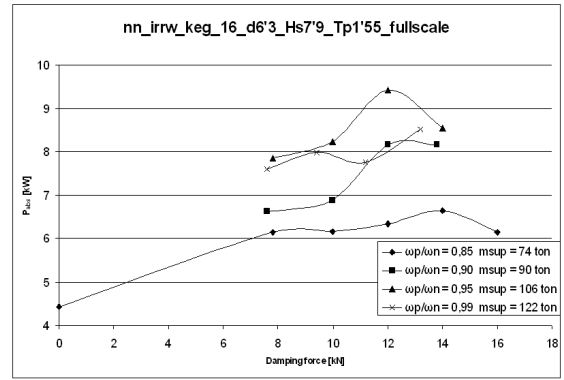


Fig. 4. Absorbed power versus damping force. Irregular wave  $H_s = 1,16$  m,  $T_p = 5,83$  s. Draft =  $3,5$  m. Full scale

than the experimental results. For higher values of the damping force, the difference becomes greater, up to  $40\%$ . Another conclusion is that the numerical data is not correct for frequencies close to the resonance frequencies. Then non-linear effects will have an important influence.

### B. Irregular waves

In case of irregular waves, the solution of (2) has to be found numerically. When compared with the experimental data it is found that the numerical results are about  $18\%$  higher and this difference is constant. The reason of this difference will be due to the uncertainty of some parameters, such as the internal friction.

## V. CONCLUSION

Tests are performed to get optimal point absorber characteristics for wave power absorption. For regular waves, the natural frequency of the point absorber should resonate with the wave frequency. In irregular waves, the natural frequency should be  $95\%$  of the peak frequency. Optimal absorption is found when the damping force is about 3 to 4 times greater than the hydrodynamic damping force.

Comparison with simplified numerical data leads to very good results. The data shows the same tendencies as found in the experimental results.

## VI. AKNOWLEDGEMENTS

The author wishes to thank the supervisors for the help with all theoretical and practical problems. The author also thanks the technical personnel of the AWW and Flanders Hydraulics for their assistance when needed.

## REFERENCES

- [1] M. Vantorre, R. Banasiak, and R. Verhoeven, "Modelling of hydraulic performance and wave energy extraction by a point absorber in heave," *Applied Ocean Research*, vol. 26, pp. 61–72, 2004.
- [2] D.V. Evans, "A theory for wave power absorption by oscillating bodies," in *11th symposium on naval hydrodynamics*, London, 1976, vol. 5, pp. 15–27.

# Inhoudsopgave

Voorwoord	iv
Toelating tot bruikleen	v
Overzicht	vi
Extended abstract	vii
Inhoudsopgave	ix
Gebruikte afkortingen	xii
<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
<b>2 Golfenergie</b>	<b>3</b>
2.1 Inleiding . . . . .	3
2.2 Regelmatige golven . . . . .	4
2.2.1 Lineaire golftheorie . . . . .	4
2.2.2 Golfenergie . . . . .	5
2.2.3 Golfvermogen . . . . .	5
2.3 Onregelmatige golven . . . . .	6
2.3.1 Tijdsdomein . . . . .	6
2.3.2 Frequentiedomein . . . . .	7
<b>3 Golfenergieconvertoren</b>	<b>10</b>
3.1 Shoreline systemen . . . . .	11
3.2 Near shore systemen . . . . .	12
3.3 Offshore systemen . . . . .	13

<b>4</b>	<b>FO<sup>3</sup></b>	<b>16</b>
4.1	Beschrijving . . . . .	16
4.2	Modellering . . . . .	17
4.2.1	Formulering mathematisch model . . . . .	17
4.2.2	Specifieke eigenschappen . . . . .	22
4.2.3	Massa-veer-demper systeem . . . . .	22
4.2.4	Absorptie van energie . . . . .	26
4.2.5	Point absorber effect . . . . .	27
4.2.6	Geabsorbeerd vermogen . . . . .	28
4.3	Optimalisatie van de energieabsorptie . . . . .	29
4.3.1	Tuning . . . . .	29
4.3.2	Latching . . . . .	31
4.3.3	Freewheeling . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Proefopstelling</b>	<b>35</b>
5.1	Proefopstelling . . . . .	35
5.1.1	Schaalmodel . . . . .	35
5.1.2	Oude proefopstelling . . . . .	35
5.1.3	Nieuwe proefopstelling . . . . .	36
5.2	Eigenschappen nieuwe opstelling . . . . .	46
5.2.1	Toegevoegde massa en dempingsfactor . . . . .	47
5.2.2	Inwendige wrijving . . . . .	50
5.2.3	Dempingskracht . . . . .	52
5.2.4	Excitatiekracht . . . . .	52
5.3	Golfgoot . . . . .	55
<b>6</b>	<b>Optimale pointabsorber karakteristieken: experimentele bepaling</b>	<b>62</b>
6.1	Parameters . . . . .	62
6.1.1	Diepgang . . . . .	62
6.1.2	Supplementaire massa . . . . .	63
6.1.3	Externe demping . . . . .	65
6.2	Proeventabel . . . . .	66
6.2.1	Selectie golven . . . . .	66
6.2.2	Selectie parameters . . . . .	67
6.3	Regelmatige golven . . . . .	68

6.3.1	Beschrijving proef . . . . .	68
6.3.2	Berekeningswijze geabsorbeerd vermogen . . . . .	68
6.3.3	Resultaten . . . . .	73
	Bolvormige vlotter . . . . .	73
	Kegelvormige vlotter . . . . .	78
	Vergelijking bol en kegel . . . . .	84
6.4	Onregelmatige golven . . . . .	86
6.4.1	Beschrijving proef . . . . .	86
6.4.2	Berekeningswijze geabsorbeerd vermogen . . . . .	87
6.4.3	Resultaten . . . . .	89
6.4.4	Bolvormige vlotter . . . . .	90
6.4.5	Kegelvormige vlotter . . . . .	92
6.5	Voorlopige besluiten . . . . .	96
<b>7</b>	<b>Vergelijking met numerieke resultaten</b>	<b>99</b>
7.1	Regelmatige golven . . . . .	99
	7.1.1 Bolvormige vlotter . . . . .	100
	7.1.2 Kegelvormige vlotter . . . . .	102
7.2	Onregelmatige golven . . . . .	104
<b>8</b>	<b>Conclusies</b>	<b>112</b>
<b>A</b>	<b>Koppelmeter</b>	<b>114</b>
<b>B</b>	<b>Reflectieanalyse</b>	<b>119</b>
<b>C</b>	<b>Numerieke gegevens uit Wamit</b>	<b>121</b>
<b>D</b>	<b>Proeventabel</b>	<b>123</b>
	<b>Bibliografie</b>	<b>129</b>
	<b>Lijst van figuren</b>	<b>132</b>
	<b>Lijst van tabellen</b>	<b>137</b>

# Gebruikte afkortingen

AWW	Afdeling Weg- en Waterbouwkunde, Universiteit Gent
$b$ of $b_{hydr}$	Hydrodynamische dempingscoëfficiënt [kg/s]
$b_{ext}$	Externe dempingscoëfficiënt [kg/s]
bol	Bolvormige vlotter
$c$	Hydrostatische herstelkrachtcoëfficiënt [N/m]
d3,15	Diepgang cilindrisch gedeelte vlotter van 0,0315 m, totale diepgang 0,189 m
d6,3	Diepgang cilindrisch gedeelte vlotter van 0,063 m, totale diepgang 0,221 m
d12,6	Diepgang cilindrisch gedeelte vlotter van 0,126 m, totale diepgang 0,284 m
dnc	Damping weight Not Connected
dx	Dempingsgewicht van x kg
$F(t)$	Excitatiekracht [N]
$g$	Valversnelling [9,81 m/s <sup>2</sup> ]
H	Golfhoogte [m]
Hs	Significante golfhoogte (gemiddelde 1/3 grootste golven) [m]
irrw	Irregular Wave
keg	Kegelvormige vlotter
$m$	Massa vlotter [kg]
$m_a$	Toegevoegde massa [kg]
$m_{sup}$	Supplementaire massa [kg]
$M_{se y}$	Extra supplementaire massa van y kg
$P_{abs}$	Gemiddeld geabsorbeerd vermogen [W]
$P_w$	Gemiddeld golfvermogen [W]
rw	Regular Wave
$S(f)$	(Energiedichtheids)spectrum [m <sup>2</sup> /s]
T	Golfperiode [s]
$T_f$	Wrijvingskracht [N]



$T_p$	Piekperiode [s]
$v_{fit}(t)$	Gefitte dompsnelheidscurve [m/s]
WL	Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout
$z(t)$	Dompbeweging vlotter [m]
$z_A$	Dompbeweging vlotter [m]
$z_{fit}(t)$	Gefitte dompcurve [m]
$z_W$	Verheffingen golf [m]
$\zeta$	Dempingsfactor [-]
$\eta$	Efficientie [-]
$\eta(x, t)$	Verheffing [m]
$\lambda$	Golflengte [m]
$\lambda_{cap}$	Absorptielengte [m]
$\rho$	Massadichtheid water [kg/m <sup>3</sup> ]
$\omega$	(Hoek)frequentie [rad/s]
$\omega_n$	Natuurlijke frequentie [rad/s]

# Hoofdstuk 1

## Inleiding

In een tijd waarin de schaarste van fossiele brandstoffen steeds duidelijker wordt, groeit het besef dat er nood is aan andere energiebronnen om te voldoen aan de steeds groter wordende energiebehoefte. Men probeert om een deel van die energiebehoefte te vervullen met hernieuwbare energiebronnen zoals zonne-, wind- en golfenergie. Eerder onderzoek op de eerste twee gaf al snel goede resultaten, daar waar men bij golfenergie niet verder geraakte dan fysische en numerieke modellering.

De huidige stijgende energiebehoefte en een CO<sub>2</sub>-probleem stimuleren om onderzoek op golfenergie nieuw leven in te blazen. Momenteel lopen er wereldwijd onderzoeken naar verschillende soorten convertoren, elk met hun eigen manier van werken. Sommige onderzoeken hebben reeds geleid tot het bouwen van prototypes en daar is men al in de commercialisatiefase.

Het onderzoek dat in onderhavig afstudeerwerk gebeurt, richt zich op point absorbers. Dit zijn convertoren met kleine horizontale dimensies ten opzichte van de invallende golflengtes. De energie wordt gehaald uit de bewegingsmodi van de vlotter ten opzichte van een vast platform of anker. De hoofdreden waarom deze relatief kleine toestellen toch een grote energieabsorptie kunnen behalen is het feit dat ze steeds in resonantie proberen te bewegen ten opzichte van de invallende golven. Via het SEEWEC project draagt de Universiteit Gent haar steentje bij tot het onderzoek naar de FO<sup>3</sup>, een point absorber die via de dompmodus golfenergie absorbeert.

Dit afstudeerwerk spitst zich toe op de experimentele bepaling van optimale waarden voor parameters die de energieabsorptie beïnvloeden. De parameters waarnaar gekeken wordt

zijn enerzijds de vorm en diepgang van de vlotter en anderzijds de externe demping en de supplementaire massa. De externe demping stelt een generator voor die de geabsorbeerde energie zal omzetten naar elektrische energie. De supplementaire massa is een parameter die invloed zal hebben op het gedrag onder een dynamische belasting.

Naast het experimenteel onderzoek wordt er ook een vergelijking gemaakt met numerieke resultaten. Zowel voor regelmatige als onregelmatige golven is er een tool beschikbaar die in staat is om het probleem numeriek op te lossen.

# Hoofdstuk 2

## Golfenergie

### 2.1 Inleiding

Het globale vermogen van de golven die op alle kusten ter wereld invallen, wordt geschat in de grootteorde van 1 TW ( 1 terrawatt =  $10^{12}$  W) [21]. Dit golfvermogen is al sterk gereduceerd door wrijving en golfbreking, zodat het beschikbare golfvermogen in oceanen nog een grootteorde hoger wordt geschat, vergelijkbaar met de mondiale consumptie.

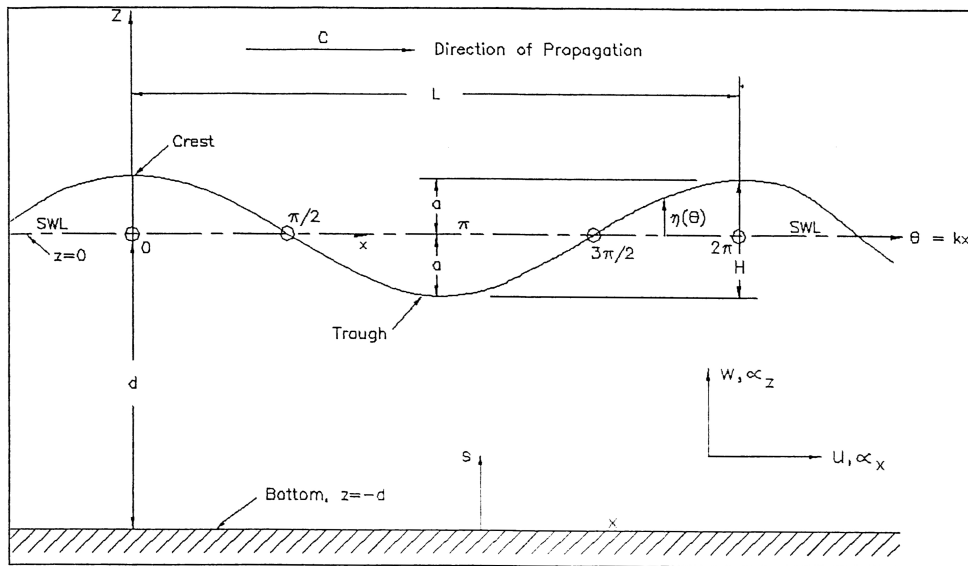
Golfenergie is slechts een klein deel van de aanwezige energie op aarde: golven ontstaan door omzetting van windenergie. Op zijn beurt ontstaat wind door omzetting van warmte-energie geleverd door de zon. Daarbij kan men stellen dat golfenergie meer geconcentreerd is dan windenergie, en nog meer dan zonne-energie. Typische waarden van het gemiddeld warmtevermogen door de zon zijn 0,1 - 0,3 kW/m<sup>2</sup> horizontaal aardoppervlak, voor windvermogen vindt men gemiddeld 0,5 kW/m<sup>2</sup> gemeten loodrecht op de windrichting. Bij de omzetting van windenergie naar golfenergie vindt een nog grotere ruimtelijke concentratie plaats: het gemiddeld golfvermogen juist onder het oceaanoppervlak is typisch 2 - 3 kW/m<sup>2</sup> gemeten loodrecht op de golfvoortplanting, een factor 5 groter dan het gemiddeld windvermogen [14].

De stijging in vermogensintensiteit en het feit dat golfenergie persistenter aanwezig is dan windenergie, motiveren om de golfenergieconvertoren verder te ontwikkelen. Dit hoofdstuk beschrijft de berekening van de golfenergie voor regelmatige en onregelmatige golven.

## 2.2 Regelmatige golven

### 2.2.1 Lineaire golftheorie

Een regelmatige golf kan worden beschreven met de *lineaire golftheorie* (Eng: Airy theory). Een lineaire progressieve golf wordt beschreven met behulp van de onafhankelijke veranderlijken  $x$  en  $z$  (in de ruimte) en  $t$  (in de tijd). De horizontale  $x$ -as is positief in de richting van de golfvoortplanting, de  $z$ -as is positief naar boven, met nulpeil op het stilwaterpeil (SWP). De golfverheffing wordt beschreven als  $\eta(x, t)$ .  $a$  is de amplitude van de verheffing,  $H$  de golfhoogte en  $L$  de golflengte. Een definitieschets is weergegeven in figuur 2.1.



**Figuur 2.1:** Definitieschets variabelen in de Airy golftheorie, [8]

De onderstelling dat aan alle voorwaarden voor de lineaire golftheorie en aan alle randvoorwaarden voldaan is, leidt tot de volgende snelheidspotentiaal:

$$\phi(x, z, t) = -\frac{ag \cosh(k(d+z))}{\omega \cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (2.1)$$

met  $a = \frac{H}{2}$  de golfamplitude,  $k = \frac{2\pi}{L}$  het golfgetal en  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  de pulsatie. De verheffing aan het vrij wateroppervlak ( $z=0$ )  $\eta(x, t)$  volgt uit de dynamische randvoorwaarde:

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta(x, t) = 0 \quad (2.2)$$

en is gelijk aan:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t - \phi) \quad (2.3)$$

De snelheid van de vloeistofpartikels  $u$  en  $w$  wordt berekend door afleiding van de snelheidspotentiaal naar  $x$  en  $z$  respectievelijk.

## 2.2.2 Golfenergie

Met behulp van voorgaande uitdrukkingen kan de golfenergie bepaald worden. Deze energie vertaalt zich in een kinetische energie door de waterpartikel snelheden, geassocieerd aan beweging en in een potentiële energie door de verheffingen. De kinetische energie over een golflengte in de richting van de golfstralen per eenheidslengte op de kruin kan gevonden worden uit:

$$\overline{E_k} = \int_x^{x+L} \int_{-d}^{\eta} \rho \frac{u^2 + w^2}{2} dz dx = \frac{1}{16} \rho g H^2 L \quad (2.4)$$

De potentiële energie per eenheidslengte op de kruin is:

$$\overline{E_p} = \int_x^{x+L} \rho g \left[ \frac{(\eta + d)^2}{2} - \frac{d^2}{2} \right] dx = \frac{1}{16} \rho g H^2 L \quad (2.5)$$

De totale energie in een golf is dan de som van de kinetische en de potentiële energie. De specifieke energie of energiedichtheid bedraagt bijgevolg:

$$\overline{E} = \frac{E}{L} = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (2.6)$$

## 2.2.3 Golfvermogen

Het golfvermogen is gedefinieerd als de energie die per tijdseenheid vervoerd wordt door de golf.

$$\overline{P} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-d}^{\eta} p u dz dt = \overline{E} C_g \quad (2.7)$$

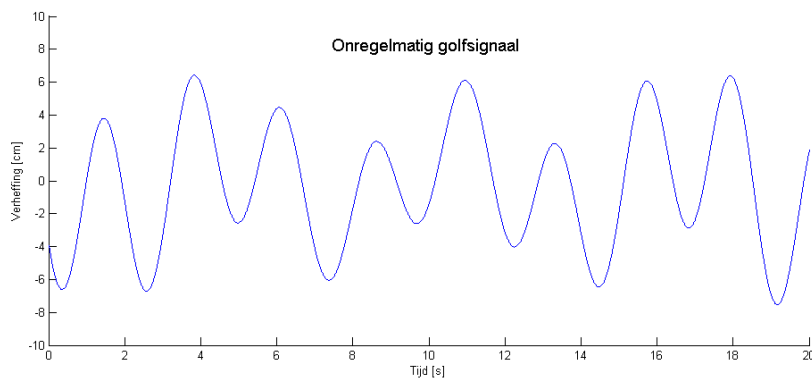
$C_g$  is de groepssnelheid van de golven, gelijk aan:

$$C_g = nC = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \frac{L}{T} \quad (2.8)$$

## 2.3 Onregelmatige golven

### 2.3.1 Tijdsdomein

Een reële golf opgemeten door een golfmeetinstrument wordt beschouwd als een stationair stochastisch signaal, met een normale verdeling. Het opgemeten signaal is een onregelmatige golf, verschillend van de beschreven regelmatige golven. Figuur 2.2 toont de verheffingen in het tijdsdomein van een onregelmatige golf op een bepaalde locatie.



**Figuur 2.2:** Verheffingen onregelmatige golf

Vergelijking (2.3) geeft de verheffingen voor regelmatige golven weer. Deze functie is afgeleid uit de lineaire potentiaaltheorie met gelineariseerde randvoorwaarden. Door deze aanname van lineariteit is het superpositiebeginsel toepasbaar. Dit betekent dat men een onregelmatig golfsignaal kan beschouwen als samengesteld uit een aantal regelmatige golfcomponenten die zich onafhankelijk van elkaar voortbewegen. Een onregelmatig signaal opgebouwd uit  $m$  regelmatige golfcomponenten heeft dan de volgende verheffing:

$$\eta(x, t) = \sum_{k=1}^m \frac{H_k}{2} \cos(k_k x - \omega_k t - \phi_k) \quad (2.9)$$

Het golfsignaal voorgesteld in figuur 2.2 is opgebouwd uit 5 regelmatige componenten.

Als we de golfenergie van de onregelmatige golf willen berekenen, kunnen we (2.6) toepassen:

$$E = \sum_{k=1}^m \frac{1}{8} \rho g H_k^2 = \frac{1}{8} \rho g H_{rms}^2 \quad (2.10)$$

Een onregelmatige golf wordt meestal niet beschreven in het tijdsdomein met behulp van (2.9), maar in het frequentiedomein met behulp van zijn spectrum.

### 2.3.2 Frequentiedomein

De informatie uit (2.9), namelijk de amplitudes  $a_k$  en golfperiodes  $T_k$ , kan men in het frequentiedomein voorstellen met behulp van het golfspectrum. Voor elke golffrequentie  $f_k = \frac{1}{T_k}$  zet men de overeenstemmende amplitude uit. Drie types spectra worden veel gebruikt: het *amplitudespectrum* (Eng: amplitude spectrum), het *energiespectrum* (Eng: power spectrum) en het *variantiedichtheidsspectrum* (Eng: variance spectral density).

Het amplitudespectrum heeft op de ordinaatas de halve amplitude  $\frac{1}{2}a$ , bij het energiespectrum is dit  $\frac{1}{2}a^2 = \frac{1}{8}H^2$ . Het energiedichtheidsspectrum vindt men door het energiespectrum te delen door de *frequentiebandbreedte*  $\Delta f$ .

$$S(f) = \frac{\frac{1}{2}a^2}{\Delta f} \quad (2.11)$$

Als  $\Delta f$  nadert tot 0, herleidt  $S(f)$  zich tot een continue functie.

Voor een continue  $S(f)$  kan men de energie berekenen analoog aan (2.10):

$$E = \rho g \int_0^{+\infty} S(f) df = \rho g m_0 \quad (2.12)$$

Zoals vermeld, worden enkel golfamplitudes en -periodes behouden in een spectrum. De fasehoek  $\phi_k$  wordt dus verworpen. Bij de wedersamenstelling van het spectrum naar het golfsignaal in het tijdsdomein kent men aan elke golfcomponent een random fasehoek toe, uniform verdeeld tussen 0 en  $2\pi$ . Dit weerspiegelt het stochastische karakter van golven. Dit is aanvaardbaar omdat het samengesteld signaal dezelfde energie bezit als het oorspronkelijke signaal.

Uit een gedetailleerde analyse van golfopnames van meetboeien over de gehele wereld is gebleken dat golfspectra analytisch benaderd kunnen worden door spectrumfuncties. Goda stelde voor volledig ontwikkelde windgolven volgende formule voor [16]:

$$S(f) = 0,205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp \left[ -0,75 (T_{1/3} f)^4 \right] \quad (2.13)$$

$H_{1/3}$  is de significante golfhoogte: het gemiddelde van de 1/3 grootste golven van een meting.  $T_{1/3}$  is de significante golfperiode. De bepaling ervan verloopt analoog aan de bepaling van de significante golfhoogte.



Windgolven, die op zeer korte periode ontstaan zijn in nauwe gebieden, vertonen meestal een veel scherpere piek dan (2.13). Daarom werd het *JONSWAP* spectrum, gebaseerd op metingen uit de Noordzee, ontwikkeld. Het spectrum bevat de windsnelheid als parameter, maar het kan geschreven worden als [16]:

$$S(f) = \beta_J H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp[-1,25(T_p f)^{-4}] \gamma^{\exp\left[-\frac{(T_p f - 1)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad (2.14)$$

met

$$\beta_J = \frac{0,0624}{0,230 + 0,0336\gamma - 0,185(1,9 + \gamma)^{-1}} [1,094 - 0,01915 \ln \gamma] \quad (2.15a)$$

$$T_p \approx \frac{T_{1/3}}{1 - 0,132(\gamma + 0,2)^{-0,559}} \quad (2.15b)$$

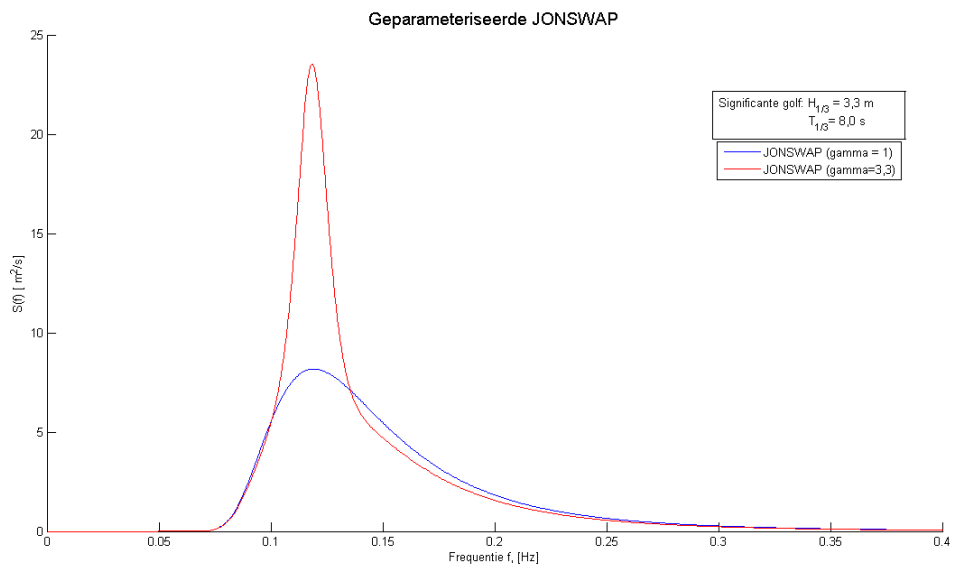
$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a : & f \leq f_p \\ \sigma_b : & f \geq f_p \end{cases} \quad (2.15c)$$

$$\gamma = 1 \sim 7 \text{ (gemiddeld } 3,3)$$

$$\sigma_a \approx 0,07$$

$$\sigma_b \approx 0,09$$

Uit voorgaande blijkt dat het *JONSWAP* spectrum bepaald wordt door de parameter  $\gamma$ , de *piekvergrotingsfactor* (Eng: peak enhancement factor). Deze factor bepaalt de scherpheid van de piek: voor  $\gamma = 1$  herleidt (2.14) zich tot (2.13); voor  $\gamma = 3,3$ , de gemiddelde waarde in de Noordzee, wordt de piekwaarde van  $S(f)$  2,1 keer groter dan (2.13) met dezelfde significante golfhoopte en golfperiode. Figuur 2.3 toont de verschillen voor 2 verschillende waarden van  $\gamma$ .

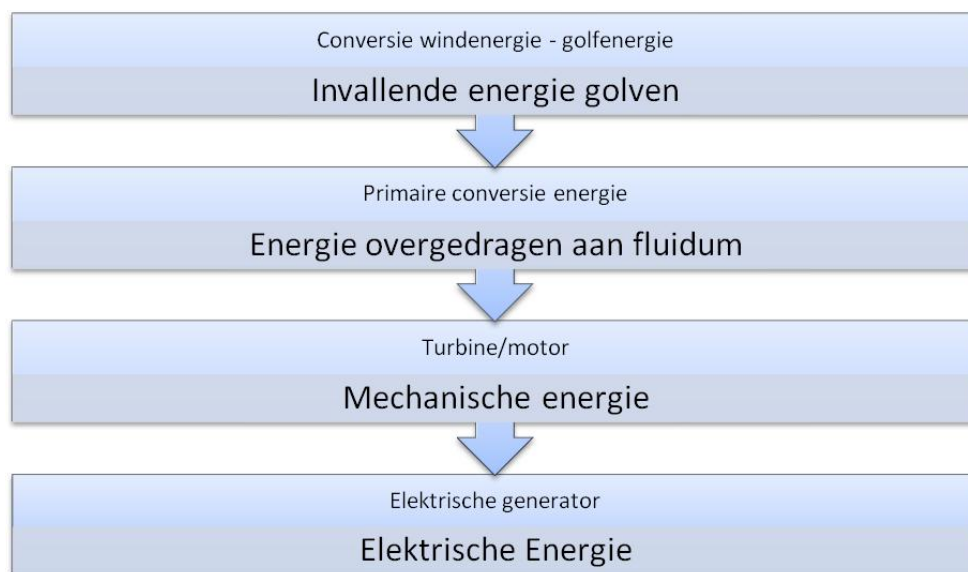


**Figuur 2.3:** Jonswap spectra

## Hoofdstuk 3

# Golfenergieconvertoren

Een golfenergieconverteer zet een deel van de invallende golfenergie om in elektrische energie. Figuur 3.1 toont de verschillende typische omzettingen [20].

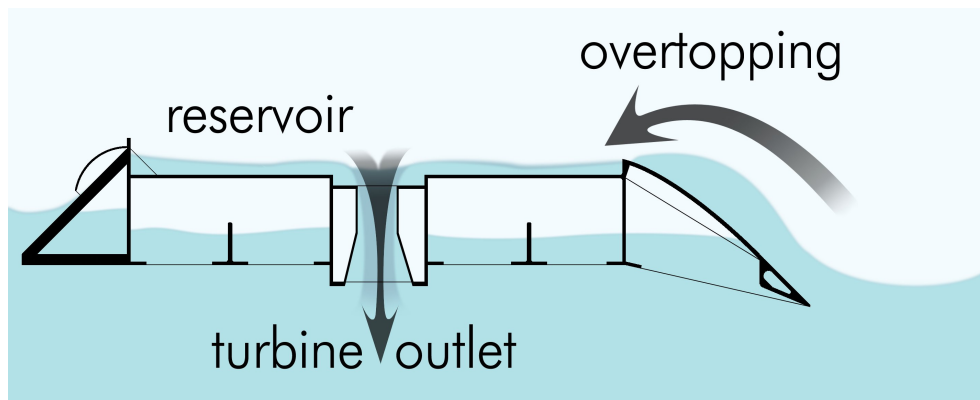


**Figuur 3.1:** Schema omzetting energie

Er zijn tal van manieren om de verschillende types convertoren te classificeren. Twee veel gebruikte ordeningen zijn de volgende:

- naargelang grootte en oriëntatie ten opzichte van de golven
- naargelang de locatie.

In de classificatie naargelang grootte en oriëntatie zijn er drie types. Een eerste type is de *point absorber*. De horizontale dimensies van dit toestel zijn beduidend kleiner dan de invallende golflengte. Een tweede type is de *attenuator*. Het is een toestel met de grootste horizontale dimensie in de richting van de golfvoortplanting. Het laatste type is de *terminator*. Dit toestel ligt met zijn grootste horizontale dimensie evenwijdig met de golfkruinen. Een terminator werkt soms volgens het *overtopping* systeem. Deze types laten overtopping van golven toe in een reservoir. Aan de onderkant van dit reservoir zitten dan waterturbines. Figuur 3.2 toont schematisch de werking van een overtopping toestel.



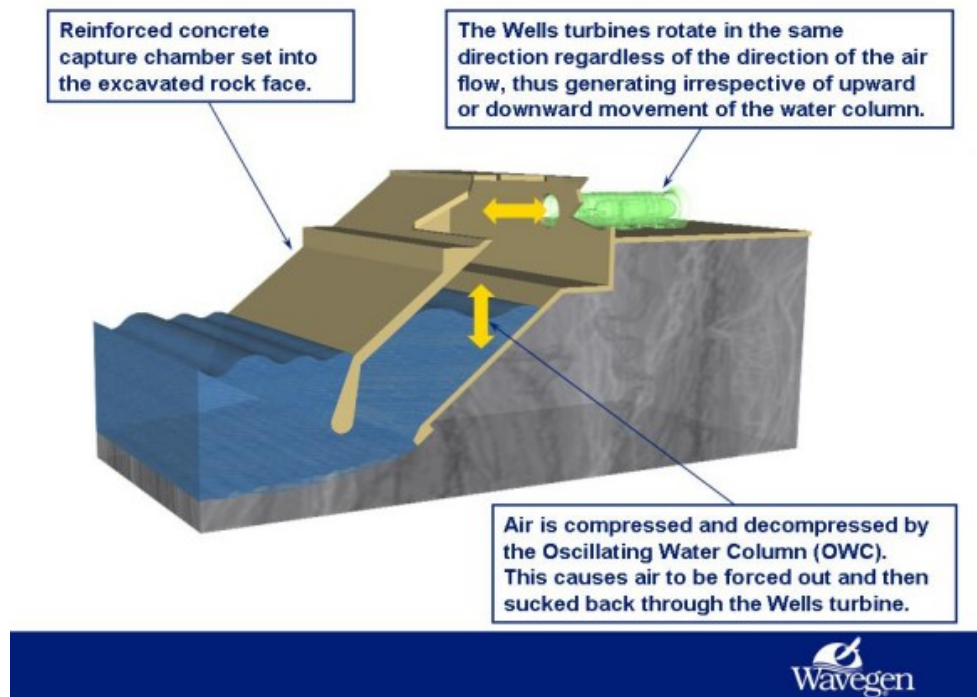
**Figuur 3.2:** Schema overtopping

De classificatie naargelang locatie omvat eveneens drie types. Deze types worden wat meer in detail besproken.

### 3.1 Shoreline systemen

Dit type convertoren is ofwel vastgemaakt aan ofwel ingebed in de kustlijn. Ze bieden het voordeel van een eenvoudige installatie en onderhoud. Het nadeel is dat ze aan een veel minder sterk golfklimaat onderworpen zijn. Dit kan men gedeeltelijk verhelpen door de convertoren te installeren op plaatsen waar er zich een natuurlijke concentratie van golfenergie voordoet: een *hot spot*. Een grote en bekende klasse van dit type convertoren is de *oscillerende water kolom* (Eng: Oscillating Water Column, OWC). Figuur 3.3 toont schematisch de werking van de *Limpet* OWC, ontwikkeld door Wavegen.

De golf loopt tot in de gedeeltelijk ondergedompelde holle structuur. Door golfwerking oscilleert de waterkolom in de holte. De lucht erboven zal daarom beurtelings weggeperst en



**Figuur 3.3:** Limpet OWC, [1]

aangezogen worden. Een Wells-turbine, aangedreven door de lucht, voorziet een elektriciteitsgenerator van mechanische energie. Het nominaal vermogen van de Limpet is ongeveer 500 kW. Dit is het geoptimaliseerd vermogen voor een klimaat met jaarlijkse gemiddelde golfintensiteiten van 15 tot 25 kW/m [1].

Een ander type convertor is het *versmallend kanaal* (Eng: tapered channel). Het is een horizontaal kanaal, breed aan de zee kant, nauw eindigend in een reservoir aan de andere kant. Een golf die op de structuur valt, wordt het in het nauwe kanaal geperst, over de randen tot in het reservoir. Het reservoir kan dan een waterturbine aandrijven.

## 3.2 Near shore systemen

Dit type convertoren bevindt zich ietwat verder in zee. Daardoor zal het een energetisch sterker golfklimaat ondervinden. De convertor is verankerd op de zeebodem. Een voorbeeld is de *Osprey*.

### 3.3 Offshore systemen

Golfenergieconvertoren geplaatst in diep water bieden het voordeel van in een energetisch gunstig klimaat te zitten. Er zijn talrijke types van offshore golfenergieconvertoren. Enkele van de types zijn de Archimedes Wave Swing, Pelamis, Aquabuoy, Manchester Bobber, Salter Duck, Wave Dragon, FO<sup>3</sup>, . . . Recente ontwerpen voor convertoren concentreren zich op kleine toestellen van het point absorber type, zoals de FO<sup>3</sup>. Deze types leiden tot een groot outputvermogen wanneer ze in groepen (Eng: farms) geplaatst worden. Onderhavige scriptie handelt over een enkele convertor van dit type. In een volgend hoofdstuk wordt hier meer aandacht aan besteed. Enkele andere convertoren worden nog kort besproken.

De *Pelamis* is een golfenergieconvertor van het attenuator type. Het is een drijvende structuur, bestaande uit verschillende cilindrische segmenten aan elkaar gekoppeld via scharnieren. De beweging van de segmenten, door de golven geïnduceerd, wordt tegengehouden door hydraulische zuigers. Deze verpompen olie onder hoge druk (via accumulatoren) naar hydraulische motoren, die elektrische generatoren aandrijven. De huidige machines zijn 140 m lang en 3,5 m in diameter. Ze bevatten elk 3 energieconversiemodules en hebben een nominaal vermogen van 750 kW. Figuur 3.4 toont een Pelamis in werking.

De *Wave Dragon* is van het overtopping type. Het is een drijvend toestel dat zowel alleen, als in rijen kan voorkomen. Het reservoir, met een capaciteit tot 14000 m<sup>3</sup>, laat het water door turbines lopen tussen 2 opeenvolgende golven. De huidige generatie convertoren heeft een vermogen tot 11 MW per eenheid. Het zijn toestellen van 54000 ton zwaar, 400 m breed en 200 m lang. Figuur 3.5 toont een prototype van de Wave Dragon in zee.

Volgend hoofdstuk beschrijft meer in detail de werking van de FO<sup>3</sup>.



**Figuur 3.4:** Pelamis golfenergieconvector, [2]



**Figuur 3.5:** Prototype Wave Dragon © Earth-vision.biz., [3]



# Hoofdstuk 4

## FO<sup>3</sup>

### 4.1 Beschrijving

De FO<sup>3</sup> is een golfenergieconverteer van het pointabsorber type. Het toestel bestaat uit een vlotter die in een verticale beweging oscilleert ten opzichte van een frame. Deze *dompbeweging* (Eng: heave) is de enige bewegingsmodus die gebruikt wordt voor energieconversie. De verticale beweging wordt omgezet in een rotatiebeweging door een hydraulische motor. Die drijft op zijn beurt een elektriciteitsgenerator aan. Uit dit idee is initieel een 1/20 schaalmodel gebouwd in het labo van Marintek/Sintef in Trondheim (Noorwegen). Goede resultaten in verband met energieabsorptie hebben geleid tot de bouw van *Buldra*, een 1/3 schaalmodel. Het bestaat uit een platform van 12 op 12 meter, 8 meter hoog. Figuur 4.1 toont hoe dit model er uitziet. Het systeem bestaat uit 5 vlotters.

Uit berekeningen op dit model volgt dat het model op ware schaal 2,52 MW zou kunnen produceren bij golven van 6 m hoog met een periode van 9 seconden [17]. Hiermee zou men 600 gezinnen kunnen voorzien in hun energiebehoeften. De doelstelling is om het vermogen te produceren aan een kost van 2,8 EUR/kWh. Een dergelijk model zou 3 tot 4 miljoen euro kosten om te bouwen.

Momenteel loopt er een SEEWEC (Sustainable, Economically Efficient, Wave Energy Converter) project dat elk aspect van het FO<sup>3</sup> concept onderzoekt en probeert te verbeteren. De testen en onderzoeken gebeuren op verschillende niveau's, o.a. nieuwe vormen van de vlotters, design van het platform, gebruik van composietmaterialen, optimalisatie van het vermogen, connectie van verschillende FO<sup>3</sup> systemen, . . . Meer info is te vinden in [23]

## 4.2 Modelling

In onderstaande sectie wordt de wiskundige modellering van de  $FO^3$  besproken. Vooreerst wordt een bewegingsvergelijking opgesteld. Vervolgens worden de componenten van de bewegingsvergelijking meer in detail bestudeerd. Tot slot wordt dan het geabsorbeerd vermogen bepaald.

### 4.2.1 Formulering mathematisch model

De modellering gaat uit van de lineaire golftheorie met een onsamendrukbare, niet-visceuze vloeistof. De stroming wordt irrotationeel ondersteld [22]. De formules in onderhavige paragraaf zijn afgeleid uit vectoriële functies die de 6 bewegingsmodi (zie verder) in rekening brengen. Hiervan wordt enkel de componenten in de dompmodus besproken.

Er wordt gewerkt in een rechtshandig assenstelsel met de oorsprong in het zwaartepunt van de vlotter, het xy-vlak horizontaal, de z-as loodrecht erop met positieve waarden wanneer de vlotter opwaarts beweegt.



**Figuur 4.1:** Buldra: 1/3 schaalmodel van de  $FO^3$ , [17]

De vergelijking van het dynamische evenwicht op een bepaald tijdstip volgt uit de wet van Newton:

$$m \cdot \ddot{\vec{x}} = \vec{F} \quad (4.1)$$

Een lichaam heeft 6 vrijheidsgraden van beweging: 3 translatie- en 3 rotatiemodi:

1. **Schrikken** (Eng: surge): langse translatiebeweging
2. **Verzetten** (Eng: sway): dwarse translatiebeweging
3. **Dampen** (Eng: heave): verticale translatiebeweging
4. **Rollen** (Eng: roll): rotatiebeweging om de langse as
5. **Stampen** (Eng: pitch): rotatiebeweging om de dwarse as
6. **Gieren** (Eng: yaw): rotatiebeweging om de verticale as

Zoals vermeld, wordt enkel de dompmodus gebruikt voor energieabsorptie bij de FO<sup>3</sup>. Daardoor herleidt de vectoriële vergelijking (4.1) zich tot het eendimensionale geval, de dompbeweging wordt aangeduid met  $z$ . De kracht  $\vec{F}$  is de golfkracht. Ze bestaat uit de som van een reactiekracht en een excitatiekracht [24].

$$\vec{F} = F_w(t) = F_R(t) + F_E(t) \quad (4.2)$$

Een vlotter die in een golf geplaatst wordt en vrij kan bewegen, ondervindt deze krachten. De *excitatiekracht* kan men omschrijven als de kracht die op een vlotter inwerkt als deze op een vaste positie in een golf gehouden wordt. De *reactiekracht* bestaat uit een hydrostatisch en een hydrodynamisch deel.

$$F_R(t) = F_{R_s}(t) + F_{R_d}(t) \quad (4.3)$$

De hydrostatische reactiekracht is de resultante van de Archimedeskracht en de zwaartekracht en wordt berekend door middel van de hydrostatica. Ze is functie van de geometrie en de verticale verplaatsing  $z$  van het lichaam. In een lineaire benadering wordt ze als volgt geformuleerd:

$$F_{R_s}(t) = -c \cdot z(t) \quad (4.4)$$

met:

$$c = \rho g A = \rho g \frac{\pi D^2}{4} \quad (4.5)$$

met  $\rho$  de massadichtheid van (zee)water en  $D$  de diameter van de boei.

De hydrodynamische reactiekracht is een functie van de snelheid, de versnelling en de geometrie van het lichaam. De berekening hiervan vergt de oplossing van het *radiatieprobleem*: de berekening van het hydrodynamische drukveld dat ontstaat wanneer men een vlotter dwingt te bewegen in een harmonische oscillatie in (oorspronkelijk) stil water. De resultante van dat drukveld op de vlotter volgens de z-richting geeft de hydrodynamische reactiekracht voor de dompmodus. Deze kracht kan geschreven worden als:

$$F_{Rd}(t) = -m_a \cdot \ddot{z}(t) - b \cdot \dot{z}(t) \quad (4.6)$$

De hydrodynamische reactiekracht bestaat uit twee termen. De eerste term is recht evenredig met de versnelling van het lichaam, het is dus een hydrodynamische traagheidskracht. De tweede term is evenredig met de snelheid van het lichaam, het is dus een hydrodynamische dempingskracht. De coëfficiënt  $m_a$  noemt men de toegevoegde massa,  $b$  is de hydrodynamische dempingscoëfficiënt.

Een meer gedetailleerde verklaring over toegevoegde massa en hydrodynamische demping kan gevonden worden door het beschouwen van een gedwongen harmonische dompbeweging van een vlotter. Door de dompbeweging, ontstaat er in het water een oscillatiebeweging. Er is dus een drukveld aanwezig in de vloeistof. De beweging van de vloeistof en de waarde van het drukveld kan men berekenen door gebruik van de snelheidspotential  $\Phi$ , die voldoet aan de continuïteitsvergelijking (vergelijking van Laplace):

$$\nabla^2 \Phi \equiv \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (4.7)$$

Het oplossen van (4.7) vereist enkele randvoorwaarden:

1. Op het vlotteroppervlak moet de normale componente van de vloeistofsnelheid gelijk zijn aan de normale componente van de gedwongen dompsnelheid:

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial n} = n_i \quad (i = 3 = \text{dombeweging}) \quad (4.8)$$

2. Op de zeebodem is de normale componente van de vloeistofsnelheid gelijk aan nul:

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial z} \Big|_{z=-h} = 0 \quad (4.9)$$

3. Op het wateroppervlak moet de vloeistofdruk gelijk zijn aan de atmosferische druk:

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\omega^2}{g} \Phi_i \quad (4.10)$$

4. Op oneindige afstand van de vlotter is de radiatievoorwaarde van toepassing: de golven die door de dompbeweging ontstaan zijn progressieve golven die zicht voortplanten vanaf het lichaam naar het oneindige (met  $R$  de straal van een kring op het vrije vloeistofoppervlak en  $k$  het golfgetal): [cursus vantorre blz II.37]

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{R} \left( \frac{\partial \bar{\Phi}_i}{\partial R} - ik \bar{\Phi}_i \right) = 0 \quad (4.11)$$

Na de bepaling van de snelheidspotentiaal kan men met behulp van Bernoulli de druk berekenen:

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho \nabla \Phi \cdot \nabla \Phi \quad (4.12)$$

waarbij de tweede term in het rechterlid van de tweede orde is en soms verwaarloosd wordt. Na aftrekken van de hydrostatische druk en integratie over het vlotteroppervlak vindt men de hydrodynamische radiatiekracht (4.6).

De tweede term uit het rechterlid van (4.2) stelt de golfexcitatiekracht voor. Om deze kracht te berekenen moet het *diffRACTIEPROBLEEM* opgelost worden. De vlotter wordt onbeweeglijk gehouden in een golf. Door aanwezigheid van de vlotter treedt er diffractie van de invallende golf op. Hierdoor ontstaat een hydrodynamisch drukveld waarvan de resultante gelijk is aan de golfexcitatiekracht. Omdat de bewegingen van vloeistofdeeltjes in een ongestoorde golf harmonisch zijn, zal ook de golfexcitatiekracht oscilleren met dezelfde hoekfrequentie  $\omega$ . Daarom wordt de golfexcitatiekracht veelal omschreven via volgende uitdrukking:

$$F_{Ej} = \Re \left[ \overline{F_{Ej}} \exp(i\omega t) \right] \quad (i = 3 = \text{dombeweging}) \quad (4.13)$$

Om de golfexcitatiekracht te kunnen berekenen, moet het diffractieprobleem opgelost worden. De tijdsafhankelijke snelheidspotentiaal van de stroming, wanneer de vlotter vastgehouden wordt in de golf, is gelijk aan:

$$\bar{\Phi} = \bar{\Phi}_I + \bar{\Phi}_D \quad (4.14)$$

met:

$\Phi_I$  = de potentiaal van de ongestoorde invallende golf

$\Phi_D$  = de diffractiepotentiaal

Oplossen van het diffractieprobleem vergt het definiëren van randvoorwaarden:

1. De diffractiepotentiaal moet voldoen aan de vergelijking van Laplace:

$$\nabla^2 \Phi_D = 0 \quad (4.15)$$

2. De normale componente van de vloeistofsnelheid op het lichaam is nul, omdat het lichaam vastgehouden wordt:

$$\frac{\partial(\Phi_I + \Phi_D)}{\partial n} = 0 \quad (4.16)$$

3. Op de zeebodem moet de diffractiepotentiaal voldoen aan:

$$\frac{\partial \Phi_D}{\partial z} \Big|_{z=-h} = 0 \quad (4.17)$$

4. Aan het vrije wateroppervlak moeten de drukken gelijk zijn aan de atmosferische druk:

$$\frac{\partial \Phi_D}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\omega^2}{g} \Phi_D \quad (4.18)$$

5. Tot slot moet de diffractiepotentiaal ook voldoen aan de radiatievoorwaarde:

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{R} \left( \frac{\partial \overline{\Phi_D}}{\partial R} - ik \overline{\Phi_D} \right) = 0 \quad (4.19)$$

Er zijn veel gelijkenissen met het radiatieprobleem: enkel randvoorwaarde (4.16) verschilt. De golfexcitatiekracht kan nu gevonden worden door substitutie van de potentiaal:

$$\Phi(x, y, z, t) = \Re \left[ (\overline{\Phi_I}(x, y, z) + \overline{\Phi_D}(x, y, z)) \exp(i\omega t) \right] \quad (4.20)$$

in de vergelijking van Bernoulli (4.12):

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \rho \Re \left[ i\omega (\overline{\Phi_I} + \overline{\Phi_D}) \exp(i\omega t) \right] \quad (4.21)$$

De golfexcitatiekracht volgt dan uit integratie van de druk over het oppervlak  $S$  van de vlotter:

$$\vec{F}_E = \rho \Re \left[ i\omega \exp(-i\omega t) \iint_S (\Phi_I + \Phi_D) \vec{n} \, dS \right] \quad (4.22)$$

Substitutie van (4.2), (4.4), (4.6) en (4.13) in (4.1) geeft de bewegingsvergelijking van een vlotter in een regelmatige golf:

$$(m + m_a) \cdot \ddot{z}(t) + b \cdot \dot{z}(t) + c \cdot z(t) = \Re [\overline{F_E} \exp(i\omega t)] \quad (4.23)$$

## 4.2.2 Specifieke eigenschappen

Vergelijking (4.23) toont de algemene bewegingsvergelijking van een vlotter. Er is echter nog geen sprake geweest van absorptie van energie of middelen om die absorptie te optimaliseren. Omzetting van energie gebeurt door een generator. Deze generator wordt gemodelleerd door het toevoegen van externe demping in het systeem. In de literatuur past men meestal een demping evenredig met de snelheid toe. De dempingskracht kan dan geschreven worden als  $b_{ext} \cdot \dot{z}(t)$ . De demping toegepast in de experimenten (zie verder), is echter een constante dempingskracht onafhankelijk van de snelheid. De externe dempingscoëfficiënt  $b_{ext}$  zal dus geen constante zijn. Een andere toevoeging aan het systeem is de mogelijkheid om de resonantiefrequentie te veranderen (zie verder). Dit wordt gerealiseerd door toevoeging van supplementaire massa. De totale bewegingsvergelijking van de FO<sup>3</sup> wordt dan:

$$(m + m_a + m_{sup}) \cdot \ddot{z}(t) + (b + b_{ext}) \cdot \dot{z}(t) + c \cdot z(t) = \Re [\overline{F_E} \exp(i\omega t)] \quad (4.24)$$

Bovenstaande vergelijking is de bewegingsvergelijking van een massa-veer-demper systeem. Figuur 4.2 toont schematisch de werking: een kracht  $F$  werkt in op een massa, die daardoor zal bewegen. De veer en de demper zorgen voor een terugroepende kracht. Volgende paragraaf gaat dieper in op de responsie en eigenschappen van een dergelijk systeem.

## 4.2.3 Massa-veer-demper systeem

Voor de eenvoud wordt vergelijking (4.24) ietwat aangepast naar een eenvoudigere vorm:

$$m \cdot \ddot{q}(t) + b \cdot \dot{q}(t) + c \cdot q(t) = f(t) \quad (4.25)$$

Hierbij:

$m$  = de massa van het systeem

$b$  = de dempingsconstante

$c$  = de veerconstante

$q$  = de vrijheidsgraad van het systeem.

Voorgaande vergelijking is opgesteld voor systemen met één vrijheidsgraad. Dit is van toepassing op de FO<sup>3</sup>. Stellen we de laplacegetransformeerde van  $q(t)$  voor door:

$$Lq(t) = q(s) \quad (4.26)$$

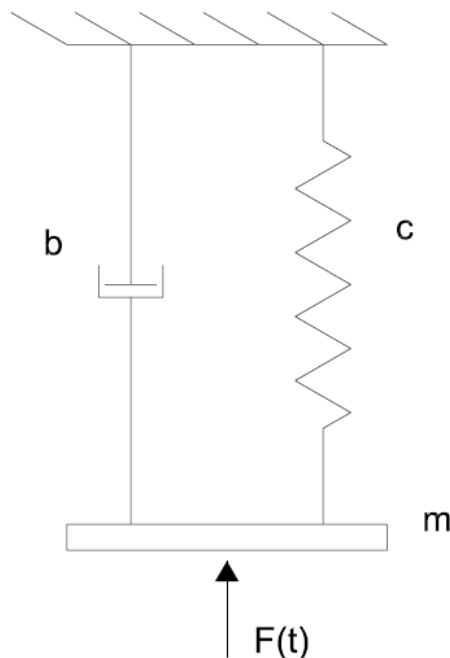
dan is de laplacegetransformeerde van de bewegingsvergelijking (4.25):

$$q(s) = G(s)f(s) + G_0(s) = \frac{1}{ms^2 + bs + c} \cdot f(s) + \frac{mq_0s + m\dot{q}_0 + bq_0}{ms^2 + bs + c} \quad (4.27)$$

Hierin is  $G(s)$  de overdrachtsfunctie van de belasting  $f(t)$  naar de verplaatsing  $q(t)$ ,  $G_0(s)$  geeft de invloed van de beginvoorwaarden weer. De totale responsie  $q(t)$  wordt dan:

$$q(t) = L^{-1}G(s)f(s) + L^{-1}G_0(s) = q_f(t) + q_{in}(t) \quad (4.28)$$

met:



**Figuur 4.2:** Massa-veer-demper systeem



$q_f(t)$  de gedwongen responsie: de responsie op de dynamische belasting

$q_{in}(t)$  de vrije responsie: de responsie op de beginvoorwaarden

We definiëren  $\omega_n$ ,  $\zeta$  en  $\omega_p$  als de *natuurlijke frequentie*, de *dempingsfactor* en de *gedempte natuurlijke frequentie* respectievelijk:

$$\begin{aligned}\omega_n &= \sqrt{\frac{c}{m}} \\ \zeta &= \frac{b}{2\sqrt{cm}} \\ \omega_p &= \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}\end{aligned}\quad (4.29)$$

Nu kan de laplacegetransformeerde van de beginvoorwaarden  $G_0(s)$  geschreven worden als volgt:

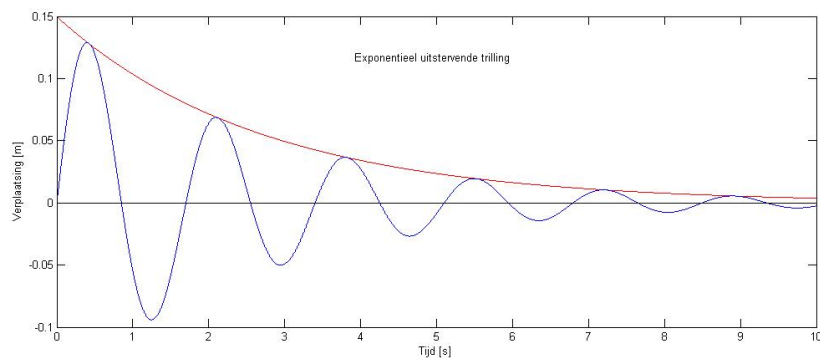
$$G_0(s) = q_0 \frac{s + \zeta\omega_n}{(s + \zeta\omega_n)^2 + \omega_p^2} + (\dot{q}_0 + \zeta\omega_n q_0) \frac{1}{(s + \zeta\omega_n)^2 + \omega_p^2} \quad (4.30)$$

Inverse laplacetransformatie geeft na uitwerking een exponentieel uitstervende trilling:

$$q_{in}(t) = a \exp(-\zeta\omega_n t) \sin(\omega_p t + \phi) \quad (4.31)$$

met amplitude  $a$  en fase  $\phi$ :

$$\begin{aligned}a &= \sqrt{q_0^2 + \frac{(\dot{q}_0 + \zeta\omega_n q_0)^2}{\omega_p^2}} \\ \phi &= \arctan \frac{q_0 \omega_p}{(\dot{q}_0 + \zeta\omega_n q_0)}\end{aligned}\quad (4.32)$$



**Figuur 4.3:** Exponentieel uitstervende trilling

Het resultaat van *decay* testen uitgevoerd op de constructie (zie verder) zijn niets meer dan de responsie op beginvoorwaarden ( $q_0 = 0,15 \text{ m}$  &  $\dot{q}_0 = 0 \text{ m/s}$ ). Met behulp van deze testen kan de natuurlijke en gedempte natuurlijke frequentie bepaald worden.

Men kan aantonen dat de gedwongen responsie  $q_f(t)$  op een willekeurige belasting gelijk is aan:

$$\frac{1}{m\omega_p} \int_0^t \exp[-\zeta\omega_n(t-\theta)] \sin[\omega_p(t-\theta)] f(\theta) d\theta \quad (4.33)$$

Zoals vermeld in sectie 4.2.1 is de golfbelasting op een vlotter in een regelmatige golf een harmonische trilling. Stellen we de belasting gelijk aan:

$$\begin{aligned} f(t) &= 0 & t < 0 \\ &= f_0 \sin(\omega t) & t \geq 0 \end{aligned} \quad (4.34)$$

dan is het *regime-antwoord* een sinusoidale trilling:

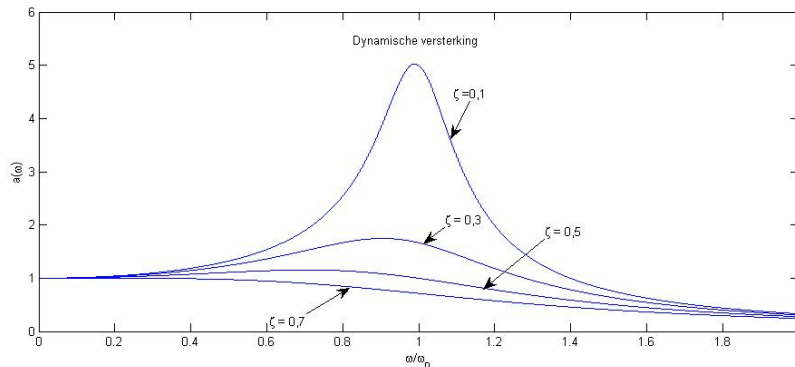
$$q_{reg}(t) = q_f(t) = a(\omega) f_0 \sin[\omega t + \phi(\omega)] \quad (4.35)$$

met

$$\begin{aligned} a(\omega) &= \frac{1}{m\omega_n^2} \frac{1}{\sqrt{[1-\frac{\omega^2}{\omega_n^2}]^2 + 4\zeta^2 \frac{\omega^2}{\omega_n^2}}} \\ \phi(\omega) &= -\arctan \frac{2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}}{1-\frac{\omega^2}{\omega_n^2}} \end{aligned} \quad (4.36)$$

De factor  $a(\omega)$  stelt de dynamische versterking voor, de factor  $\phi(\omega)$  de faseverschuiving. Het systeem zal dus trillen met een amplitude  $a(\omega)f_0$  verschoven over een bepaalde hoek in functie van  $\omega$ . De maximale versterking vindt door  $a(\omega)$  te maximaliseren. Men zegt dat het systeem dan in resonantie is. Figuur 4.4 toont de dynamische versterking voor enkele waarden van de dempingsfactor  $\zeta$ . Dit noemt men het *bodediagram* [18]. Men kan aantonen dat resonantie optreedt voor de frequentie:

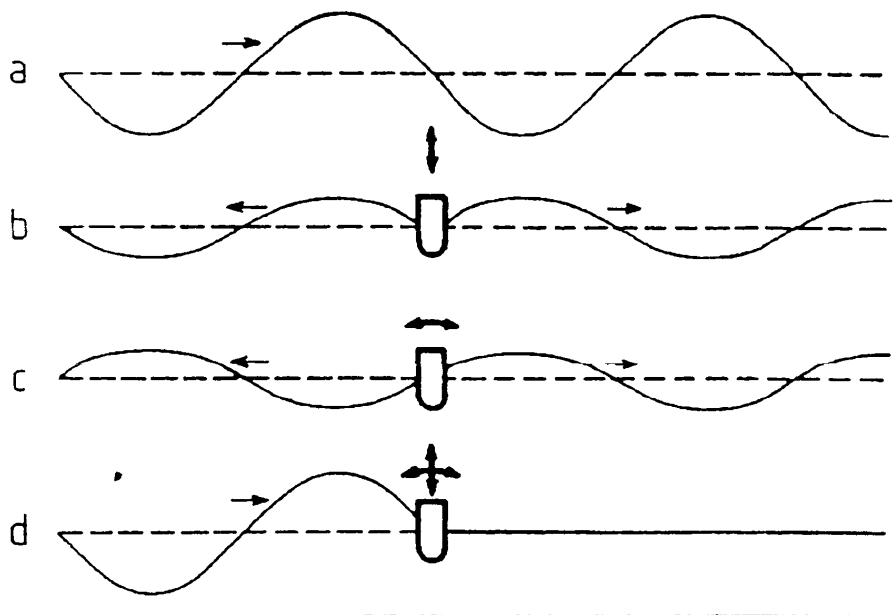
$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2} \quad (4.37)$$



**Figuur 4.4:** Bodediagram voor verschillende waarden van  $\zeta$

#### 4.2.4 Absorptie van energie

Om vermogen te leveren, moet de  $FO^3$  energie absorberen uit golven. Energie halen uit golven betekent dat de golven die de energieconvector passeren gereduceerd en liefst geëlimineerd moeten worden. Die reductie kan gebeuren door een oscillerend toestel dat zelf golven genereert die zich destructief samenstellen met de invallende golf. Op die manier kan in theorie 100% van de invallende energie geabsorbeerd worden. Figuur 4.5 verduidelijkt deze redenering.



**Figuur 4.5:** Golfabsorptie, [10]

In curve a wordt de ongestoorde invallende golf voorgesteld. Curve b toont het symmetrische golfprofiel dat ontstaat door de dompbeweging van een convector. Deze convector is eigenlijk een oneindig lange rij (loodrecht op het blad) van vlotters, geplaatst met een tussenafstand kleiner dan één golflengte. Curve c geeft het puntsymmetrische golfprofiel dat ontstaat door een horizontale beweging. Curve d toont wat er gebeurt als curve a, b en c zich samenstellen. De ongestoorde invallende golf wordt geëlimineerd achter de energieconvector. Dit betekent dat alle energie uit de golf geabsorbeerd is.

Volledige absorptie impliceert ook dat de convector met een optimale amplitude en fasehoek moet oscilleren. Figuur 4.5 toont aan dat de twee geradieerde golven met elkaar en ook

met de invallende golf in fase moeten zijn: dan wordt de kant van de invallende golf niet gestoord, en wordt alle energie geabsorbeerd. Dit gebeurt enkel als ook de amplitude van de geradieerde golf optimaal is. Deze amplitude moet gelijk zijn aan de helft van de invallende golfamplitude.

Als de vlotter slechts één bewegingsmodus heeft, zoals bij de  $FO^3$  het geval is, dan is de optimum amplitude en het optimum faseverschil zoals beschreven. Omdat golfenergie evenredig is met het kwadraat van de golfhoogte, betekent dit dat 25% van de invallende golfenergie gereflecteerd wordt naar de linkerkant en 25% van de invallende energie via transmissie naar de rechterkant van de figuur verdwijnt. De overblijvende 50% wordt geabsorbeerd door de golfenergieconvector.

#### 4.2.5 Point absorber effect

Men kan bewijzen dat de maximale hoeveelheid energie die een axiaalsymmetrisch lichaam in de dompmodus kan absorberen gelijk is aan de golfenergie van de invallende golven, genomen over een kruinbreedte gelijk aan de golflengte  $\lambda$  gedeeld door  $2\pi$ . Deze breedte noemt men de *absorptielengte*  $\lambda_{cap}$  (Eng: absorption length of capture length). De bewijsvoering van deze stelling in terug te vinden in de literatuur [12].

Een algemene uitdrukking van de absorptielengte is te vinden in [9]:

$$\lambda_{cap} = \frac{2\lambda}{\pi} \frac{b(\omega)b_{ext}\omega^2}{[c - (m + m_a + m_{sup})\omega^2]^2 + [b(\omega) + b_{ext}]^2\omega^2} \quad (4.38)$$

Optimale energieabsorptie betekent dat de absorptielengte (4.38) gemaximaliseerd moet worden. Dit gebeurt als voldaan is aan volgende vergelijkingen:

$$b_{ext} = b(\omega) \quad (4.39a)$$

$$c - (m + m_a + m_{sup})\omega^2 = 0 \quad (4.39b)$$

Vergelijking (4.39b) toont dat de eigenfrequentie van het systeem gelijk moet zijn aan de invallende golffrequentie. Met andere woorden, het systeem moet resoneren.

$$\omega = \sqrt{\frac{c}{m + m_a + m_{sup}}} \equiv \omega_n \quad (4.40)$$

Indien voldaan is aan deze vergelijkingen, dan komt er voor de absorptielengte:

$$\lambda_{cap} = \frac{2\lambda}{\pi} \frac{b(\omega)^2 \omega^2}{(2b(\omega))^2 \omega^2} = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (4.41)$$

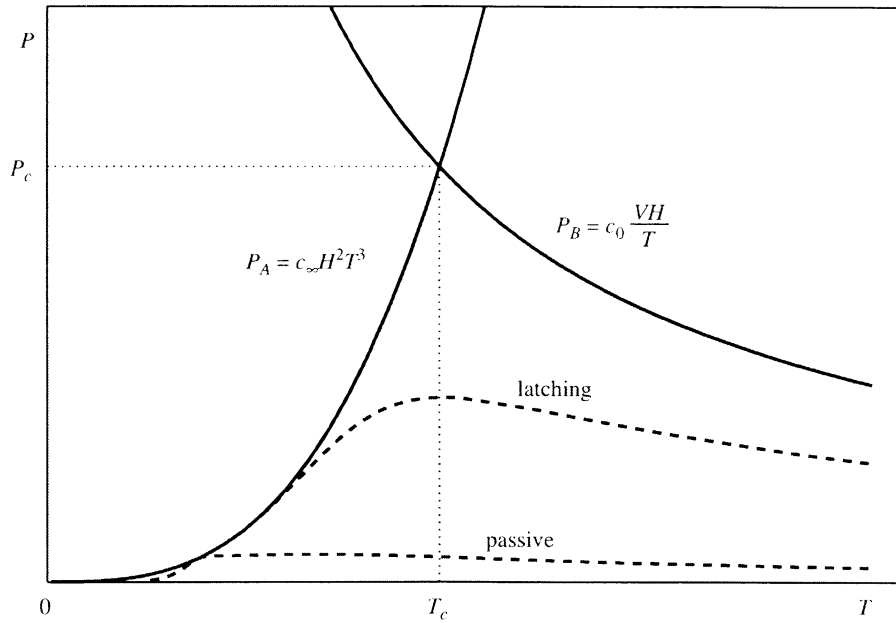
### 4.2.6 Geabsorbeerd vermogen

Als een regelmatige golf met vermogen  $P = E \cdot C_g$  invalt op een point absorber in de dompmodus, is het maximaal geabsorbeerd vermogen gelijk aan  $P_{abs,max} = P\lambda/2\pi$ . In diep water, waar  $\lambda = gT^2/2\pi$  en  $P = \rho g H^2 T / 32\pi$ , bestaat er de volgende limiet voor het geabsorbeerd vermogen:

$$P_{abs,max} < P_A = c_\infty T^\delta H^2 \quad (4.42)$$

met  $c_\infty = \rho(g/\pi)^3/128 = 245 \text{ W m}^{-2} \text{ s}^{-3}$  en  $\delta = 3$ .

Budal [4] stelde nog een bijkomend maximum voor geabsorbeerd vermogen:  $P_{max,abs} < P_B = c_0 V H / T$  met  $c_0 = \rho g \pi / 4 = 7,9 \text{ kW/m}^{-4} / \text{s}$  en met  $V$  het volume van de point absorber. Samengevat geeft dit het diagram weergegeven in Figuur 4.6. Het optimum punt, weergegeven door  $(T_c, P_c)$  is een fictief punt. Om op de curve  $P_A$  te liggen, moet het volume van de point absorber groot zijn ( $V \rightarrow \infty$ ), terwijl de curve  $P_B$  enkel geldt voor kleine volumes ( $V \rightarrow 0$ ). Het werkelijk maximaal geabsorbeerd vermogen ligt dus lager dan het punt  $(T_c, P_c)$ . De onderste curve (in streeplijn) stelt het geabsorbeerd vermogen voor wanneer er geen fasecontrole wordt toegepast. De bovenste curve in streeplijn stelt het maximaal geabsorbeerd vermogen voor bij fasecontrole door *latching* (zie verder).



**Figuur 4.6:** Maximaal geabsorbeerd vermogen, [14]

### 4.3 Optimalisatie van de energieabsorptie

Bij alle vormen van energieabsorptie is het de bedoeling dat dit op de meest efficiënte manier gebeurt en dat men het maximale vermogen absorbeert. Om tot dit maximaal geabsorbeerd vermogen te komen moeten zowel de amplitude als de fase een optimale waarde hebben. In onderstaande tekst wordt de faseoptimalisatie besproken. Enerzijds kan men de fase optimaliseren door toevoeging van supplementaire massa, anderzijds kan men het systeem ook vasthouden gedurende een bepaalde periode. Een laatste mogelijkheid is om het systeem gedurende een bepaalde tijd vrij te laten lopen.

#### 4.3.1 Tuning

Een eerste manier om faseoptimalisatie toe te passen is het tunen van het systeem naar de invallende golffrequentie. Deze methode wordt ook toegepast in de verdere experimenten. Hierbij wordt de eigenfrequentie van het systeem gewijzigd zodanig dat het in resonantie is met de invallende golffrequentie.

Vergelijking (4.40) toont hoe het systeem in resonantie gebracht wordt. De toegevoegde massa  $m_a$  en de massa nodig om de diepgang te bereiken  $m$  zijn beide constanten in een

regelmatige golf. En vermits ook de gelineariseerde hydrostatische herstelkrachtcoëfficiënt  $c$  constant is, kan men de eigenfrequentie enkel wijzigen aan de hand van de supplementaire massa  $m_{sup}$ . Eerder theoretisch en experimenteel onderzoek ([26] en [15]) toonde het effect van het (mis)tunen reeds aan: figuur 4.7 toont het effect van het mistunen op de efficiëntie. De efficiëntie wordt gedefinieerd als de verhouding van het geabsorbeerde vermogen tot het golfvermogen genomen op een kruinlengte even lang als de diameter van de vlotter. Men vergelijkt met andere woorden de absorptielengte  $\lambda_{cap}$  met de diameter van de vlotter ( $2r$ ).

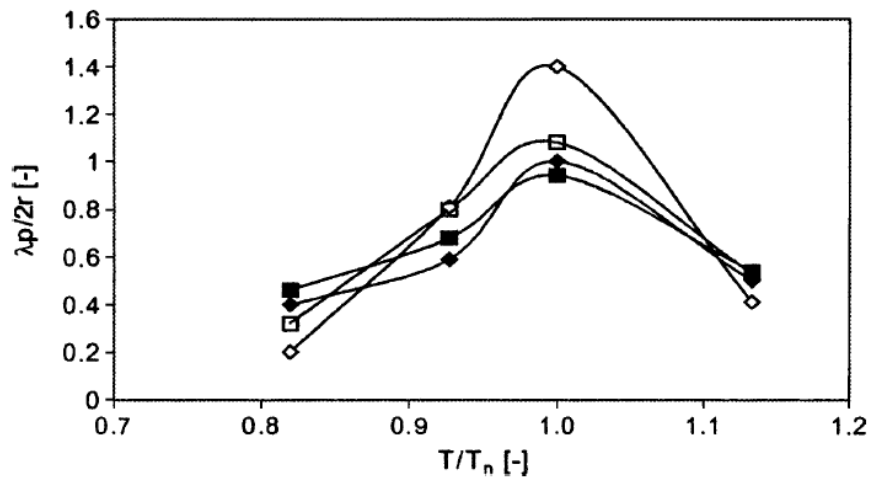


Fig. 12. Power absorption tests in regular waves: power absorption as a function of wave period for a constant supplementary mass;  $T_n = 1.5$  s (◆:  $b_{ext}/b(\omega_n) = 2.65$ ; ■:  $b_{ext}/b(\omega_n) = 4.65$ ; ◇:  $b_{ext}/b(\omega_n) = 2.65$  calculated; □:  $b_{ext}/b(\omega_n) = 4.63$  calculated).

**Figuur 4.7:** Effect van het mistunen op de efficiëntie, [26]

De figuur illustreert duidelijk dat het (mis)tunen een drastische vermindering in efficiëntie teweegbrengt wanneer  $\omega < \omega_n$  (lange golven). Wanneer  $\omega > \omega_n$  is het effect kleiner. De figuur toont ook dat voor golf frequenties lichtjes buiten resonantie er nog steeds aan het faseoptimum voldaan is. Dit gebeurt voor frequenties binnen de zogenaamde resonantiebandbreedte. Golfenergieconvertoren met grote dimensies hebben meestal een brede bandbreedte. Point absorbers vertonen eerder een smalle bandbreedte. Daardoor is faseoptimalisatie bij point absorbers heel belangrijk.

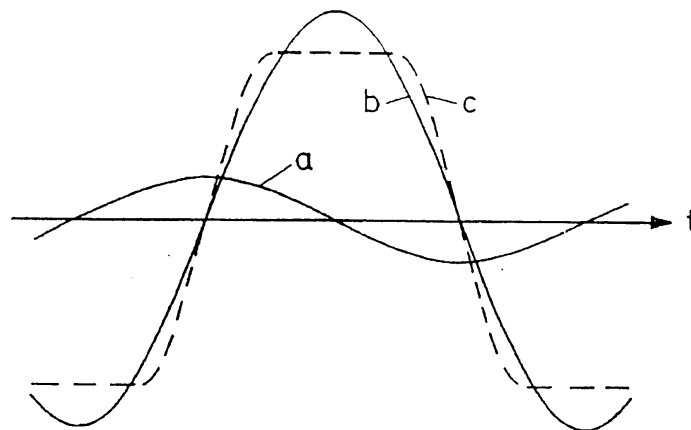
In een onregelmatige golf is het onmogelijk om voor elke individuele golf het systeem te tunen. De supplementaire massa wordt constant gehouden op de optimale waarde. Expe-

rimenten moeten aantonen wat de beste waarde van de eigenfrequentie is in een onregelmatige golf voor een bepaalde Hs klasse.

### 4.3.2 Latching

Latching is een vorm van fasecontrole die systemen kan tunen voor kleinere golffrequenties dan de eigenfrequentie (langere golven). Een inklemmingsmechanisme stopt de vlotterbeweging op het moment van maximale bewegingsuitwijking, waar de snelheid nul is. De vlotter wordt weer losgelaten een zekere tijdsperiode voor het optreden van een nieuwe piek in de golfexcitatiekracht. Voor een vlotter in dompbeweging is de excitatiekracht ongeveer in fase met de verheffingen.

Het latching principe wordt verduidelijkt in figuur 4.8. Curve a stelt de verheffing van het wateroppervlak voor ter plekke van de vlotter. Voor een vlotter met een diameter veel kleiner dan de golflengte stelt dit ook de excitatiekracht voor. Curve b weerspiegelt de dompbeweging van een vlotter met een massa zo dat voldaan is aan (4.40). Het faseverschil van de verplaatsing van de vlotter en de excitatiekracht is in dit geval  $90^\circ$ , waardoor de vlottersnelheid en excitatiekracht in fase zijn. In dit geval treedt optimale energieabsorptie op. Curve c toont de verticale verplaatsing van een vlotter waarvan de natuurlijke trillingsfrequentie groter is dan de golffrequentie. Fasecontrole wordt hier bekomen door de vlotter gedurende een bepaalde tijd vast te houden.

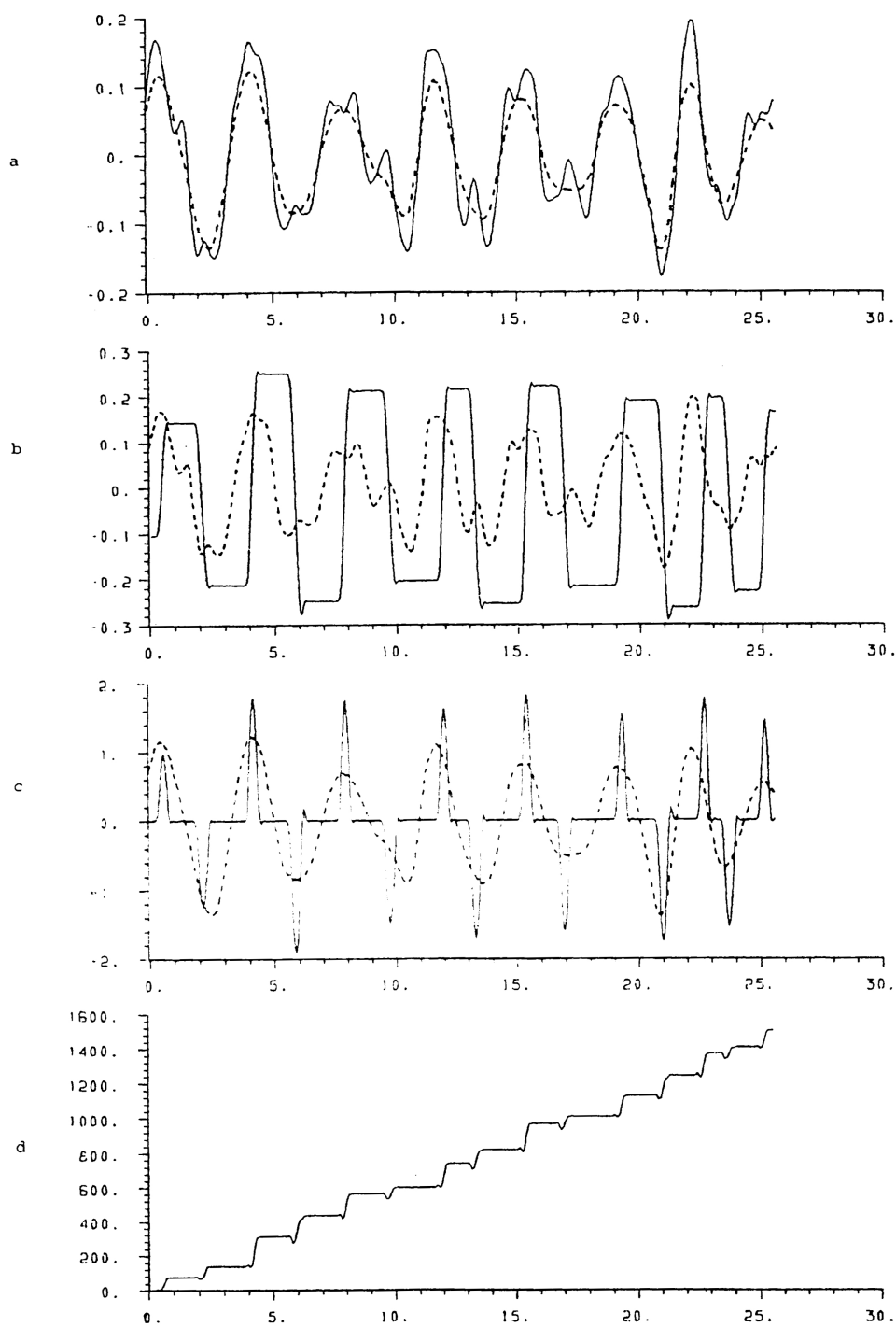


**Figuur 4.8:** Fasecontrole door latching, [10]

In een onregelmatige golfrein is het tijdsinterval tussen golfkruin en -dal op een min of



meer stochastische manier verdeeld. Faseoptimalisatie door latching controle blijkt ook hierbij goede resultaten te geven. Om evenwel latching te kunnen toepassen moet het golfsignaal een bepaalde tijd in de toekomst gekend zijn. Figuur 4.9 toont het principe aan de hand van een experimenteel voorbeeld. Het experiment werd uitgevoerd in een 10,5 m breed en 10 m diep kanaal. De vlotter is kegelvormig met de punt naar onder en is via een zuiger en een lang touw aan de bodem bevestigd. Meer details van het experiment zijn te vinden in [5].



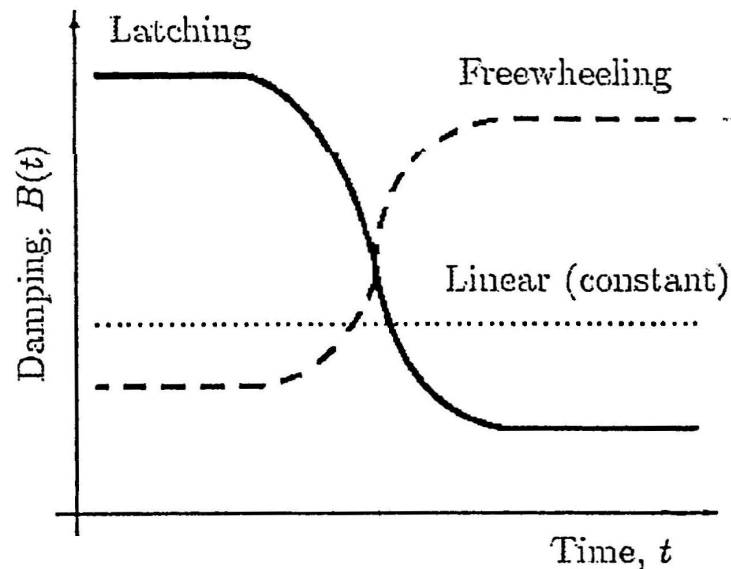
**Figuur 4.9:** Fasecontrole door latching bij onregelmatige golven, [10]

De volle lijn in figuur a geeft de verheffing weer (in m). De gestreepte geeft lijn de hy-

drodynamische druk weer, gemeten door een drukcel 0,7 m onder het wateroppervlak (in  $10^4 N/m^2$ ). Figuur b stelt de dompbeweging voor (volle lijn) samen met de verheffingen (streeplijn). In figuur c is de hydrodynamische druk (in  $10^3 N/m^2$ ) weergegeven samen met de dompsnelheid (in m/s). Op deze figuur is te zien dat de dompsnelheden optreden wanneer de excitatiekrachten maximaal zijn. Daardoor zal de energieabsorptie ook groot zijn. Figuur d geeft dan de energieabsorptie (in J).

### 4.3.3 Freewheeling

Freewheeling is een manier van faseoptimalisatie waarbij de vlotter ongedempt kan bewegen tussen zijn extrema, zodanig dat de snelheid kan toenemen. Als de vlotter een bepaalde drempelwaarde van de snelheid heeft bereikt, wordt een dempingskracht uitgeoefend. Figuur 4.10 toont de verschillende dempingsprofielen: latching vertrekt van een hoge dempingskracht, waarna een *release signal* de vlotter loslaat. Bij freewheelen gebeurt het omgekeerde. Lineaire demping brengt een constante dempingscoëfficiënt aan.



**Figuur 4.10:** Verschillende dempingsprofielen, [19]

Een numerieke analyse toonde aan dat maximale energieabsorptie optreedt wanneer een latching strategie gevolgd wordt [19].

# Hoofdstuk 5

## Proefopstelling

Onderhavig hoofdstuk beschrijft de constructie van het schaalmodel van de FO<sup>3</sup>, de eigenschappen van het systeem en de golfgoot waarin de proeven uitgevoerd werden.

### 5.1 Proefopstelling

#### 5.1.1 Schaalmodel

De FO<sup>3</sup> op ware schaal heeft vlotters waarvan een realistische diameter 5 m is, daarom wordt deze als referentiediameter gekozen. Om een zo goed mogelijke voorspelling van het gedrag van de boei te verkrijgen, werd de schaalfactor voor de proefopstelling zo klein mogelijk gehouden. Hierbij houdt men rekening met de afmetingen van de golfgoot en de verkrijgbaarheid van materialen. Daarom werd er gekozen om de geschaalde boei op een diameter van 31,5 cm te maken. Dit betekent dat er een lineaire schaalfactor  $\lambda = l_p/l_m = 15,873$  toegepast werd. Tabel 5.1 toont de schaalfactor van andere parameters.

#### 5.1.2 Oude proefopstelling

In het verleden werden, in het kader van een BOF project, reeds proeven uitgevoerd op een schaalmodel van een point absorber in de dompmodus. In eerste instantie was het de bedoeling deze opstelling verder te optimaliseren. Figuur 5.1 toont de oude proefopstelling. Het bestaat uit een metalen kader waarin een vlotter (1) op en neer kan bewegen. Door middel van een tandriem is een tegengewicht (2) verbonden. Met dit tegengewicht kunnen de diepgang en de eigenfrequentie van het systeem geregeld worden. (3) stelt een optische encoder voor die de verticale beweging van de vlotter registreert door de rotatie van een

horizontale as verbonden met de tandriem te meten. De externe demping, die de generator voorstelt, wordt gerealiseerd door een gewicht dat op (4) geplaatst wordt. Deze zorgt voor een extra wrijvingskracht in het systeem. De dempingskracht die hiermee gerealiseerd wordt, is een constante kracht. Ideaal is de dempingskracht proportioneel met de snelheid, zodat het geabsorbeerde vermogen (kracht · snelheid) maximaal is. Een krachtsensor (5) meet de dempingskracht op.

De staaf die de boei verbindt met het metalen frame is een geharde stalen staaf van diameter 16 mm. Deze staaf was oorspronkelijk gelagerd in kogelbussen. Door de horizontale golfkrachten (ongeveer 70 N) boog de staaf aan de onderste kogelbus 4° uit, terwijl een dergelijke bus slechts 0,1° schiefstand kan weerstaan. Een gevolg hiervan is dat er veel inwendige wrijving ontstond tussen staaf en lager samen met een enorme slijtage van beide componenten. Voorts bleek ook dat de amplitude van de horizontale verplaatsing ten gevolge van een golfkracht ongeveer 30 cm is. Dit heeft tot gevolg dat de opmeting van de krachten verstoord wordt. Een ander probleem was dat de asjes waarop de tandriem liep, ondergedimensioneerd waren. Ook hier traden te grote krachten op.

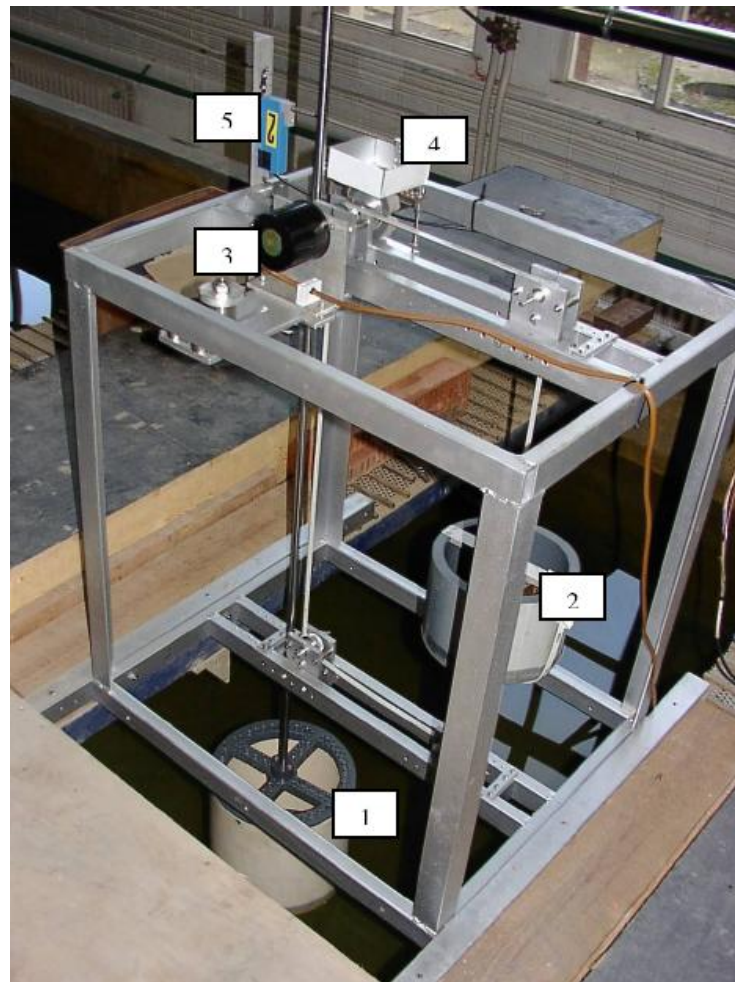
### 5.1.3 Nieuwe proefopstelling

Dit alles heeft geleid tot het ontwerpen van een nieuwe constructie. Daarbij werd getracht om:

- de inwendige wrijving te minimaliseren
- een koppelmeter in te bouwen om de dempingskracht nauwkeuriger op te meten

Dimensie	Schaalfactor	Waarde
Lengte [m]	$\lambda$	15,873
Massa [kg]	$\lambda^3$	3999
Kracht [N]	$\lambda^3$	3999
Tijd [s]	$\lambda^{0,5}$	3,984
Snelheid [m/s]	$\lambda^{0,5}$	3,984
Vermogen [W]	$\lambda^{3,5}$	15933
Dempingscoëfficiënt [kg/s]	$\lambda^{2,5}$	1004

**Tabel 5.1:** Froude schaalfactoren



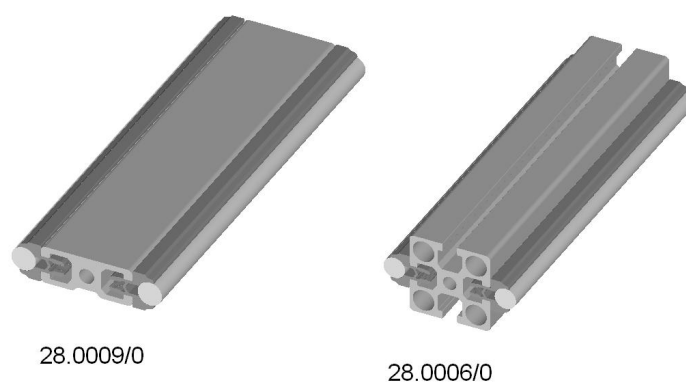
**Figuur 5.1:** Oude proefopstelling

- een stijvere verticale staaf te voorzien om horizontale doorbuiging te verminderen
- een nieuwe, lichtere, kegelvormige vlotter te maken
- een nieuw frame te construeren dat zowel stijf als moduleerbaar is.

De keuze van het type staaf is enerzijds zo stijf mogelijk om doorbuigingen te vermijden, anderzijds zo licht mogelijk om de inertie van het systeem niet te groot te maken (zie verder). Tabel 5.2 toont de vergelijking tussen de huidige staaf en enkele andere types. Het profiel van Hepco biedt het voordeel zeer licht te zijn, maar de winst in buigstijfheid is vergeleken met de prijs te klein. De buigstijfheid van beide Minitec profielen blijkt 6,5 tot 13 keer hoger te liggen dan de huidige staaf. Het profiel 28.0006/0 heeft echter een te grote massa. Daarom werd gekozen om type 28.0009/0 te weerhouden. Figuur 5.2 toont een figuur van de types staven van Minitec.

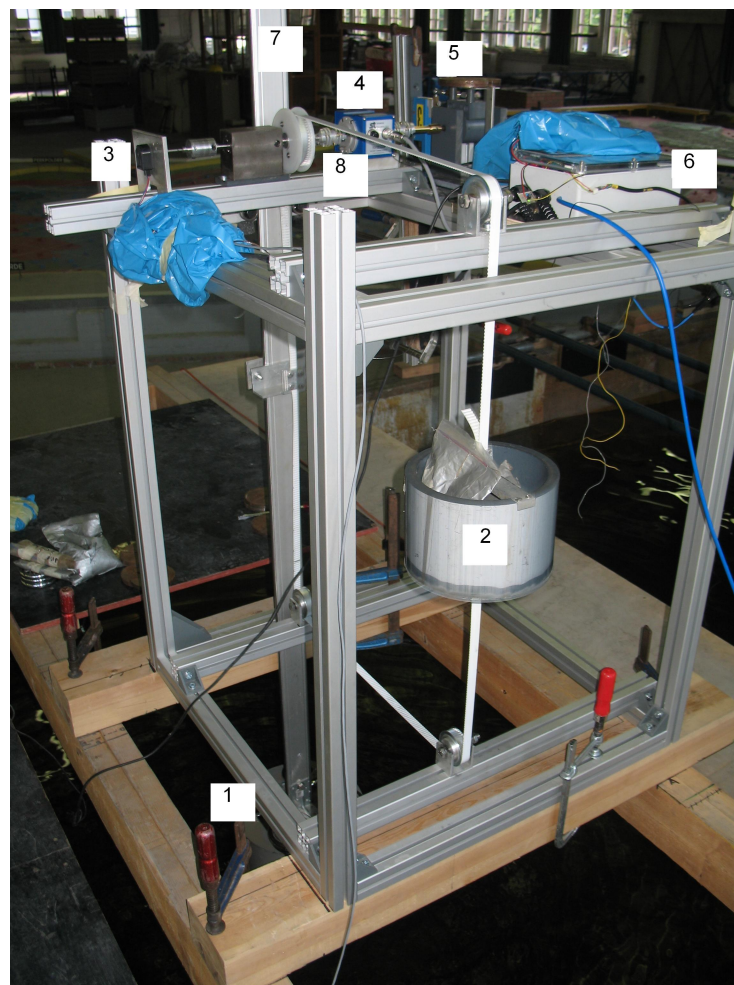
	Staf	Hepco	Minitec	
	$\phi$ 16 mm	SL2/GV3	28.0009/0	28.0006/0
I (mm <sup>4</sup> )	3216	5217	61960	128000
EI (N/m <sup>2</sup> )	675	1096	4337	8960
m (kg/m)	1,6	0,8	3,179	4,43
M (kg)	3,671	1,84	7,3117	10,189

**Tabel 5.2:** Vergelijking types staaf



**Figuur 5.2:** Geleidingsstaven Minitec

Het nieuwe frame, dat de onderdelen draagt en de reacties opneemt, werd ook voorzien van Minitec profielen zodat het stijf genoeg was, maar ook eenvoudig moduleerbaar om aanpassingen aan te brengen. De uiteindelijke opstelling is te zien in figuur 5.3. Nummer 1 toont de vlotter met een supplementaire massa erop, nummer 2 is het tegengewicht, nummer 3 de optische encoder die de beweging registreert, nummer 4 is de koppelmeter die samen met nummer 5 (de krachtsensor) de dempingskracht opneemt, nummer 6 is de microprocessor die alle data capteert en doorstuurt naar de laptop, nummer 7 is de Minitec staaf en tot slot is nummer 8 een flexibele koppeling die positioneringsfouten opneemt.

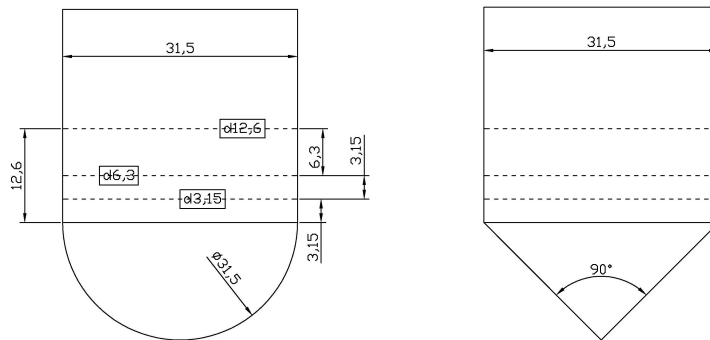


**Figuur 5.3:** Nieuwe opstelling gepositioneerd op de golfgoot

Er worden twee types vlotters getest, beiden met een diameter van 31,5 cm. Figuur 5.4 geeft deze schematisch weer. De eerste vlotter is een halve bol, met daarboven een cilindrisch



stuk. De tweede vlotter is analoog aan de eerste, maar met een kegel met een tophoek van  $90^\circ$  onderaan. Beiden worden getest op 3 verschillende diepgangen. Deze worden uitgedrukt als diepgang van het cilindrisch gedeelte, genaamd:  $d_{3,15}$ ;  $d_{6,3}$  en  $d_{12,6}$ . De eerste diepgang is 3,15 cm van het cilindrisch gedeelte, overeenstemmend met een diepgang van het cilindrisch gedeelte van 0,5 m in werkelijkheid (3 m totale diepgang). Analoog stelt  $d_{6,3}$  en  $d_{12,6}$  overeen met een werkelijke diepgang van het cilindrisch gedeelte van 1 m (3,5 m totale diepgang) en 2 m (4,5 m totale diepgang) respectievelijk. De reden waarom er twee vlotters getest worden is hun verschil in gedrag. Om tot de kleinst mogelijke wervelvorming te komen bij een dompbeweging is de bolvormige vlotter het voordeligst. Uit hydrodynamisch standpunt is echter de kegelvormige vlotter veel beter: de excitatiekrachten zullen veel groter zijn (zie ook verder).

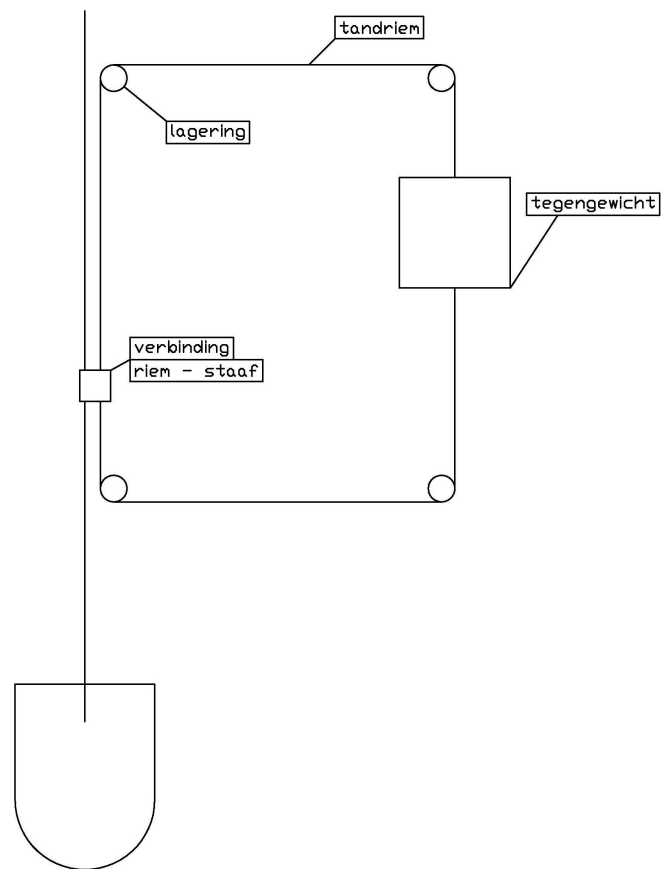


**Figuur 5.4:** Verschillende geteste vlotters

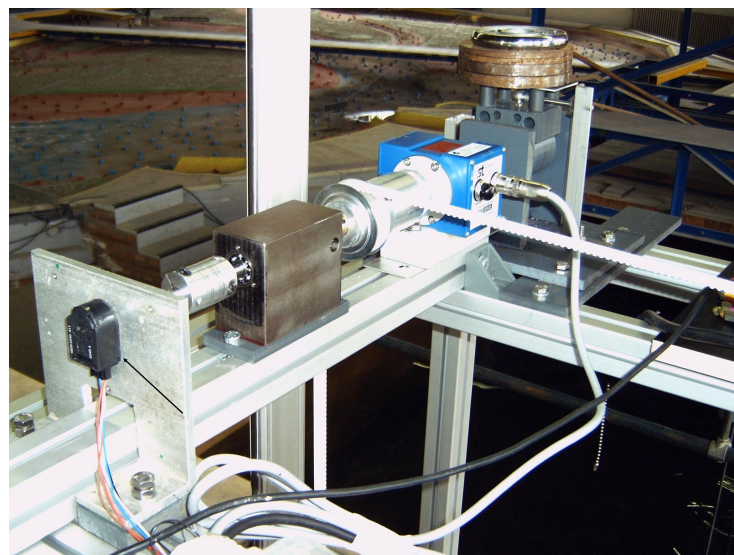
Schematisch ziet de constructie er uit als op figuur 5.5. De werking is analoog aan deze van de oude opstelling.

Op de nieuwe opstelling zitten 3 elektrische sensoren die de bewegingen en en krachten opmeten. De sensoren zenden een signaal met een bepaald voltage uit naargelang de waarde van de registratie. De signalen van de verschillende sensoren worden in een microprocessor vertaald naar kolommen met hexadecimale getallen. Op zijn beurt zendt de microprocessor deze signalen door naar een laptop. Via het programma *HyperTerminal* worden de signalen gecaptureerd in een tekstbestandje.

De eerste sensor is de optische encoder. Hij is aangeduid met een pijl op figuur 5.6. Deze sensor meet de rotatie van de horizontale as, verbonden via de tandriem aan de vertica-



**Figuur 5.5:** Schematisch overzicht opstelling

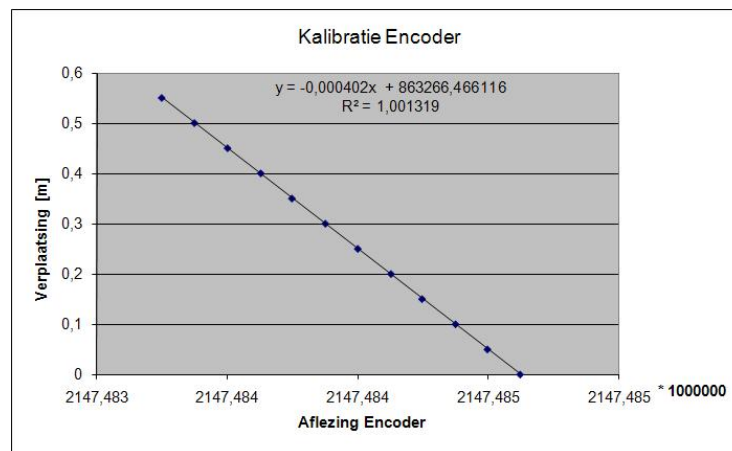


**Figuur 5.6:** De encoder meet de verplaatsing

le staaf waar de vlotter op zit. De aflezing van de encoder wordt gelinkt aan verticale verplaatsing door ijking van de encoder. Daarvoor wordt de verticale staaf over opeenvolgende afstanden van 5 cm verplaatst. De aflezing van de encoder  $x$  [decimaal getal] en de werkelijke verplaatsing  $y$  [in m] zijn gelinkt door het volgende lineaire verband:

$$y = ax + b \quad (5.1)$$

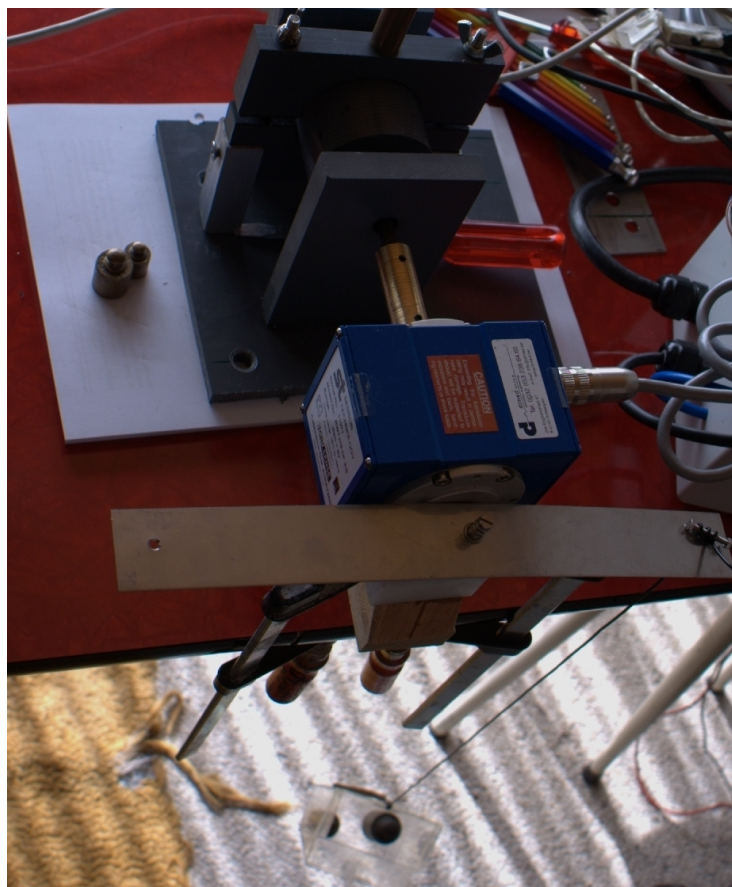
Van de parameters  $a$  en  $b$  is enkel de richtingscoëfficiënt  $a$  van belang: er wordt steeds met verplaatsingsverschillen  $\Delta y$  gerekend, zodat  $b$  geen invloed heeft. Figuur 5.7 toont de bepaling ervan.



**Figuur 5.7:** Kalibratie van de optische encoder

De tweede sensor in het systeem is de koppelmeter. Dit toestel meet het koppel dat door de demper uitgeoefend wordt op de horizontaal draaiende as. Ook dit meettoestel dient geijkt te worden. Dit gebeurt door gewichtjes met gekende massa op te hangen met een bepaalde hefboomsarm aan de uitgaande as van de koppelmeter. De ingaande as (bovenaan op figuur 5.8) wordt geblokkeerd zodanig dat de assen niet kunnen roteren. Wederom geldt de betrekking (5.1), nu is  $y$  het aangebrachte koppel. Figuur 5.8 toont de ijking van de koppelmeter. Onderaan is een bakje waarin nauwkeurig gemeten (op 0,1 g) gewichtjes worden aangebracht. Het bakje hangt aan een draad: dit maakt dat de hefboomsarm van het koppel met grote nauwkeurigheid opgemeten kan worden (op 0,1 mm). Het verschil in aflezing tussen een leeg bakje en een bakje met een bepaald gewicht erin wordt bepaald.

Een laatste sensor is een krachtsensor. Deze werd vroeger gebruikt om de dempingskracht op te meten. Door gebruik van de koppelmeter is hij overbodig geworden. Nu wordt hij



**Figuur 5.8:** Kalibratie van de koppelmeter

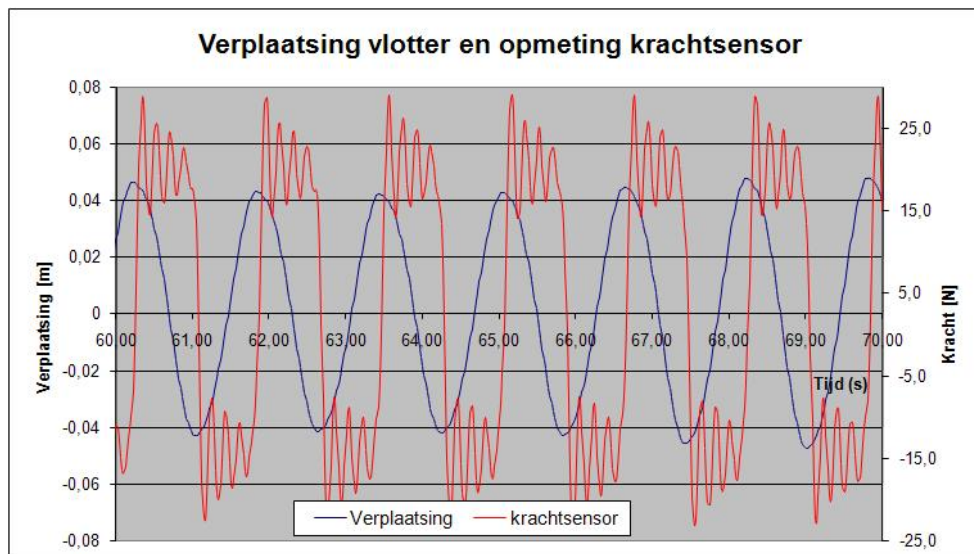
gebruikt ter controle van het koppelmetersignaal. Figuur 5.9 toont de krachtsensor. In sectie 5.2.3 wordt de werking van de krachtsensor in detail uitgelegd.



**Figuur 5.9:** Detail van de krachtsensor (blauw met omgekeerd cijfer 3 erop)

Er werd overgeschakeld van een krachtsensor naar een koppelmeter omdat die op een *rechtstreekse* manier het *volledige* opmeet, uitgezonderd de dempings door inwendige wrijving. De krachtsensor daarentegen meet de horizontale kracht die door de demper uitgeoefend wordt (zie sectie 5.2.3). Om de dempingskracht op te meten, wordt de krachtsensor over een bepaalde afstand van enkele mm ingedrukt of uitgetrokken. Bij zware dempingskrachten zorgt deze beweging echter voor een grote trilling in de sensor, waardoor de kracht niet meer goed opgemeten wordt. Figuur 5.10 toont de opmeting van de dempingskracht bij een sinusoidale verplaatsing van de vlotter. De dempingskracht is onafhankelijk van de snelheid van de vlotter, enkel het teken verandert wanneer de bewegingszin van de vlotter verandert. Zonder trillingen is het opgemeten signaal dus een blok golf. Er kunnen ook wrijvingscomponenten optreden die de krachtsensor niet opmeet, zoals wanneer de demper tegen de constructie komt (zoals zichtbaar op figuur 5.11). Deze wrijving meet de koppelmeter in theorie wel op, waardoor deze een beter resultaat geeft. De karakteristieken van de koppelmeter zijn in bijlage A weergegeven.





**Figuur 5.10:** Trillingen in de krachtsensor verstoren de theoretische blok golf



**Figuur 5.11:** Het pvcstukje glijdt tegen de verticale plaat waardoor extra wrijving ontstaat

## 5.2 Eigenschappen nieuwe opstelling

Eerst wordt getracht om de parameters  $m$ ,  $m_a$  en  $m_{sup}$  te vinden die in de bewegingsvergelijking (4.24) voorkomen.  $m$  is de massa nodig om de diepgang te bereiken, het displacement van de vlotter. Theoretisch is het displacement voor een diepgang van het cilindrisch stuk  $z$  gelijk aan (5.2a) voor de bolvormige vlotter en (5.2b) voor de kegelvorm (met  $r$  de straal van het cilindrisch stuk):

$$m = \rho_w g \left( \frac{1}{2} \frac{4}{3} \pi r^3 + \pi r^2 z \right) \quad (5.2a)$$

$$m = \rho_w g \left( \frac{1}{3} \pi r^2 \cdot r + \pi r^2 z \right) \quad (5.2b)$$

De waarden van  $m$  voor de geteste diepgangen d3,15; d6,3 en d12,6 zijn weergegeven in tabel 5.3. Er is een afwijking te zien tussen de berekende en experimentele waarde van  $m$ . De experimentele waarde is het gewicht waarbij op het zicht de juiste diepgang bereikt wordt. Het verschil ontstaat omdat zowel kegel als bol niet perfect de opgelegde vorm hebben. De verschillen zijn echter klein.

	Bol			Kegel		
	d3,15	d6,3	d12,6	d3,15	d6,3	d12,6
m theoretisch [kg]	10,638	13,092	18,002	6,546	9,001	13,911
m experimenteel [kg]	10,221	12,771	17,771	6,255	9,055	13,555

**Tabel 5.3:** Bepaling waarden  $m$

$m_a$  is de toegevoegde massa. Ze wordt numeriek bepaald, of men kan ze afleiden uit *decay testen* (zie verder). De laatste parameter  $m_{sup}$  is de supplementaire massa toegevoegd aan het systeem om de eigenfrequentie te wijzigen. Voor theoretisch optimale energieabsorptie in regelmatige golven wordt  $m_{sup}$  berekend uit vergelijking (4.40), die beschrijft dat de eigenfrequentie van het systeem gelijk is aan de invallende golf frequentie, m.a.w. het systeem is in resonantie.

$$\omega = \omega_n \equiv \sqrt{\frac{c}{m + m_a + m_{sup}}} \quad (5.3)$$

$c$  is de veerconstante van het systeem. De veerkracht is in dit geval de resultante van de opdrijvende kracht (Eng: buoyancy force) en de zwaartekracht werkend op het lichaam

wanneer men het lichaam uit de evenwichtspositie brengt. Men noemt dit ook nog de hydrostatische herstelkracht. In een lineaire benadering, zoals hier het geval is, is de veerkracht evenredig met de verticale verplaatsing,  $c$  is dus constant. De hydrostatische herstelkracht wordt in dit geval:

$$F = c \cdot \Delta z = \rho g A \cdot \Delta z \quad (5.4)$$

met  $A$  de horizontale oppervlakte van de vlotter  $\pi D^2/4$  en  $\Delta z$  is de verticale verplaatsing uit de evenwichtstoestand. Voor de geteste vlotters is  $c$  gelijk aan:

$$c = \rho g \frac{\pi D^2}{4} = 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ N/kg} \cdot \frac{\pi 0,315^2}{4} \text{ m}^2 = 764,5 \text{ N/m} \quad (5.5)$$

Er wordt gerekend met een massadichtheid van het water van  $1000 \text{ kg/m}^3$  omdat de proeven uitgevoerd worden in zoet water. Voor berekeningen op ware schaal moet men hiervoor de massadichtheid van zeewater nemen.

Met gekende  $c$ ,  $m$  en  $m_a$  is het dan mogelijk om  $m_{sup}$  te bepalen zodanig dat aan (5.3) voldaan is. Omdat de supplementaire massa een constante is, zal in onregelmatige golven het systeem niet steeds in resonantie zijn. De bedoeling is dan om een optimale waarde te vinden voor elke Hs-klasse.

### 5.2.1 Toegevoegde massa en dempingsfactor

Met behulp van een decay test kan men  $m_a$  en de dempingsfactor  $\zeta$  van in (4.31) bepalen. Bij een decay test wordt de vlotter vanuit evenwichtspositie over een afstand  $z = 0,15 \text{ m}$  ondergedompeld en dan abrupt losgelaten. De bewegingsvergelijking die de vlotter dan beschrijft is een gedempte trilling zoals in sectie 4.2.3 beschreven werd.

$$z(t) = a \exp(-\zeta \omega_n t) \sin(\omega_p t + \phi) \quad (5.6)$$

De waargenomen beweging wordt aan (5.6) gefit. Met gekende  $m$ ,  $m_{sup}$  en de gevonden  $\omega_n$  kan men dan via (5.3) de toegevoegde massa  $m_a$  berekenen. Door deze proef te herhalen voor verschillende waarden van supplementaire massa kan de variatie van de dempingsfactor  $\zeta$  en de toegevoegde massa  $m_a$  in functie van de natuurlijke frequentie bepaald worden. De waarden van de toegevoegde massa kunnen worden vergeleken met resultaten uit numerieke berekeningen met Wamit [7]. Deze bekomt men door oplossen van het radiatieprobleem, zoals in 4.2.1 werd toegelicht.

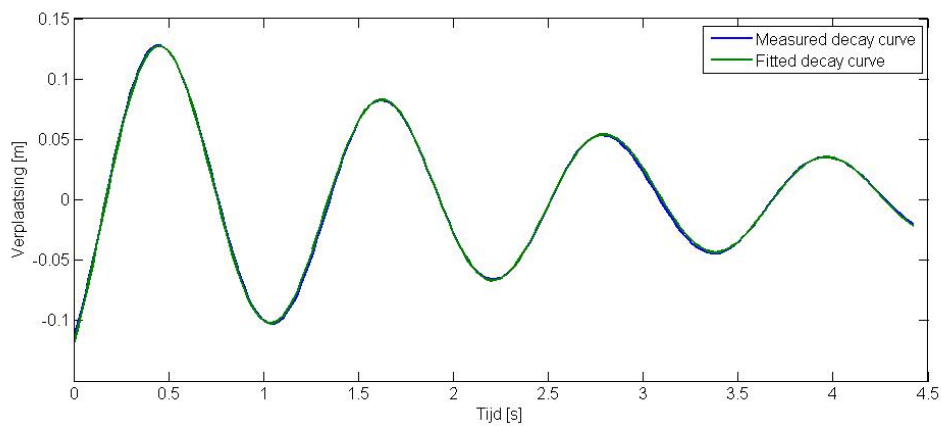


Voor de bolvormige vlotter werden enkele decaytesten uitgevoerd. Voor de drie diepgangen (d3,15; d6,3 en d12,6) werden decaytesten uitgevoerd met verschillende supplementaire massa. Tabel 5.4 toont de resultaten van de fitting van (5.6) aan de verplaatsing. Ook de waarden van de berekende toegevoegde massa zijn weergegeven.

Diepgang cil. stuk [m]	$m$ [kg]	$m_{sup}$ [kg]	$c$ [N/m]	$T_n$ [s]	$\omega_n$ [s <sup>-1</sup> ]	$\zeta$ [-]	$m_a$ [kg]
0,0315	10,2	13,2	764,5	1,23	5,09	0,072	6,08
	10,2	19,2	764,5	1,34	4,68	0,071	5,49
	10,2	31,2	764,5	1,60	3,92	0,061	8,27
0,063	12,8	8,1	764,5	1,17	5,38	0,068	5,53
	12,8	14,1	764,5	1,29	4,87	0,059	5,36
0,126	17,8	6,5	764,5	1,24	5,08	0,045	5,33
	17,8	12,5	764,5	1,35	4,64	0,056	5,23

**Tabel 5.4:** Resultaten decay proeven

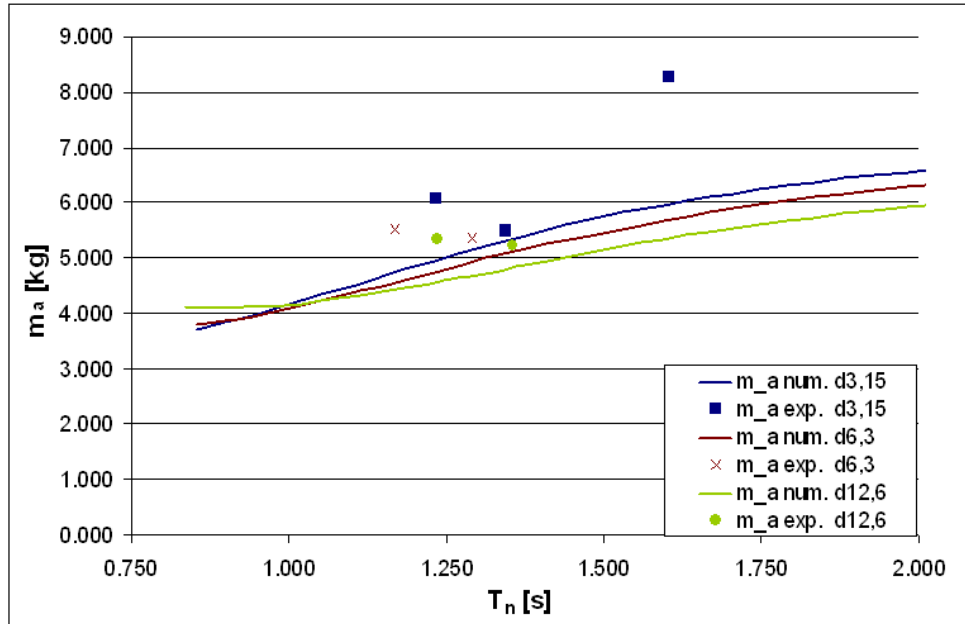
Figuur 5.12 toont grafisch de fitting op een stukje van de verplaatsing van de vlotter voor de decaytest met diepgang van 6,3 cm op het cilindrisch gedeelte en een supplementaire massa van 8,1 kg. De experimenteel waargenomen curve volgt zeer goed de theoretische curve.



**Figuur 5.12:** Resultaat fitting bij een decaytest [6]

Vergelijking van bovenstaande getalwaarden van de toegevoegde massa met numeriek be-

rekende waarden levert de grafiek uit van Figuur 5.13. De figuur toont dat de numeriek berekende waarde kleiner is dan deze gevonden uit de decaytesten. De meetpunten van de decaytesten zijn echter niet talrijk genoeg om een gedetailleerde vergelijking te maken.



**Figuur 5.13:** Vergelijking van numerieke en via decaytesten berekende waarde van de toegevoegde massa

Uit de dempingsfactor  $\zeta$  kan men met behulp van (4.29) de dempingsfactor  $b$  bepalen:

$$b = 2\zeta \sqrt{c(m + m_a + m_{sup})} \quad (5.7)$$

In deze waarde van  $b$  zit zowel de hydrodynamische dempingsfactor  $b(\omega)$  als een dempingscoëfficiënt ten gevolge van de inwendige wrijving. Hoewel de wrijving quasi onafhankelijk is van de snelheid, benadert men deze toch als evenredig met de snelheid. Uit eigen proeven in regelmatige golven zonder externe demping was het mogelijk om de dempingscoëfficiënt van de wrijving te bepalen. De hydrodynamische dempingscoëfficiënt is dan het verschil van de waarde bepaald met (5.7) en de dempingscoëfficiënt ten gevolge van de wrijving. Numeriek berekende resultaten uit Wamit, gekregen van Griet De Backer, van de hydrodynamische dempingsfactor maken het mogelijk om een vergelijking te maken tussen numeriek en experimenteel. Tabel 5.5 toont de resultaten.

De tabel toont dat de resultaten voor de experimenteel bepaalde waarde van de hydrody-

namische dempingscoëfficiënt niet mooi overeenkomt met de numeriek berekende waarde. De reden hiervoor is dat enerzijds de fitting van de parameters sterk afhankelijk is van aan welk stukje uit de opgemeten beweging gefit wordt, en anderzijds de grote onzekerheid op de dempingscoëfficiënt ten gevolge van de wrijving. Deze heeft dan nog dezelfde grootteorde van de hydrodynamische dempingscoëfficiënt.

## 5.2.2 Inwendige wrijving

De inwendige wrijving wordt bepaald van het systeem wanneer het *op het droge* staat. Eerst wordt gepoogd om het systeem van staaf en bakje in evenwicht met elkaar te brengen door extra gewicht toe te voegen in het bakje. Vervolgens bevestigt men aan de staaf of het bakje een extra gewicht van 1 kg. Door dit extra gewicht ontstaat een valbeweging. De bewegingsvergelijking van deze beweging is:

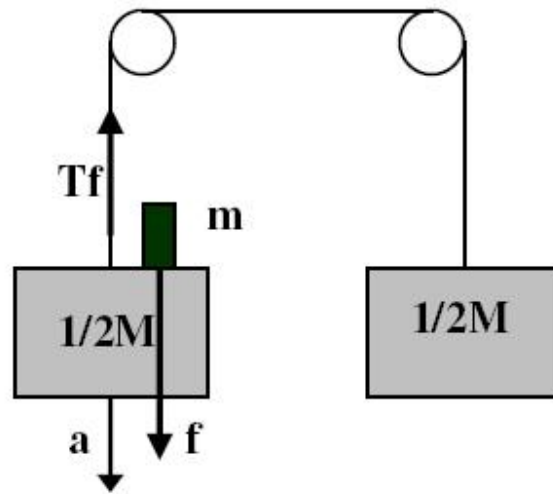
$$(M + m) \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = f - T_f = mg - T_f \quad (5.8)$$

De verklaring van  $M$ ,  $m$  en  $T_f$  zijn te vinden op figuur 5.14. De waarde voor  $\frac{\partial^2 z}{\partial t^2}$  kan gevonden worden door de geregistreeerde verplaatsing  $z(t)$  twee maal af te leiden. Doordat als verplaatsingsfunctie een 2<sup>de</sup> graadsfunctie gekozen wordt, is de versnelling een constante.

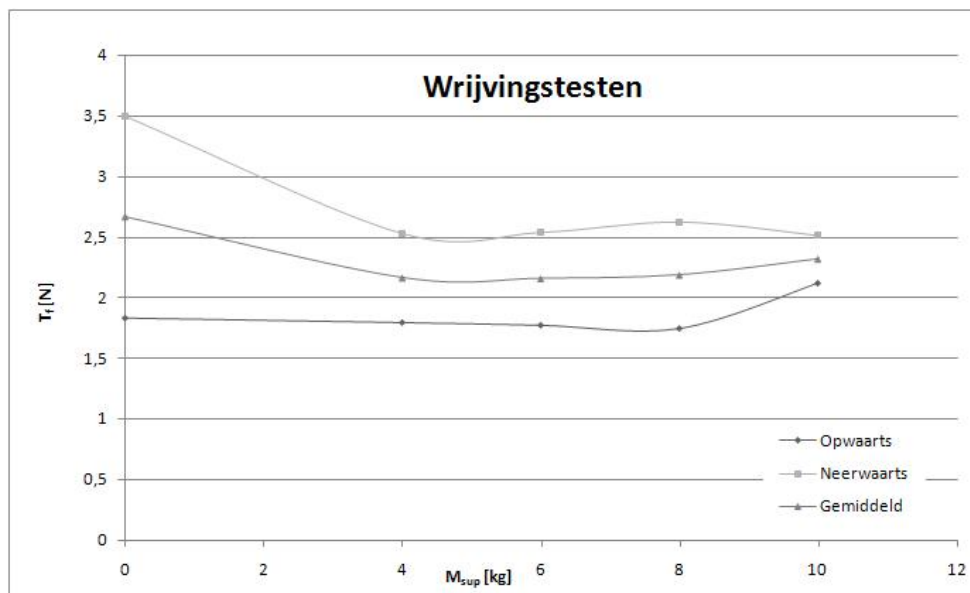
Door  $M$  te vergroten, kan men de wrijvingskracht bepalen voor verschillende waarden van supplementaire massa. Omdat er heel wat variatie zit op de wrijvingsmetingen zijn een aantal herhalingen van de wrijvinstesten uitgevoerd. Het uiteindelijke resultaat ervan is te zien in figuur 5.15.

Diepg. [m]	$m_{tot}$ [kg]	$\zeta$ [-]	$b_{exp.}$ [kg/s]	$b_{wrijv.}$ [kg/s]	$b_{hydr,exp}$ [kg/s]	$b_{hydr,num}$ [kg/s]
0,0315	29,48	0,072	21,763	8,750	13,013	12,627
	34,89	0,071	23,293	8,750	14,543	11,651
	49,67	0,061	23,669	8,750	14,919	9,275
0,063	26,43	0,068	19,308	9,914	9,394	10,979
	32,26	0,059	18,555	9,914	8,641	10,540
0,126	29,63	0,045	13,655	10,200	3,455	7,849
	35,53	0,056	18,412	10,200	8,212	7,830

**Tabel 5.5:** Vergelijking van de numeriek en experimenteel bepaalde waarden voor de hydrodynamische dempingscoëfficiënt bij de bolvormige vlotter



**Figuur 5.14:** Schematisch overzicht wrijvingsproef, [27]



**Figuur 5.15:** Resultaten wrijvingstesten

Opmerkelijk is dat het systeem minder inwendige wrijving vertoont bij een opwaartse beweging van de vlotter, dan bij een neerwaartse beweging. Verder toont de grafiek aan dat de wrijving ongeveer constant blijft bij toenemende supplementaire massa.

### 5.2.3 Dempingskracht

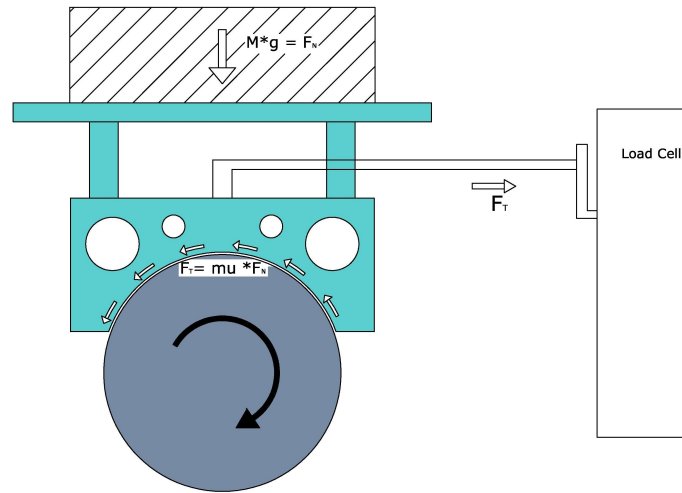
De demping wordt geregeld door een wrijvingskracht op een horizontale as, verbonden aan de beweging van de vlotter via een tandwiel. Figuur 5.17 toont een detailfoto van de demper.

De demper is een vormpje uit plastic, met een cirkelsegment onderaan waarop een stukje vilt gekleefd is. Dit vilt wrijft over het roterende cilindrische stuk. Hoe meer gewicht op het plastic vormpje ligt, hoe groter de gerealiseerde demping ( $F_T = \mu F_N$ ). Figuur 5.16 toont schematisch de werking van de demper. De dompbeweging van de vlotter zorgt voor een rotatie van de cilinder, weergegeven door de zwarte pijl. Het gewicht  $M$  (van het plastic vormpje + het gewicht erop) zorgt voor een wrijvingskracht. De resultante van de tangentiële wrijvingskracht is een horizontale kracht die opgemeten wordt door de krachtsensor.

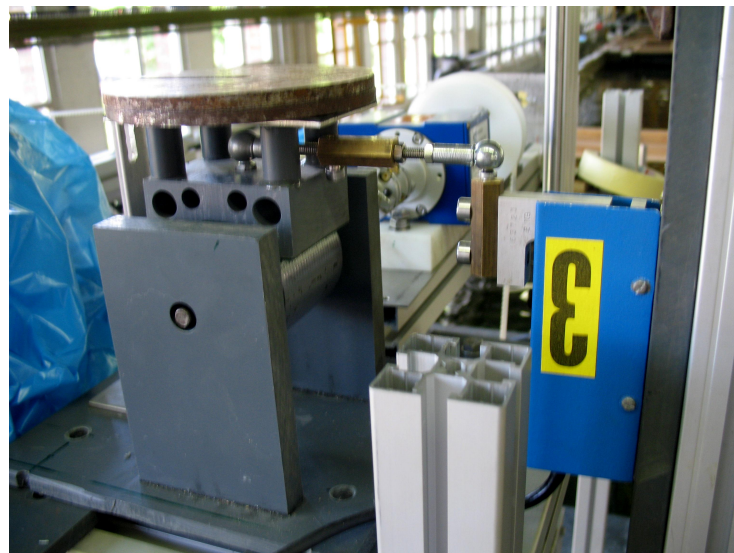
In sectie 4.2.2 werd een hydrodynamische dempingskracht beschouwd evenredig met de snelheid. De hydrodynamische dempingscoëfficiënt  $b_{ext}$  is dus een constante. De demper zoals hij in de constructie ingebouwd zit, geeft echter een constante dempingskracht (als het verschil tussen statische en dynamische wrijvingscoëfficiënt  $\mu$  niet beschouwd wordt). Vooral voor onregelmatige golven heeft dit een nefaste invloed op de energieabsorptie. Door de constante dempingskracht, bijvoorbeeld afgesteld op  $H_s$ , worden kleine golven te sterk gedempt, daar waar grote golven te weinig gedempt worden en er kans op *slamming* ontstaat. In een andere thesis wordt onderzocht om een demping te realiseren die evenredig is met de snelheid [28].

### 5.2.4 Excitatiekracht

Via experimenten werd de golfexcitatiekracht voor de dompmodus bepaald. Om dit te doen werd de vlotter op gewenste diepgang gebracht (in een evenwichtstoestand) en werd hij op deze positie vastgehouden. Een regelmatige golf valt in op de vaste vlotter waardoor er een hydrodynamisch drukveld ontstaat (zie sectie 4.2.1). De resultante van dit drukveld is de (verticale) golfexcitatiekracht. De excitatiekracht kan op een eenvoudige manier bepaald



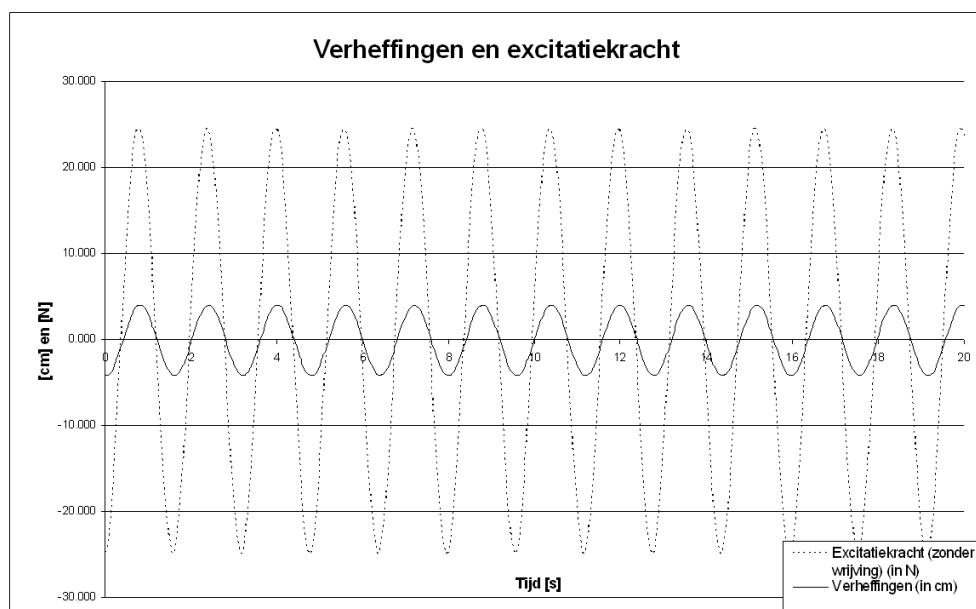
**Figuur 5.16:** Schematische werking van de demper



**Figuur 5.17:** Detail van demper

worden uit de opgemeten waarden door het uitschrijven van een momentenevenwicht. Bij de opgemeten kracht moet ook nog de inwendige wrijvingskracht geteld worden om de totale golfexcitatiekracht te vinden. De proeven gebeurden voor verschillende frequenties, vlottervormen en diepgangen. De gekozen golffrequenties zijn (op schaalmodel) 1,114 s; 1,36 s; 1,596 s en 1,747 s. De geteste diepgangen zijn d3,15 en d12,6 overeenstemmend op ware schaal met een (totale) diepgang van 3 m, respectievelijk 4,5 m.

Figuur 5.18 toont het verloop van de opgemeten excitatiekracht (zonder inwendige wrijving) op de kegelvormige vlotter samen met de opmeting van de invallende regelmatige golf met periode 1,596 s. De diepgang bij deze proef was 3,15 cm van het cilindrisch gedeelte (schaalmodel). De vlotter vertoonde geen verticale verplaatsing.



**Figuur 5.18:** Opgemeten excitatiekracht (zonder inwendige wrijving) voor de kegelvormige vlotter met diepgang d3,15 (schaalmodel)

Figuur 5.19 toont de resultaten van experimenten uitgevoerd op de bolvormige vlotter met twee diepgangen. De volle lijn stelt de diepgang d3,15 voor overeenstemmend met een totale diepgang van 3 m op ware schaal. De stippellijn geldt voor diepgang d12,6. De volle icoontjes zijn experimentele opmetingen, de lege icoontjes stellen de numerieke resultaten voor. De verticale as stelt de amplitude van de excitatiekracht per meter golfamplitude voor. Uit de figuur blijkt dat de excitatiekracht groter wordt naarmate de diepgang mindert, een conclusie die reeds volgde uit theoretische en numerieke beschouwingen. De

verschillen tussen het numeriek en experimenteel behaalde resultaat zijn klein: gemiddeld gezien is de afwijking 10% van het numerieke resultaat. Uit de figuur volgt ook nog dat de opgemeten kracht sterker verschilt voor de golfperiode 1,596 s dan voor de andere periodes. Dit fenomeen werd ook in eerder experimenteel onderzoek waargenomen [27]. De reden is reflectie van golven door de zijwanden van het golfkanaal, die vooral voor golven met een periode van om en bij de 1,6 seconden optreden. Ook in dat onderzoek werd voor de periode 1,747 s een excitatiekracht gevonden die kleiner was dan de numeriek voorspelde waarde. Uit de proeven blijkt voorts dat op het schaalmodel een maximale excitatiekracht van 605 N/m optreedt. Op ware schaal komt dit overeen met een kracht van 152,4 kN per meter golfamplitude.

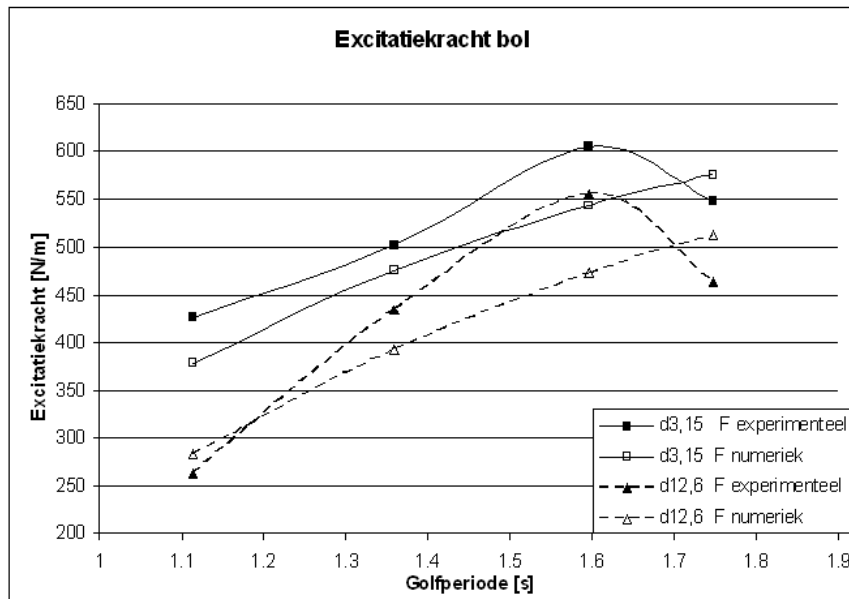
Op de kegelvormige vlotter werden dezelfde proeven uitgevoerd. Uit numerieke berekeningen was reeds gebleken dat de excitatiekrachten op dit lichaam groter waren in vergelijking met de bolvormige vlotter. Figuur 5.20 toont de resultaten. Voor de kegel is de gemiddelde afwijking van het numerieke resultaat nog slechts 6%. Voor de kleine diepgang d3,15 treedt bij de golfperiode 1,596 s hetzelfde fenomeen als bij de bolvormige kegel op. De maximale excitatiekracht bedraagt nu 681,7 N/m, overeenstemmend met een kracht van 171,8 kN/m op ware schaal. Vergelijking met eerder experimenteel onderzoek ([27]) toont aan dat de opgemeten krachten in deze testen iets groter zijn. Ook is bij de huidige experimenten de onzekerheid op de inwendige wrijvingskracht kleiner, omdat de verschillen tussen opwaartse en neerwaartse wrijvingskracht kleiner zijn.

### 5.3 Golfgoot

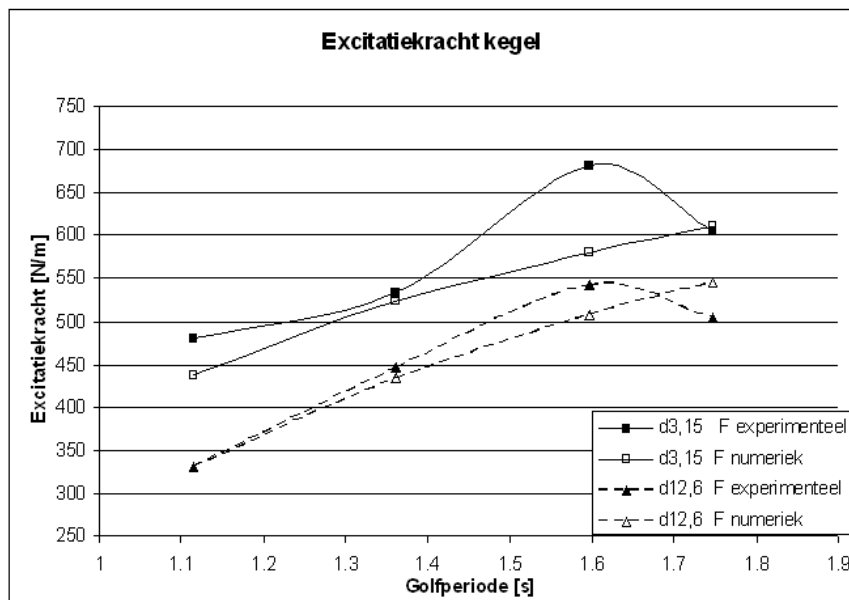
De uitvoering van de proeven gebeurt in de grote golfgoot van het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) in Borgerhout, een instelling van de Vlaamse Overheid. De grote golfgoot heeft een lengte van 70 m, een breedte van 4 m en een hoogte van 1,4 m. De waterstand wordt voor de proeven op 1 m gehouden. De aandrijving van de golfgoot gebeurt via een golfschot, werkend volgens het pistontype. Dit wil zeggen dat het golfschot zicht voor- en achteruit beweegt, zoals een zuiger in een cilinder. Figuur 5.21 toont het golfschot. Biésel en Suquet (1951) stelden een theoretische transferfunctie op die het verband geeft tussen de verplaatsing van het golfschot en de resulterende golfamplitude in de golfgoot.

De vlotter wordt op een afstand van 12 m van het golfschot geplaatst. Op 35 m bevindt zich absorberend materiaal dat ervoor moet zorgen dat de golven zo weinig mogelijk gereflec-





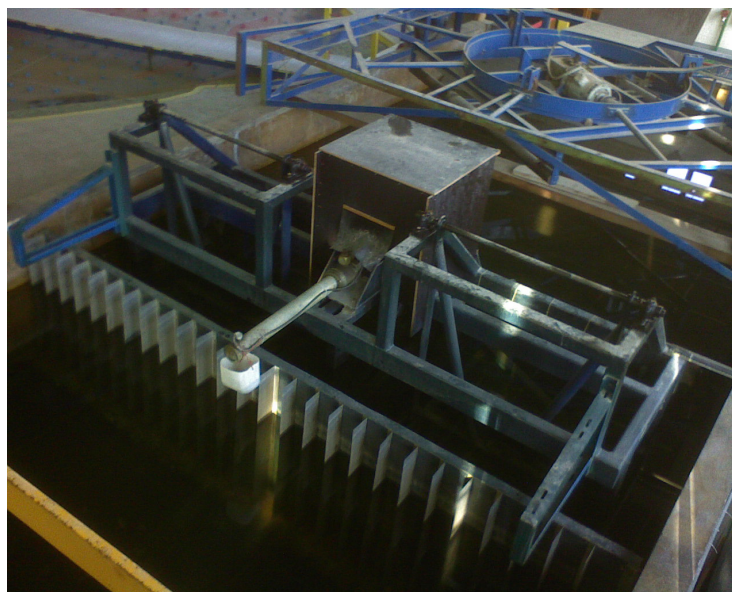
**Figuur 5.19:** Numerieke en experimentele amplitude van de excitatiekracht per meter golfamplitude voor de bolvormige vlotter



**Figuur 5.20:** Numerieke en experimentele amplitude van de excitatiekracht per meter golfamplitude voor de kegelvormige vlotter

teerd worden. Een reflectieanalyse (zie verder) toont aan dat er slechts een kleine reflectie optreedt. In de golfgoot staan ook golfhoogtemeters opgesteld. Door de grote beschikbaarheid aan golfhoogtemeters is er gekozen om 3 golfhoogtemeters voor de opstelling en 1 golfhoogtemeter achter de opstelling te plaatsen. Er werden ook enkele proeven uitgevoerd met de laatste golfhoogtemeter op de plaats van de vlotter. Tijdens deze proeven stond de constructie buiten de goot. Deze proeven dienden om te controleren of het golfschot in staat was om een bepaalde golftrein te reproduceren. Door de golfhoogtemeter op de plaats van de vlotter te positioneren, kan men de golfhoogte op elk moment ter plekke van de vlotter bepalen. Later kan men dan de amplitude van de verticale verplaatsing van de vlotter eenvoudig vergelijken met de golfamplitude zonder daarvoor de tijdreeks van een andere golfhoogtemeter te moeten translateren naar de plaats van de vlotter. Figuur 5.22 toont de posities van de golfhoogtemeters in het golfkanaal.

De golfhoogtemeters moeten elke dag handmatig geijkt worden. Daarvoor wordt een ijkproef uitgevoerd: bij stil water wordt het signaal van de golfhoogtemeter opgemeten, vervolgens worden de meters 5 cm omhoog geheven en wordt opnieuw een meting uitgevoerd. Tot slot wordt dit nog eens herhaald voor een heffing van 10 cm. Als het waterniveau in de golfgoot 1 m is, dan wil men dat de golfhoogtemeters achtereenvolgens 1 m; 0,95 m en 0,90 m weergeven. Via opnieuw vergelijking (5.1) toe te passen kunnen de waarden voor

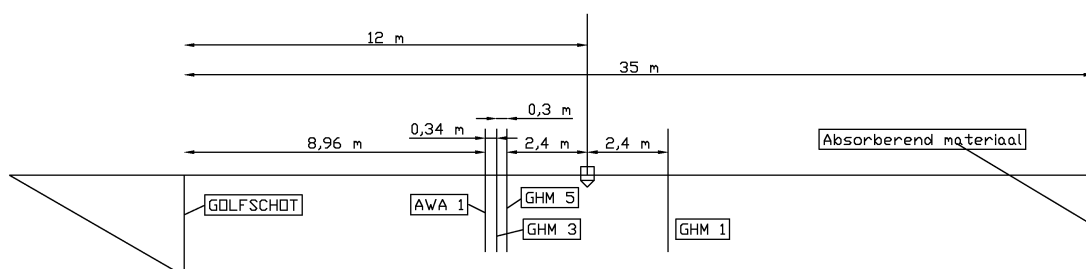


**Figuur 5.21:** Golfschot in de golfgoot van het WL

a en b berekend worden. Nu is de parameter b wel van belang omdat absolute waarden van waterpeilen dienen worden gemeten, en niet alleen de verschillen. Na een ijking wordt steeds een nulmeting uitgevoerd: er wordt een nieuwe meting van het stil water uitgevoerd. Als het resultaat van deze meting buiten 1 mm van de ware hoogte valt, dan wordt er opnieuw geijkt. De golfhoogtemeters voldeden altijd aan deze nulmeting, enkel dient een minpunt opgemerkt te worden. Tijdens een nulmeting, met stil waterpeil, werd door de golfhoogtemeters toch een signaal opgemeten met een variatie van gemiddeld 3 mm, hoewel het gemiddelde van deze waarden steeds binnen de 1 mm van het ware peil ligt. Die variatie van 3 mm is eigenlijk het verschil tussen de minimum en maximum opmeting, de gemiddelde variatie tijdens een meting is veel kleiner.

Van de golven waar golfenergieabsorptieproeven op gedaan worden, werd een reflectieanalyse gedaan. De gedetailleerde reflectieanalyse van een regelmatige golf met golfhoogte 4,1 cm en periode 1,052 s is te vinden in bijlage B. Tabel 5.6 geeft enkele resultaten weer: ze vergelijkt de inputgegevens met de golfkarakteristieken die het schot genereert en de bijhorende reflectiecoëfficiënt.

Opvallend in de resultaten is dat voor onregelmatige golven de opgemeten significante golfhoogte groter uitvalt dan de inputgolfhoogte, daar waar bij regelmatige golven het omgekeerde vastgesteld wordt. Het laatste probleem (outputgolfhoogte kleiner dan inputgolfhoogte) is een gekend probleem van het golfschot. Het eerste probleem (significante opgemeten golfhoogte groter dan inputgolfhoogte) valt te verklaren door onvolledige absorptie van energie op het einde en, vooral, door reflectie aan de zijkanten van de golfgoot. Daardoor wordt een deel van de energie gereflecteerd waardoor er opbouw van energie kan ontstaan.



**Figuur 5.22:** Positie golfhoogtemeters in het golfkanaal

Deze laatste bevinding wordt gestaafd wanneer het opgemeten golfsignaal van een onregelmatige golf, met  $H_s = 7,9$  cm en  $T_p = 1,55$  cm, geanalyseerd wordt in WaveLab. Het is een meting van 400 seconden aan 25 Hz. Indien er blokken van 80 seconden beschouwd worden, voortschrijdend per 40 seconden, dan stijgt de waarde van  $H_s$  per blok. Tabel 5.7 toont de waargenomen stijging. Figuur 5.23 toont voor enkele blokken de golfverheffingen en de opgemeten waarde van  $H_s$ .

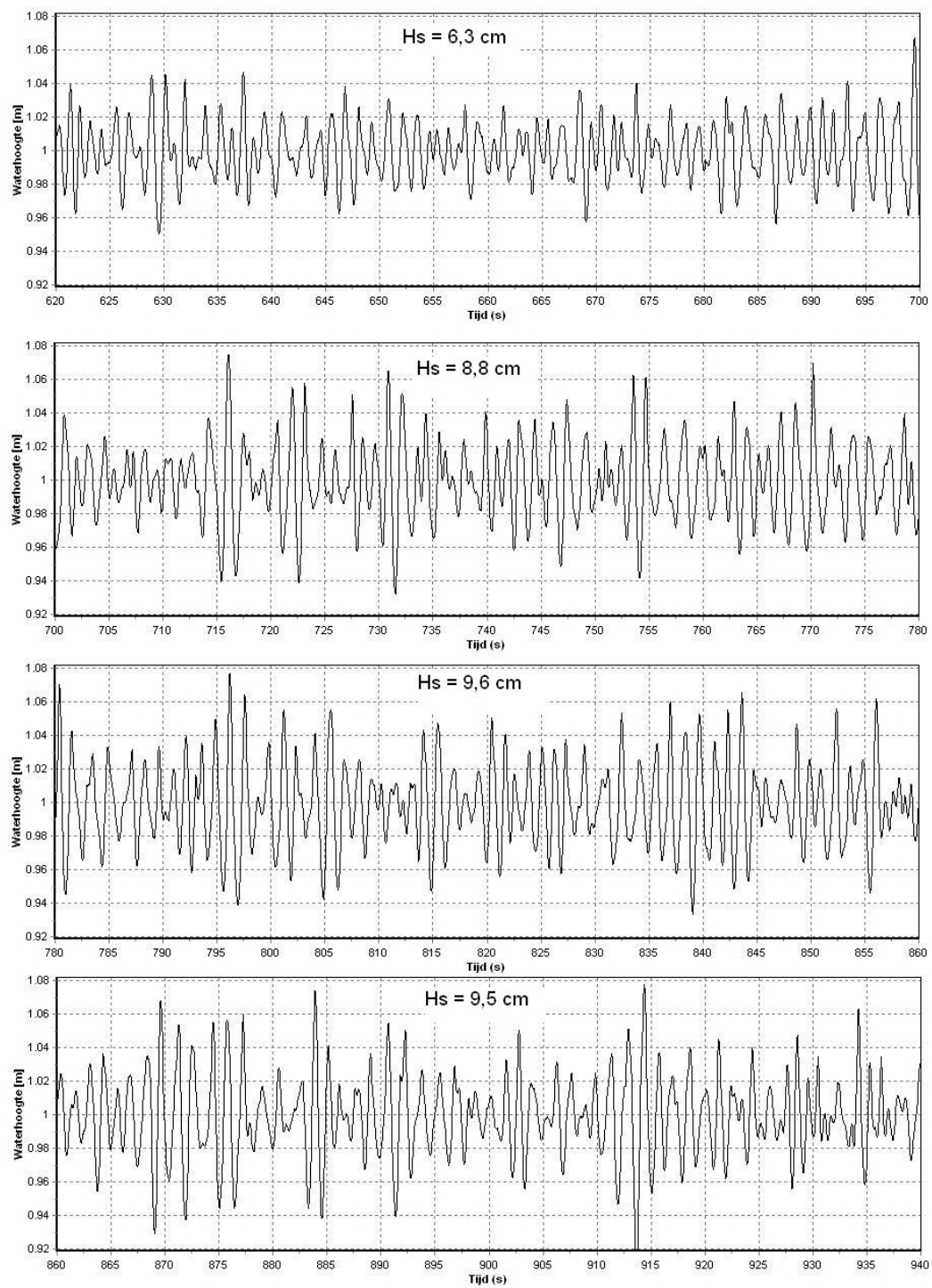
Om de golfenergie van onregelmatige golven te bepalen zal bijgvolg ook per blok moeten gekeken worden in plaats van naar de volledige opmeting. De keuze van de lengte van dit

Regelmatig	Input		Output		
	H [cm]	T [s]	H [cm]	T [s]	Cr [-]
	4,1	1,052	3,522	1,053	0,044
	8,1	1,268	6,682	1,268	0,127
	12,2	1,360	10,353	1,358	0,091
	12,2	1,596	10,233	1,597	0,169
Onregelmatig	Hs [cm]	Tp [s]	Hs [cm]	Tp [s]	Cr [-]
	4,7	1,55	5,48	1,575	0,122
	7,9	1,55	9,14	1,575	0,141
	11	1,713	13,02	1,575	0,163

**Tabel 5.6:** Reflectieanalyse op enkele golven

begintijd	eindtijd	Hs
[s]	[s]	[cm]
20	100	6,3
60	140	8,1
100	180	8,8
140	220	9,5
180	260	9,6
220	300	9,7
260	340	9,5
300	380	9

**Tabel 5.7:**  $H_s$  stijgt naarmate tijd toeneemt



**Figuur 5.23:** Opgemeten signaal van de verheffingen ( $H_s$  input = 7,9 cm,  $T_p$  = 1,55 s)

blok wordt in een later hoofdstuk toegelicht.

# Hoofdstuk 6

## Optimale pointabsorber karakteristieken: experimentele bepaling

### 6.1 Parameters

In sectie 4.2.5 werd analytisch aangetoond welke de optimale karakteristieken zijn om theoretisch maximale energieabsorptie te verkrijgen. In dit hoofdstuk wordt de invloed van drie parameters op de energieabsorptie besproken. Deze parameters zijn de diepgang, de supplementaire massa en de externe demping. Daarnaast worden ook nog eens twee vlottervormen getest (zie figuur 5.4).

#### 6.1.1 Diepgang

Er worden drie diepgangen getest, genaamd  $d_{3,15}$ ;  $d_{6,3}$  en  $d_{12,6}$ ; verwijzend naar de diepgang (in cm) van het cilindrische deel van de vlotter. Vergelijking van testen met enkel een wijziging in diepgang geeft de energieabsorptie in functie van de diepgang. Hoe groter de diepgang, hoe kleiner de golfexcitatiekrachten zullen worden: de wateroverdruk (d.i. de resulterende waterdruk in een golf minus de hydrostatische druk) neemt immers af in de diepte. Hoe groter de amplitude van de golfexcitatiekracht, hoe groter de amplitude van de responsie, dus hoe groter de vlottersnelheden. Grotere snelheden geven aanleiding tot grotere energieabsorptie. De diepgang mag echter ook niet te klein worden: hoe kleiner de diepgang, hoe groter de kans op slamming. De bedoeling is om dit fenomeen te vermijden:

het geeft aanleiding tot zeer grote piekdrukken op de vlotterwand, die tot permanente schade kunnen leiden.

### 6.1.2 Supplementaire massa

De tweede parameter die gevarieerd wordt is de supplementaire massa. In de bewegingsvergelijking (4.23) is te zien dat door variatie van de supplementaire massa, de inertie van het systeem verandert. Eerder werd reeds aangetoond dat theoretisch optimale energieabsorptie optreedt in regelmatige golven als de invallende golffrequentie gelijk is aan de eigenfrequentie van het systeem. Veelal is de totale massa nodig om het systeem in resonantie te krijgen onrealistisch groot (zie verder). Daarom wordt de invloed nagegaan van de eigenfrequentie van het systeem t.o.v. de invallende golffrequentie op de energieabsorptie. Ook werd deze parameter gevarieerd in onregelmatige golven. In een reëel golfklimaat is het immers onmogelijk om de supplementaire massa per golf te variëren zodanig dat het systeem steeds in resonantie is met de invallende golven. Het is de bedoeling om de frequentie te vinden die in een onregelmatige golf, gekenmerkt door zijn (Jonswap)spectrum, optimale energieabsorptie oplevert.

Het systeem zoals het getest wordt, bevat al een bepaalde supplementaire massa. Het geheel van verticale geleidingsstaaf en vlotter heeft voor de diepgang d3,15 al een te grote massa. Daardoor wordt er een tegengewicht voorzien zoals zichtbaar in figuur 5.3. Variatie van dit gewicht maakt het mogelijk om de diepgang te wijzigen. Deze massa zorgt echter ook voor een supplementair gewicht, gezien het een deel van het (te grote) gewicht van vlotter en staaf moet compenseren. Deze massa wordt de supplementaire massa van het systeem,  $M_{ss}$ , genoemd. De supplementaire massa die daarnaast nog aangebracht wordt, noemt men de extra supplementaire massa,  $M_{se}$ :

$$m_{sup} = M_{ss} + M_{se} \quad (6.1)$$

Tabel 6.1 vat voor de twee vlottervormen en de 3 diepgangen de waarden voor  $m$  en  $M_{ss}$  samen.  $m$  is het displacement van de vlotter, zoals bepaald in (5.2a) en (5.2b) en in tabel 5.3. Voor bijna alle diepgangen en vlottervormen moest er extra massa in het tegengewicht gelegd worden. Enkel voor de bolvorm met diameter 12,6 cm van het cilindrisch gedeelte moest er extra gewicht op de vlotter zelf gelegd worden.



Omdat totale supplementaire massa een nietszeggend begrip is, wordt bij vermogensabsorptieproeven de invallende golffrequentie vergeleken met de eigenfrequentie van het systeem:

$$\frac{\omega}{\omega_n} = \frac{\frac{2\pi}{T}}{\sqrt{\frac{k}{m+m_a+m_{sup}}}} \quad (6.2)$$

In de proeven wordt altijd een supplementaire massa gekozen die kleiner of ten hoogste gelijk is aan de massa die nodig is om in resonantie te komen. De reden hiervoor is dat op ware schaal de supplementaire massa om in resonantie te geraken zeer groot is. Tabel 6.2 toont de berekening voor 2 geteste regelmatige golven. Als de bolvormige vlotter in resonantie wil zijn met de invallende golf met reële periode 6,36 s, moet de supplementaire massa 136 ton bedragen. Voor langere golven zal deze waarde nog stijgen!

	diepgang cil. stuk [m]	m [kg]	m vlotter + staaf [kg]	m tegengewicht [kg]	m extra in tegengewicht [kg]	m extra op vlotter [kg]	M <sub>ss</sub> [kg]
bol	0,0315	10,221	16,837	3,266	3,350		13,232
	0,063	12,771	16,837	3,266	0,080		8,132
	0,126	17,771	16,837	3,266		4,200	6,532
kegel	0,0315	6,225	18,321	3,266	8,700		23,932
	0,063	9,055	18,321	3,266	6,000		18,532
	0,126	13,555	18,321	3,266	1,500		9,532

**Tabel 6.1:** Bepaling supplementaire massa van het systeem  $M_{ss}$

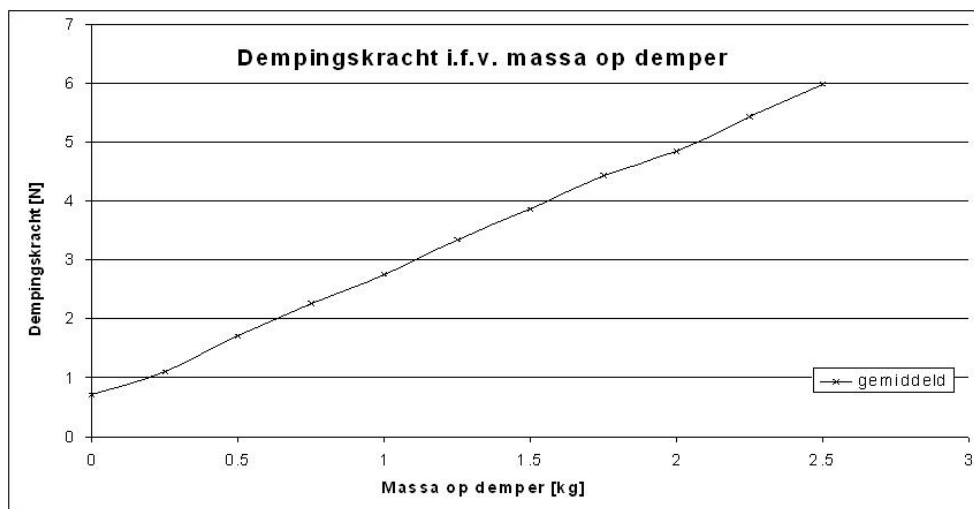
	H [m]		T [s]		$\omega$ [rad/s]		m <sub>sup</sub> totaal	
	schaal	model	schaal	model	schaal	model	schaal [kg]	model [ton]
bol	0,122	1,937	1,36	5,42	4,620	1,160	17,92	72
	0,122	1,937	1,596	6,36	3,937	0,988	30,88	123
kegel	0,122	1,937	1,36	5,42	4,620	1,160	21,09	84
	0,122	1,937	1,596	6,36	3,937	0,988	34,00	136

**Tabel 6.2:** Bepaling supplementaire massa op ware schaal

### 6.1.3 Externe demping

De derde en laatste parameter is de externe demping. Vergelijking (4.39a) toonde analytisch aan dat optimale energieabsorptie optreedt als de externe demping gelijk is aan de hydrodynamische demping. Experimentele resultaten tonen echter aan dat de externe demping veel groter mag zijn dan de hydrodynamische demping. Variatie van de externe demping gebeurt door de gewichtjes die op het pvc hulpstukje (zie figuur 5.16) liggen te variëren.

Om de resultaten bevattelijk voor te stellen, is het de gewoonte om ofwel de (amplitude van de) dempingskracht voor te stellen, ofwel de externe dempingscoëfficiënt  $b_{ext}$ . Gezien de dempingskracht onafhankelijk is van de snelheid, is dit signaal een blok golf waarvan de amplitude enkel afhankelijk is van het aangebrachte gewicht. Voorafgaand aan de proeven in de golfgoot werd al bepaald wat de dempingskracht is voor een groot aantal dempingsgewichtjes. Figuur 6.1 toont de opgemeten dempingskracht in functie van het aangebrachte gewicht.



**Figuur 6.1:** Dempingskracht in functie van gewicht op demper

De andere manier om de dempingskracht voor te stellen is via  $b_{ext}$ , die beter *equivalente* dempingscoëfficiënt zou heten, omdat de absolute waarde van de dempingskracht nagenoeg constant is. Echter, veronderstellend dat de dempingskracht evenredig is met de snelheid, en dat de vlotterverplaatsing een sinusvorm aanneemt, dan kan men het gemiddeld geabsorbeerd vermogen schrijven als:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) \cdot v(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T b_{ext} v(t) \cdot v(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T b_{ext} \omega^2 z_A^2 \cos^2(\omega t) dt = \frac{1}{2} b_{ext} \omega^2 z_A^2 \quad (6.3)$$

Uitgaande van het geabsorbeerde vermogen kan men dan a posteriori de equivalente externe demping uitrekenen.

$$b_{ext} = \frac{2P}{\omega^2 z_A^2} \quad (6.4)$$

Deze methode is slechts benaderend geldig voor regelmatige golven omdat in een regelmatige golf de snelheid harmonisch oscilleert terwijl de dempingskracht een blokgolf is (de onderstelling was een dempingskracht evenredig met de snelheid). In onregelmatige golven is de berekening via (6.4) al helemaal niet meer geldig, omdat er ook nog eens een snelheidsverschil is tussen de golven onderling.

## 6.2 Proeventabel

Voorafgaand aan vermogensabsorptieproeven werd een proeventabel opgesteld. In die tabel staan voor de geselecteerde golven de bijhorende proeven, gekenmerkt door de variatie in diepgang, supplementaire massa en dempingskracht.

### 6.2.1 Selectie golven

Eerst begint men met de keuze van de golfreinen die gegenereerd moeten worden. Er worden proeven uitgevoerd met regelmatige en onregelmatige golven. De keuze van deze golven gebeurt op basis van golfmetingen op de locatie Westhinder. Het scatterdiagram dat hiervoor gebruikt wordt is gebaseerd op metingen van 01/07/1990 tot 30/06/2004. Een scatterdiagram is een matrix die de voorkomensfrequenties van combinaties van golfhoogtes en periodes bevat. Op basis van dit diagram worden vervolgens een aantal regelmatige en onregelmatige golven gekozen. De keuze hiervan wordt nog bemoeilijkt door de beperkingen van het geteste systeem: zowel de amplitude van de dompbeweging als de optredende excitatie- en dempingskrachten moeten binnen bepaalde grenzen blijven. Anderzijds mogen de amplitudes van de golven ook niet te klein genomen worden, omdat de inwendige wrijving van het systeem dan relatief groot is ten opzichte van de optredende krachten. Uiteindelijk worden op die manier drie regelmatige (nummers 4, 5 en 6) en twee onregelmatige golven (nummers 16 en 17) weerhouden. De nummers verwijzen naar selectie van golven

uit een grotere tabel met proeven die eerder uitgevoerd werden door begeleider Griet De Backer. Tabel 6.3 toont de weerhouden golven. De waarden met het suffix 'input' slaan op de inputwaarden van het golfschot. De volgende kolommen slaan op de gerealiseerde waarden van  $H_{(s)}$  en  $T_{(p)}$  in het gekozen tijdsframe.  $H_{(s),\text{real}}$  en  $T_{(p),\text{real}}$  slaan op de reële golfhoogte en -periode. De modelgolfhoogtes en -periodes kunnen gevonden worden door toepassing van de schaalfactoren uit tabel 5.1.

Regelmatige golven								
nr.	$H_{\text{input}}$ [m]	$T_{\text{input}}$ [s]	H [m]	T [s]	$H_{\text{real}}$ [m]	$T_{\text{real}}$ [s]	f [s <sup>-1</sup> ]	$L_{\text{schaal}}$ [m]
4	0,122	1,360	0,104	1,358	1,651	5,410	0,736	2,814
5	0,122	1,596	0,102	1,597	1,619	6,363	0,626	3,719
6	0,163	1,747	0,144	1,747	2,286	6,960	0,572	4,284

Onregelmatige golven								
nr.	$H_{s,\text{input}}$ [m]	$T_{p,\text{input}}$ [s]	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	$H_{s,\text{real}}$ [m]	$T_{p,\text{real}}$ [s]	$f_p$ [s <sup>-1</sup> ]	$L_{p,\text{schaal}}$ [m]
16	0,079	1,550	0,073	1,463	1,159	5,829	0,684	3,211
17	0,110	1,713	0,107	1,707	1,698	6,801	0,586	4,134

**Tabel 6.3:** Geselecteerde golftreinen

## 6.2.2 Selectie parameters

Na keuze van de golven, volgt de keuze van variatie van de parameters diepgang, toegevoegde massa en dempingskracht voor elke golf. Als de parameter diepgang bekeken wordt, dan worden de meeste proeven gedaan voor de diepgang d6,3. Deze diepgang is een intermediaire toestand tussen de diepgang d3,15 waarvoor de excitatiekrachten het grootst zijn, maar met kans op slamming en de diepgang d12,6 waarvan de kans op slamming klein is, maar ook de excitatiekrachten kleiner zijn. De variatie in toegevoegde massa gaat van geen toegevoegde extra supplementaire massa ( $M_{se} = 0 \text{ kg}$ ) tot de waarde die hoort bij resonantie met de golffrequentie ( $\omega/\omega_n = 1$  in formule (6.2)). Voor sommige proeven dient de supplementaire massa echter beperkt te worden door de grote bewegingsamplitudes, zoals verder zal blijken. De dempingsgewichten worden gevarieerd van  $nc$  (= not connected) tot waarden van 3 kg. Dempen in de modus 'not connected' betekent dat er

geen externe demping uitgeoefend wordt. De demping aanwezig in het systeem is dan deze door de inwendige wrijving.

De volledige proeventabel is bijgevoegd in bijlage D. In de laatste kolommen staan ook de bekomen resultaten.

## 6.3 Regelmatige golven

Onderhavige sectie beschrijft de resultaten van de vermogensabsorptieproeven uitgevoerd in regelmatige golven. Zowel de kegel- als de bolvormige vlotter worden besproken. Onderlinge vergelijking toont aan welke van de twee vlotters de beste absorptie oplevert. Eerst wordt de proef wat verder toegelicht, daarna komt meer info over de berekeningswijze.

### 6.3.1 Beschrijving proef

Een proef over vermogensabsorptie wordt uitgevoerd door golven op te wekken in stilstaand water. Het golfshot van het WL werkt hydraulisch: dit betekent dat bij de start van de proef er een startdruk wordt gezet op het schot. Door deze druk ontstaan er golven, waardoor er een periode van 600 seconden gewacht wordt om het water terug stil te krijgen. Na die 600 seconden worden er gedurende 80 seconden golven gegenereerd. Door onvolledige absorptie en door de reflectie aan de zijkanten van de goot is er een merkbare invloed van de reflectie zichtbaar. Figuur 6.2 toont hoe het weerkaatste signaal zich samenstelt met het gegenereerde signaal: de golfhoogte daalt. Er is merkbaar dat slechts de eerste 40 s van de golfgeneratie bruikbaar zijn. Ook bij het starten van het golfshot is de opgemeten verheffing nog niet regelmatig. Uit de figuur is het duidelijk dat er ongeveer 10 tot 15 s voorbijgaan vooraleer de golf volledig ontwikkeld is. Uit voorgaande bemerkingen volgt dat het tijdsframe voor berekening van de vermogensabsorptie slechts een twintigtal seconden duurt. Bij de berekening wordt dus gekozen voor een frame dat begint 20 s na de golfgeneratie, dus 620 s na de start van de proef, en met een duurtijd van 20 s.

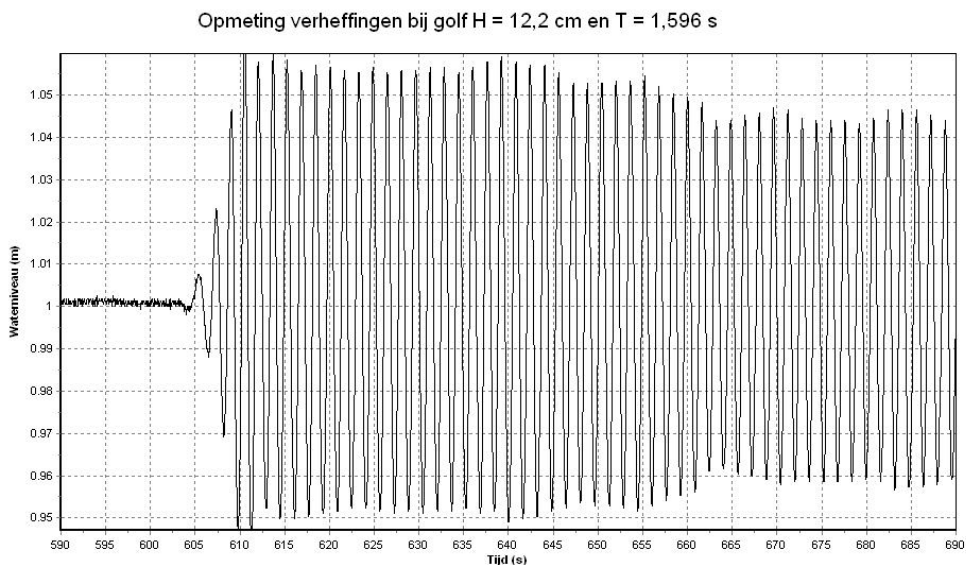
### 6.3.2 Berekeningswijze geabsorbeerd vermogen

Bij elke proef worden door de elektrische meettoestellen de volgende variabelen opgemeten: de verticale dompbeweging, het dempingskoppel, de dempingskracht en de waterhoogte. Uit deze metingen is het de bedoeling om het geabsorbeerd vermogen te bepalen. We kunnen dit berekenen door de (ogenblikkelijke) dempingskracht te vermenigvuldigen met de

(ogenblikkelijke) dompsnelheid. Door deze waarden uit te middelen over een geheel aantal perioden vinden we het gemiddeld geabsorbeerd vermogen. De dempingskracht waarvan sprake is in feite de som van de dempingskracht en inwendige wrijving. Het geabsorbeerde vermogen zoals het verder zal vernoemd worden is dus steeds de som van het reëel geabsorbeerd vermogen en het geabsorbeerd vermogen door de inwendige wrijving. Dit is ook voor het geval van onregelmatige golven geldig.

Een eerste probleem is het vinden van de snelheid van de dompbeweging. Omdat de opmeting van de variabelen gebeurt aan een hoge meetfrequentie van 50 Hz, zal het discreet afleiden van de verplaatsing naar de tijd veel sprongen opleveren, het kan nuttiger zijn om eerst een continue functie door de verplaatsing te fitten. Uit theoretische beschouwingen van het massa-veer-dempersysteem blijkt dat bij een harmonische belasting, de responsie ook harmonisch is met dezelfde frequentie. Omdat de golfexcitatiekracht een harmonische belasting is in regelmatige golven, zal de opgemeten dompbeweging een sinusoidaal verloop aannemen. De gefitte waarde van de verplaatsing wordt:

$$z_{fit}(t) = A \cos(\omega t + \phi) + c = A \cos(\phi) \cos(\omega t) - A \sin(\phi) \sin(\omega t) + c = a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t) + c \quad (6.5)$$

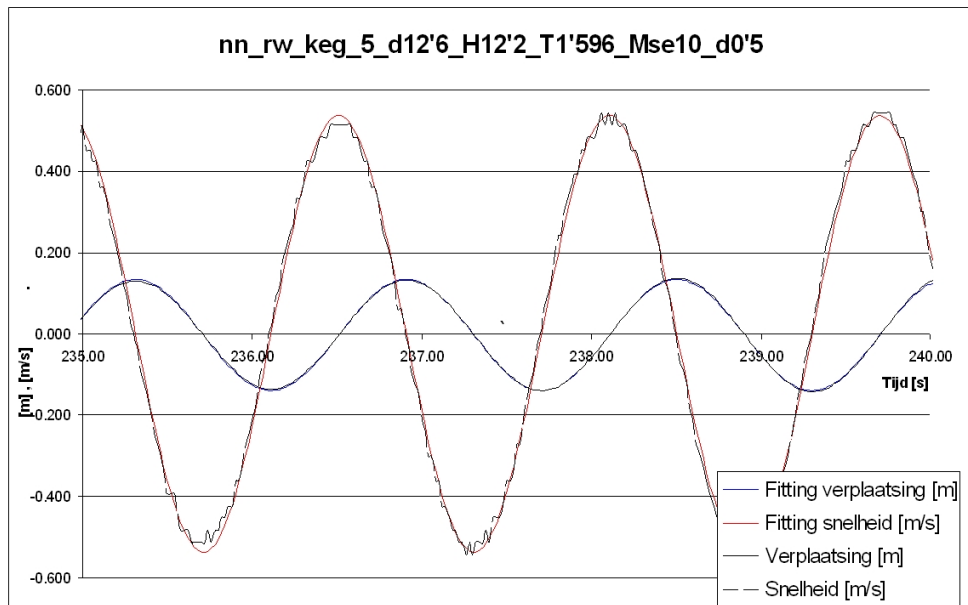


**Figuur 6.2:** De gereflecteerde golf stelt zich samen met de invallende golf waardoor er (plaatselijk) een daling in de golfhoogte ontstaat

De snelheid kan dan gevonden worden door afleiden van de gefitte verplaatsing naar de tijd.

$$v_{fit}(t) = \frac{\partial z_{fit}(t)}{\partial t} = -a\omega \sin(\omega t) + a\omega \cos(\omega t) \quad (6.6)$$

Figuur 6.3 toont aan dat deze fitting zeer goed past op de opgemeten bewegingen.

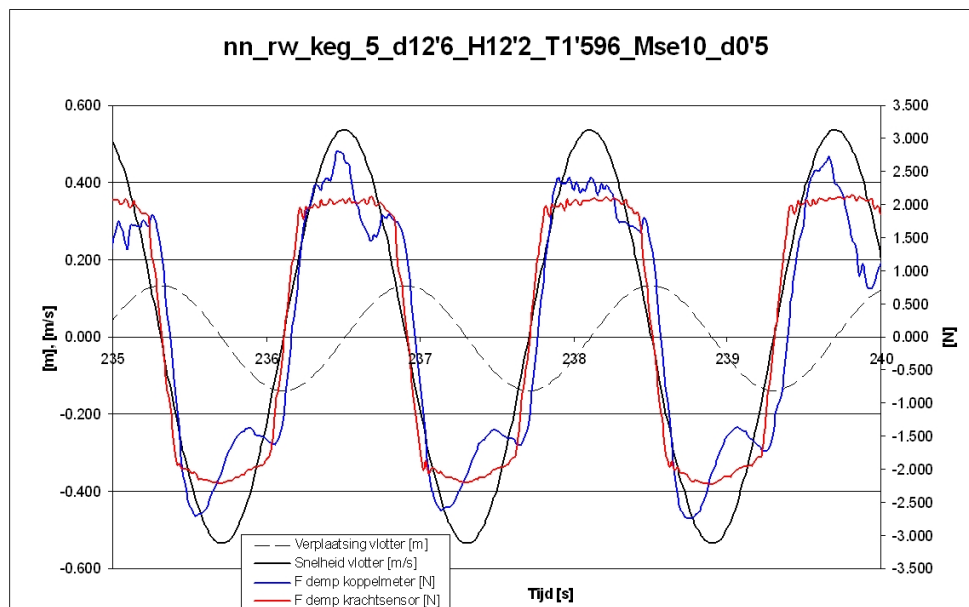


**Figuur 6.3:** Fitting van de verplaatsing en snelheid. Regelmatige golf  $H = 10,2$  cm,  $T = 1,596$  s. Diepgang kegel = 0,284 m

Vervolgens wordt de dempingskracht bepaald, enerzijds op basis van de opmeting van de krachtsensor, anderzijds op basis van de opmeting van de koppelmeter. De opmeting van de krachtsensor en de koppelmeter vertonen soms grote pieken. Bij de krachtsensor komt dit doordat het dempingsgewicht zorgt voor trillingen in de sensor die de opmeting beïnvloeden. Ook bij de overgang van positieve naar negatieve snelheid treedt er een moment op waar de snelheid nul wordt, de statische wrijvingskracht die dan inwerkt is iets groter dan de dynamische, waardoor er een piek kan optreden. Bij de koppelmeter treden er pieken op in de opmeting doordat de draaiende assen niet helemaal concentrisch op elkaar aansluiten. Er komt dan een klein wringkoppel op de as die de meting verstoort. Daarom wordt voor de opmetingen van beide sensoren de opmeting uitgemiddeld over 9 waarden ofwel 0,18 s. De pieken vervallen en toch blijft de meting in het geval van de krachtsensor

een mooie blokgolf vertonen. De koppelmeter geeft niet altijd een blokgolf weer door wringkoppels. Er is dus een klein verschil in het geabsorbeerd vermogen uitgaande van de dempingskracht van de krachtsensor dan wel die van de koppelmeter. Echter, zoals verder zal blijken, zijn deze verschillen over het algemeen verwaarloosbaar klein.

Figuur 6.4 toont enerzijds de verticale verplaatsing van de vlotter en anderzijds de snelheid en de opgemeten dempingskracht. De dempingskracht loopt in fase met de snelheid. De figuren zijn gemaakt voor de proef *nn\_rw\_keg\_5\_d12'6\_H12'2\_T1'596\_Mse10\_d0'5*. Dit is een regelmatige golf met inputgolfhoogte van 12,2 cm en periode 1,596 s waarvan de systeemparameters het volgende zijn: extra supplementaire massa 10 kg en dempingsgewicht 0,5 kg. De vlottervorm is de kegel. De gegenereerde golfhoogte bedroeg 10,2 cm (zie ook tabel 5.6).



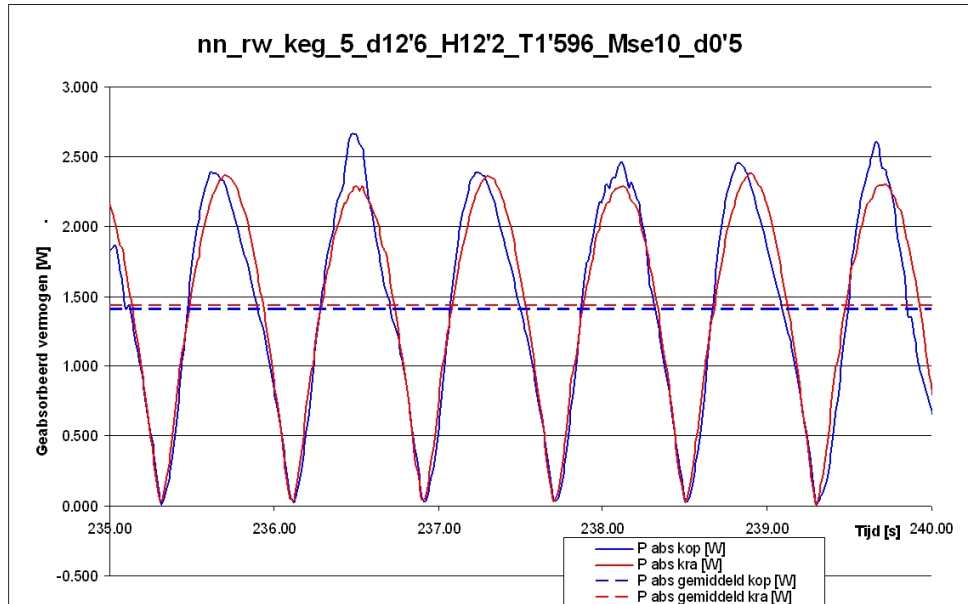
**Figuur 6.4:** De dempingskracht is een blokgolf en verloopt in fase met de verticale vlottersnelheid. Regelmatige golf  $H = 10,2$  cm,  $T = 1,596$  s. Diepgang kegel = 0,284 m

Het geabsorbeerde vermogen wordt berekend door vermenigvuldiging van de dompsnelheid met de totale dempingskracht. Deze laatste is de som van de externe demping en de mechanische wrijving.

Uit berekening blijkt dat, hoewel er een verschil is in opgemeten dempingskracht afhankelijk van het gebruikte meettoestel, het verschil in geabsorbeerd vermogen zeer klein is.



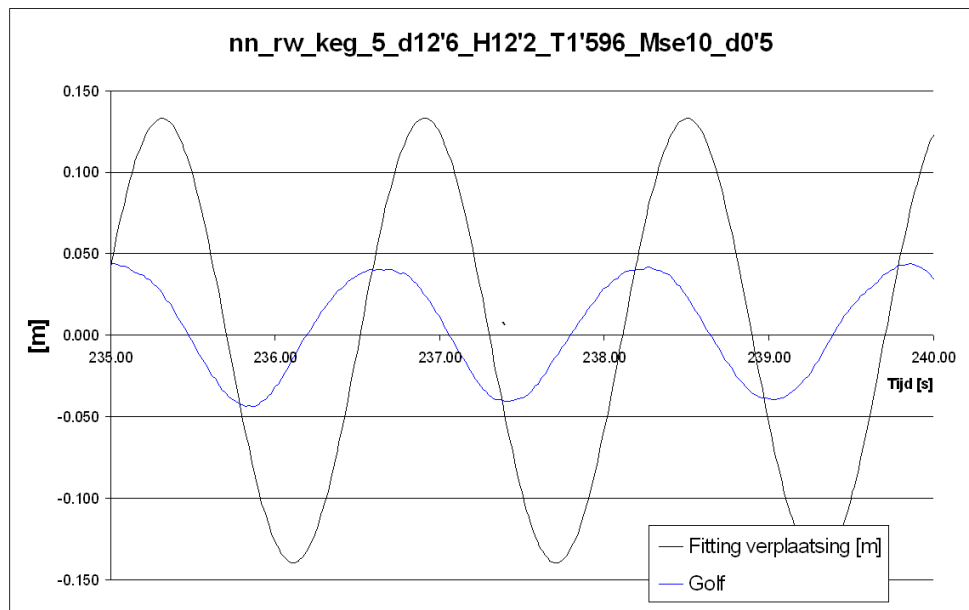
Figuur 6.5 toont het onmiddellijk en het gemiddeld geabsorbeerd vermogen. Het vermogen, waarbij de dempingskracht berekend werd met de krachtsensor is in dit geval 1,437 W, terwijl het 1,407 W bedraagt als het met de dempingskracht van de koppelmeter berekend wordt, een verschil van slechts 2%.



**Figuur 6.5:** Ogenblikkelijk en gemiddeld geabsorbeerd vermogen in regelmatige golf met  $H = 10,2$  cm,  $T = 1,596$  s. Diepgang kegel = 0,284 m.  $m_{\text{sup}} = 19,532$  kg en  $F_{\text{demp}} = 1,90$  N.

Naast geabsorbeerd vermogen wordt ook de vlotterbeweging gelinkt aan de golfverplaatsing. Daartoe wordt de opmeting van een golfhoogtemeter op 3,04 m afstand van de vlotter verschoven over een tijdsperiode gelijk aan de afstand gedeeld door de golfsnelheid. Op die manier kan men beide signalen op elkaar leggen. Figuur 6.6 toont het resultaat. De verplaatsing van de vlotter heeft dezelfde frequentie maar vertoont een faseverschil: de vlotter loopt ongeveer  $90^\circ$  achter op de verheffingen.

Naast het faseverschil is er ook een verschil in amplitude merkbaar. De golfamplitude is kleiner dan deze van de bewegingsamplitude.



**Figuur 6.6:** Golfverheffingen en vlotterverplaatsing in regelmatige golf:  $H = 10,2$  cm,  $T = 1,596$  s. Diepgang kegel =  $0,284$  m.  $m_{\text{sup}} = 19,532$  kg en  $F_{\text{demp}} = 1,90$  N.

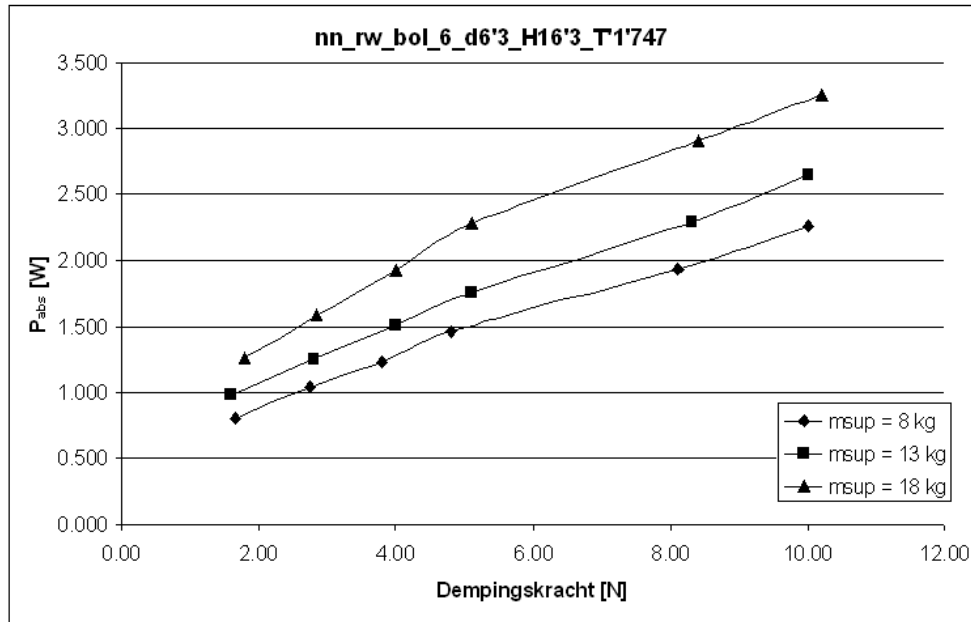
### 6.3.3 Resultaten

Om de interpretatie van de resultaten te vereenvoudigen, drukt men in plaats van het geabsorbeerd vermogen, de efficiëntie  $\eta$  uit. Dit is de verhouding van het geabsorbeerd vermogen en het gemiddeld golfvermogen over een kruinlengte even lang als de vlotterdiameter. Ook alle andere grootheden worden dimensieloos uitgedrukt:  $b_{ext}$  wordt vergeleken met de hydrodynamische dempingscoëfficiënt  $b(\omega)$  en de golffrequentie  $\omega$  wordt vergeleken met de natuurlijke trillingsfrequentie van het systeem  $\omega_n$ . Door gebruik van dimensieloze grootheden kunnen deze resultaten onmiddellijk geëxtrapoleerd worden naar prototypes op ware schaal.

#### Bolvormige vlotter

Als eerste wordt de bolvormige vlotter besproken. Zoals eerder vermeld zijn de meeste proeven uitgevoerd op de intermediaire diepgang  $d_{6,3}$ . Om een idee te krijgen van de grootteorde van het geabsorbeerd vermogen, toont figuur 6.7 het vermogen uit in functie van de dempingskracht en de supplementaire massa. Deze proef werd uitgevoerd in regelmatige golven met een golfhoogte van  $14,4$  cm (inputgolfhoogte  $16,3$  cm) en met periode  $1,747$  s. Het geabsorbeerde vermogen stijgt met toenemende dempingskracht en met toene-

mende supplementaire massa. In deze proef werden maar extra supplementaire massa's tot 10 kg ( $m_{\text{sup}}$  is dan 18 kg) toegepast omdat de bewegingsamplitudes te groot werden. Het maximaal geabsorbeerd vermogen in deze proef bedraagt 3,251 W. Op ware schaal zou het geabsorbeerde vermogen voor één vlotter  $3,251 \cdot 15,873^{3,5} = 51,7$  kW bedragen. De dempingskracht zou dan  $10,2 \cdot 15,873^3 = 40,8$  kN bedragen, terwijl de totale supplementaire massa  $m_{\text{sup}}$  72 ton zou zijn.



**Figuur 6.7:** Geabsorbeerd vermogen in functie van de dempingskracht.  $H = 14,4$  cm,  $T = 1,747$  s. Diepgang bol = 0,221 m.

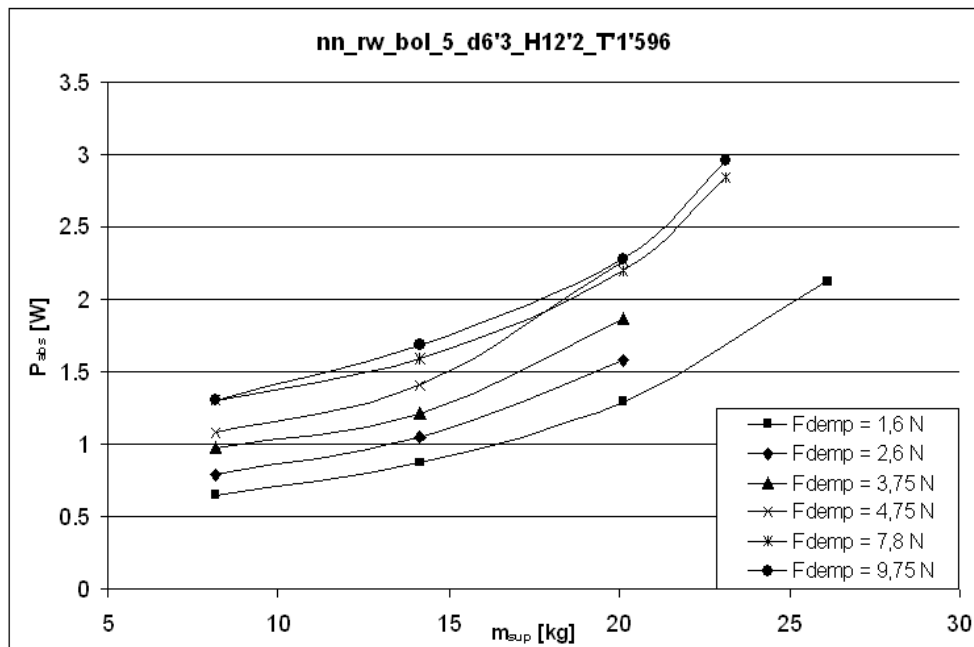
Figuur 6.8 toont het omgekeerde van figuur 6.7. Nu wordt voor een regelmatige golf met golfhoogte 10,2 cm en periode 1,596 s het geabsorbeerd vermogen vergeleken in functie van de supplementaire massa. Voor de duidelijkheid wordt de totale supplementaire massa  $m_{\text{sup}} = M_{\text{ss}} + M_{\text{se}}$  afgebeeld. De verschillende curven zijn voor toenemende waarden van de dempingskracht. Het is onmogelijk om te vergelijken met verschillende waarden van de externe dempingscoëfficiënt  $b_{\text{ext}}$ , omdat die achteraf uit het vermogen berekend wordt met (6.4).

Figuur 6.9 vergelijkt de efficiëntie  $\eta$  in functie van de externe demping. De proeven zijn gebeurd voor een inputgolfhoogte van 12,2 cm en een periode van 1,596 s. De ware gegenereerde golf heeft een golfhoogte van 10,2 cm en een periode van 1,597 s (zie ook tabel

5.6).

De figuur toont dat optimale energieabsorptie niet gebeurt bij  $b_{ext} = b(\omega)$  zoals theoretisch geldig is, maar voor hogere waarden van de dempingskracht. De absorptie vertoont een limiet bij hogere waarden voor de dempingskracht. Voor nog grotere waarden van de externe dempingskracht zal de efficiëntie terug afnemen. Deze grote waarden kunnen door beperkingen in het huidige systeem (sterkte koppelingen e.d.) niet getest worden. Voorts toont de grafiek ook aan dat de efficiëntie stijgt naarmate de eigenfrequentie van het systeem nadert tot de golffrequentie. Dit resultaat klopt met de theoretische beschouwingen die stellen dat de grootste bewegingsamplitudes optreden bij resonantie.

Naast efficiëntie is ook de dimensieloze bewegingsamplitude  $z_a/z_w$  belangrijk. Dit is de verhouding van de bewegingsamplitude van de vlotter tot de golfamplitude. Als deze waarde te groot wordt, is er kans op onderdompelen of slamming. Figuur 6.10 toont de bewegingsamplitudes in vergelijking met deze van de golf. De invloed van de variatie van de externe demping en supplementaire massa wordt ook hier duidelijk. Opmerkelijk is dat de bewegingsamplitude bijna steeds groter is dan de golfamplitude. Dit betekent dat de dempingscoëfficiënt klein is (zie ook figuur 4.4). Indien de (relatieve) bewegingsamplitude



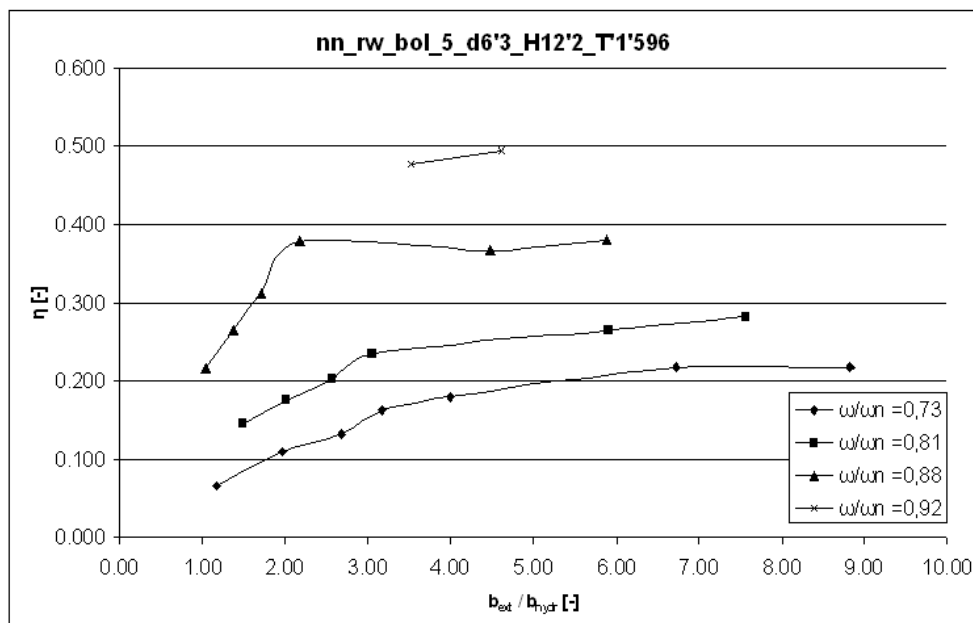
**Figuur 6.8:** Geabsorbeerd vermogen in functie van de supplementaire massa.  $H = 10,2$  cm,  $T = 1,596$  s. Diepgang bol =  $0,221$  m.

bepikt moet blijven tot een bepaalde waarde, kan men ofwel de supplementaire massa doen dalen ofwel de externe dempingskracht doen toenemen.

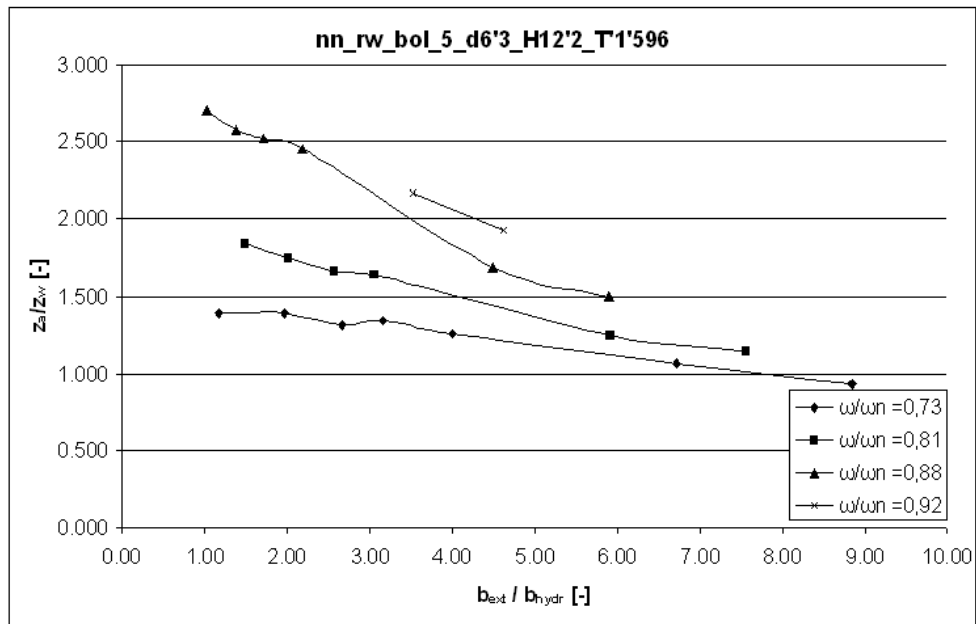
Vervolgens wordt de invloed van de diepgang nagegaan op het geabsorbeerde vermogen. Daartoe werden voor de drie diepgangen proeven uitgevoerd waarbij de verhouding  $\omega/\omega_n$  ongeveer constant werd gehouden. Het resultaat is zichtbaar in figuur 6.11. De theoretische resultaten komen ook hier uit: een grotere diepgang vermindert de golfexcitatiekrachten waardoor het geabsorbeerde vermogen zal verminderen. Er blijkt een merkwaardig resultaat in te zitten waarbij de diepgang d6,3 een grotere efficiëntie geeft dan de diepgang d3,15. Dit is te verklaren door de grotere verhouding van  $\omega/\omega_n$  bij deze proef.

De invloed van de diepgang op de (dimensieloze) bewegingsamplitude blijkt minder uitgesproken dan het verschil in efficiëntie. Figuur 6.12 toont de resultaten van deze vergelijking.

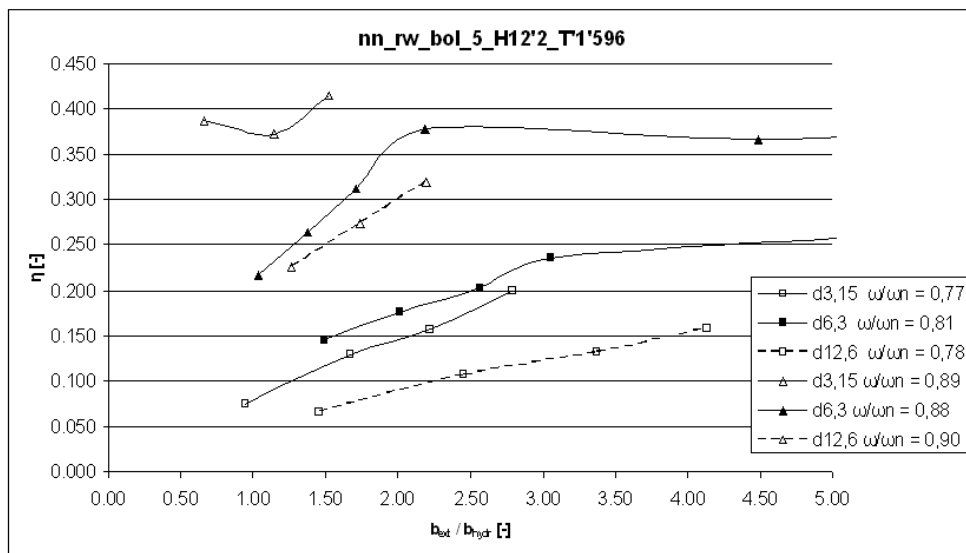
Tot slot wordt ook de invloed van de golfperiode bekeken. Zowel uit theoretische beschouwingen als praktische experimenten is gebleken dat de golfexcitatiekracht stijgt naarmate de golfperiode  $T$  toeneemt. Figuur 6.13 vertoont echter niet het verwachte resultaat. Het blijkt dat bij de golf met periode  $T = 1,747$  s de efficiëntie kleiner is dan bij de golf met periode  $T = 1,596$  s. De verklaring hiervoor kan zijn dat de opgemeten excitatiekracht bij



**Figuur 6.9:** Efficiëntie in functie van dempingskracht en supplementaire massa.  $H = 10,2$  cm,  $T = 1,596$  s. Diepgang bol = 0,221 m.  $m_{sup} = \{8,14,20,23\}$  kg



**Figuur 6.10:** Dimensieloze bewegingsamplitude.  $H = 10,2$  cm,  $T = 1,596$  s. Diepgang bol =  $0,221$  m.  $m_{sup} = \{8,14,20,23\}$  kg



**Figuur 6.11:** Invloed van de diepgang op de efficiëntie.  $H = 10,2$  cm,  $T = 1,596$  s. Diepgang bol =  $\{0,189;0,221;0,284\}$  m

een golf met periode 1,747 s kleiner is dan bij een golf met periode 1,596 s. Dit fenomeen werd eerder al beschreven bij de experimentele bepaling van de excitatiekrachten. Hieruit bleek dat de excitatiekracht bij periode 1,747 s ongeveer 15% kleiner is dan bij de periode 1,596 s. We proberen nu aan te tonen dat dit verschil in excitatiekracht het opgemeten verschil in geabsorbeerd vermogen oplevert.

Theoretisch kan aangetoond worden dat de amplitude van verplaatsing gelijk is aan [7]:

$$z_A = \frac{Fex(\omega)}{\sqrt{[k - (m + m_a + m_{sup})\omega^2]^2 + [(b(\omega) + b_{ext})\omega]^2}} \quad (6.7)$$

Uit (6.3) volgt dan dat het geabsorbeerde vermogen gelijk is aan:

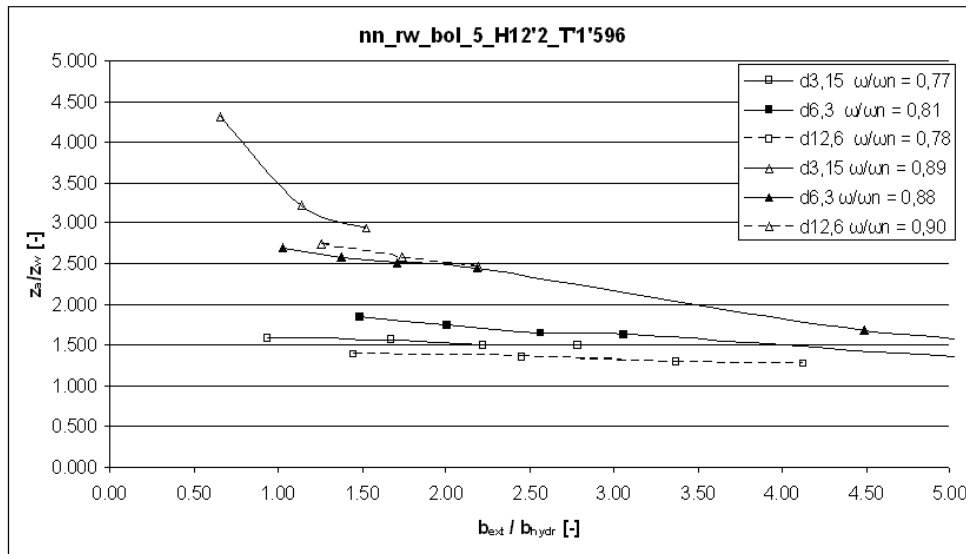
$$P = \frac{1}{2} b_{ext} \omega^2 z_A^2 \quad (6.8)$$

Als we de waarde van  $z_A$  substitueren in voorgaande vergelijking, kan het geabsorbeerde vermogen gevonden worden. Wanneer nu voor beide proeven alle numerieke waarden van de parameters ingevoerd worden, en de excitatiekracht bij de proef met  $T = 1,747$  s 15% lager ingegeven wordt, dan wordt de efficiëntie 18% kleiner. Niet alleen de excitatiekracht, maar ook de hydrodynamische dempingscoëfficiënt en de toegevoegde en supplementaire massa zijn immers afhankelijk van de frequentie  $\omega$ . Het opgemeten vermindering in efficiëntie bedraagt gemiddeld 20%, waardoor we kunnen besluiten dat het verschil in verwachte efficiëntie en gerealiseerde efficiëntie ligt aan een lagere excitatiekracht, vermoedelijk ten gevolge van reflectie aan de zijwanden van de golfgoot.

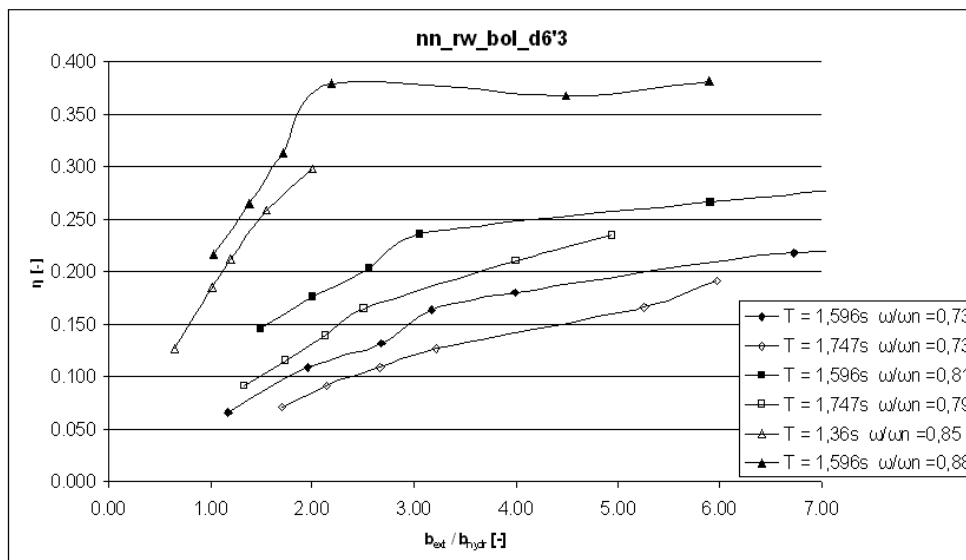
### Kegelvormige vlotter

Een gelijkaardige reeks proeven werd uitgevoerd voor de kegelvormige vlotter. De term gelijkaardig is hier van toepassing omdat voor elke golf dezelfde waarden van de extra supplementaire massa  $M_{se}$  en de dempingskracht werden gevarieerd. Door een verschillend vlottergewicht enerzijds en verschil in hydrodynamische werking anderzijds zullen zowel de eigenfrequentie en de hydrodynamische dempingscoëfficiënt anders zijn voor de bol en de kegel bij dezelfde proef.

Figuur 6.14 toont het geabsorbeerde vermogen voor proeven uitgevoerd in regelmatige golven met golfhogte 14,4 cm (inputgolfhogte 16,3 cm) en met periode 1,747 s. Anders dan in figuur 6.7, is hier wel een maximum in geabsorbeerd vermogen te vinden. Voor grote waarden van de dempingskracht (10 N en meer) stijgt het geabsorbeerd vermogen



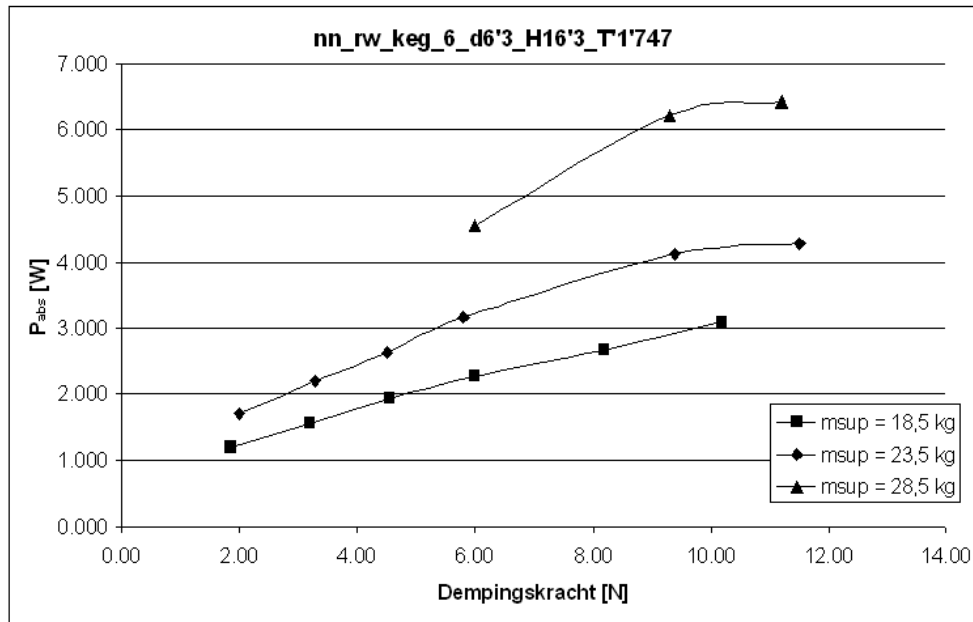
**Figuur 6.12:** Invloed van de diepgang op de (dimensieloze) bewegingsamplitude.  $H = 10,2$  cm,  $T = 1,596$  s. Diepgang bol =  $\{0,189;0,221;0,284\}$  m



**Figuur 6.13:** Invloed van de golfperiode op de efficiëntie



niet meer. Voor nog grotere dempingskrachten zal het vermogen zelfs terug beginnen dalen. Het maximaal geabsorbeerde vermogen was voor deze proef 6,419 W, hetgeen overeenkomt met  $6,419 \cdot 15,873^{3,5} = 102,3$  kW op ware schaal.



**Figuur 6.14:** Geabsorbeerd vermogen in functie van de dempingskracht.  $H = 14,4$  cm,  $T = 1,747$  s. Diepgang kegel = 0,221 m.

Wanneer men het geabsorbeerd vermogen zouden willen vergelijken met de supplementaire massa voor verschillende waarden van de dempingskracht, kan men figuur 6.15 gebruiken. Voor een regelmatige golf met golfhoogte 10,2 cm en periode 1,596 s worden voor supplementaire massa's tot 34 kg de geabsorbeerde vermogens uitgezet. Op de figuur is een maximaal geabsorbeerd vermogen van 3,8 W zichtbaar, op ware schaal overeenstemmend met 60 kW. Voor lage waarden van de dempingskracht is er een optimum geabsorbeerd vermogen zichtbaar bij een supplementaire massa van 31 kg. Voor grotere waarden van de dempingskracht is dit niet meer zo duidelijk.

Figuur 6.16 toont de efficiëntie  $\eta$  in functie van de externe dempingskracht. De figuur vertoont ongeveer dezelfde trends als bij de bolvormige vlotter. Voor grote waarden van  $b_{ext}/b_{hydr}$  stijgt de efficiëntie. Echter, als  $b_{ext}/b_{hydr} > 2$  dan is de toename in efficiëntie klein. Voor configuraties met een frequentieverhouding dicht bij 1 begint de efficiëntie te dalen voor  $b_{ext}/b_{hydr} > 3,5$ . Als de verhouding  $\omega/\omega_n < 0,90$  dan is de afname in efficiëntie

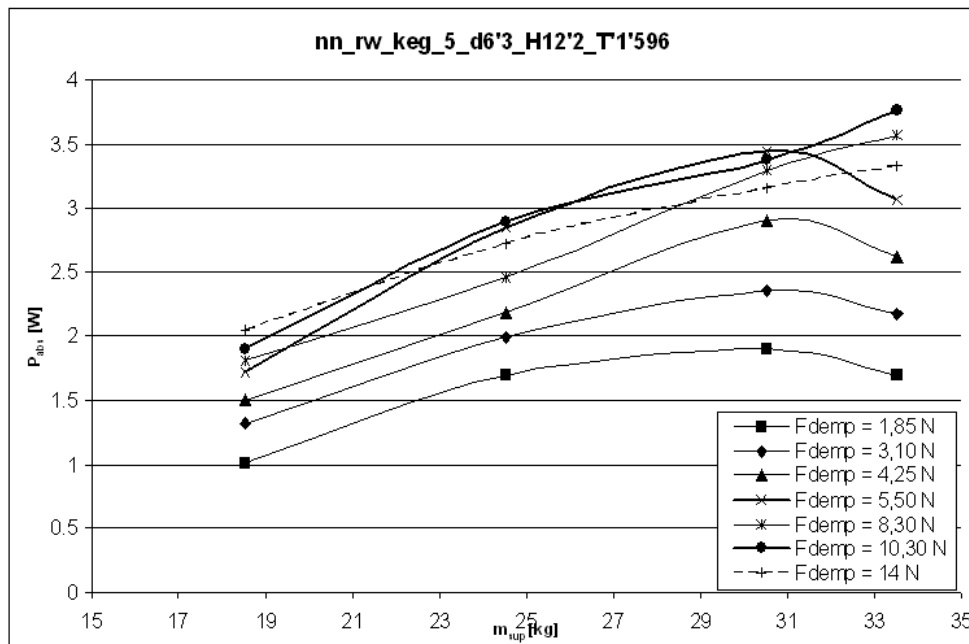
pas vanaf  $b_{ext}/b_{hydr} = 9$ .

De invloed van de eigenfrequentie van het systeem is ook merkbaar. De efficiëntie stijgt naarmate de eigenfrequentie van het systeem nadert tot de golffrequentie. Voor de verhouding  $\omega/\omega_n = 1$  is er echter een lagere efficiëntie voor kleine waarden van de externe dempingskracht dan voor de proeven met  $\omega/\omega_n = 0,96$ . Een reden hiervoor kan zijn dat de theoretisch berekende resonantiefrequentie niet volledig overeenstemt met de realiteit. De gelineariseerde hydrostatische herstelkrachtcoëfficiënt  $c$  is voor de kegelvorm bij grote bewegingsamplitudes inderdaad niet constant. Wanneer de kegel met zijn conisch gedeelte uit het water treedt, dan is de hydrostatische herstelkrachtcoëfficiënt lager, waardoor de eigenfrequentie daalt. De verhouding  $\omega/\omega_n$  zal dan stijgen, waardoor resonantie voor grote bewegingsamplitudes voor lagere waarden van  $m_{sup}$  zal optreden. Bij grotere dempingskrachten worden de bewegingsamplitudes kleiner, waardoor er ook minder variatie in hydrostatische herstelkrachtcoëfficiënt optreedt. Bij de bolvormige vlotter was dit effect niet aanwezig: de variatie in herstelkrachtcoëfficiënt is daar ook minder drastisch zolang de vlotter niet slamt.

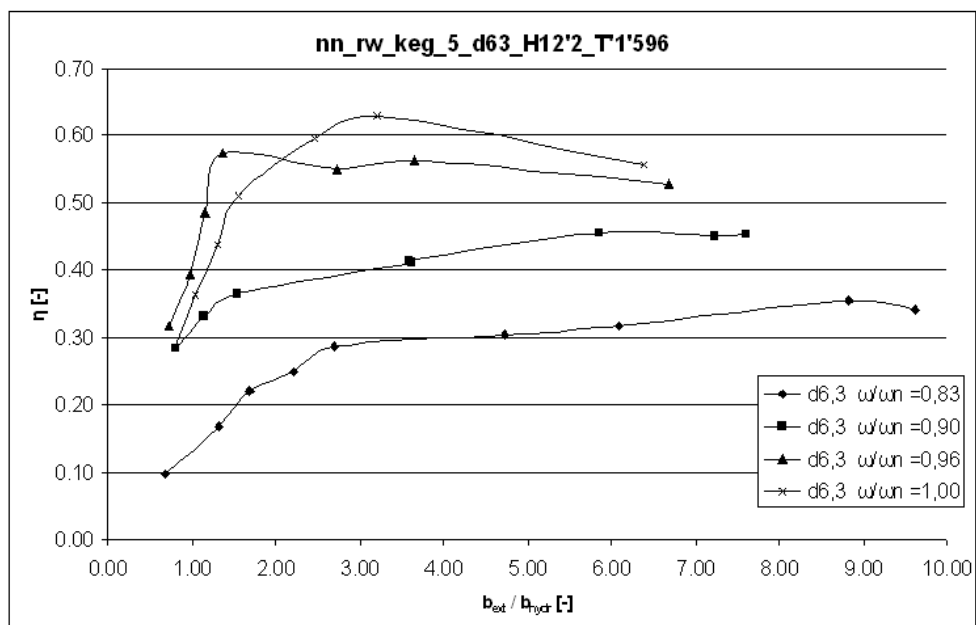
Voorgaande redenering wordt gestaafd door figuur 6.17 waarbij de relatieve bewegingsamplitude voorgesteld wordt. Voor verhoudingen van  $b_{ext}/b_{hydr} < 2,3$  is de bewegingsamplitude van de vlotter met (theoretische) frequentieverhouding van 96% groter dan waarbij het systeem theoretisch in resonantie is.

Evenals voor de bolvormige vlotter, werd de invloed van de diepgang nagegaan voor de kegelvormige vlotter. Figuur 6.18 toont hiervan de resultaten. De vierkantjes stellen de efficiëntie voor waarbij de frequentieverhouding rond de 90% is. De driehoekjes geven de resultaten voor een frequentieverhouding van ongeveer 97%. Voor de frequentieverhouding van 90% liggen de resultaten binnen de lijn van de verwachtingen. De kleinste diepgang geeft de grootste efficiëntie, terwijl de grootste diepgang de kleinste efficiëntie oplevert. De invloed van de externe demping is groot voor de kleinste diepgang: de efficiëntie varieert tussen 0,15 en 0,60. Voor de intermediaire diepgang  $d_{6,3}$  schommelt de efficiëntie slechts tussen 0,28 en 0,45.

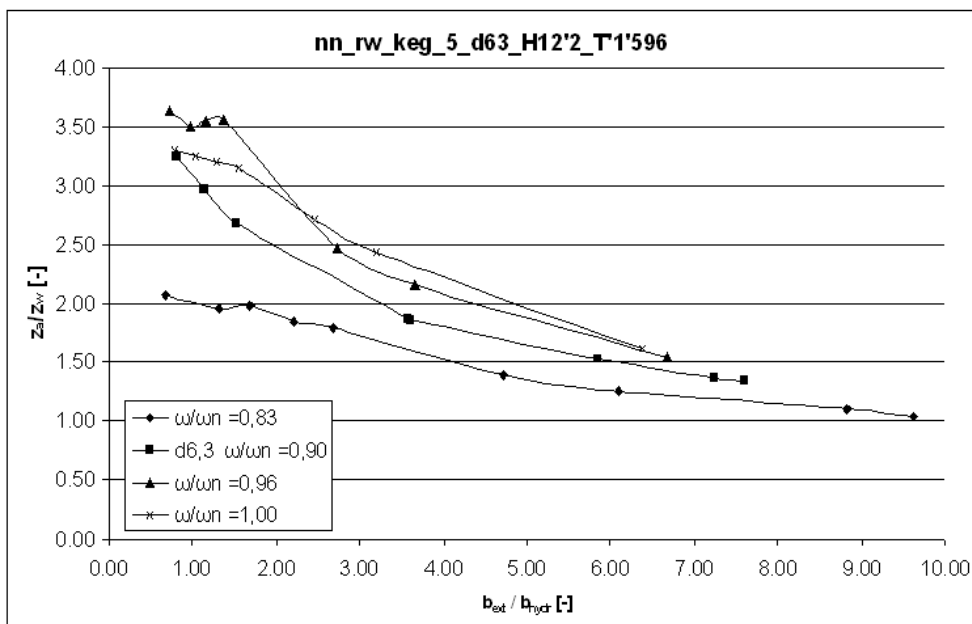
Tot slot werd ook hier de invloed van de golfperiode op de absorptie van energie bekeken. Figuur 6.19 toont de resultaten. Wanneer we de golven met periodes 1,596 s en 1,747 s vergelijken, dan is merkbaar dat de efficiëntie ongeveer gelijk is. Dit heeft een gelijkaardige oorzaak als beschreven bij de bolvormige vlotter. Bij de golfperiode 1,36 s is er een



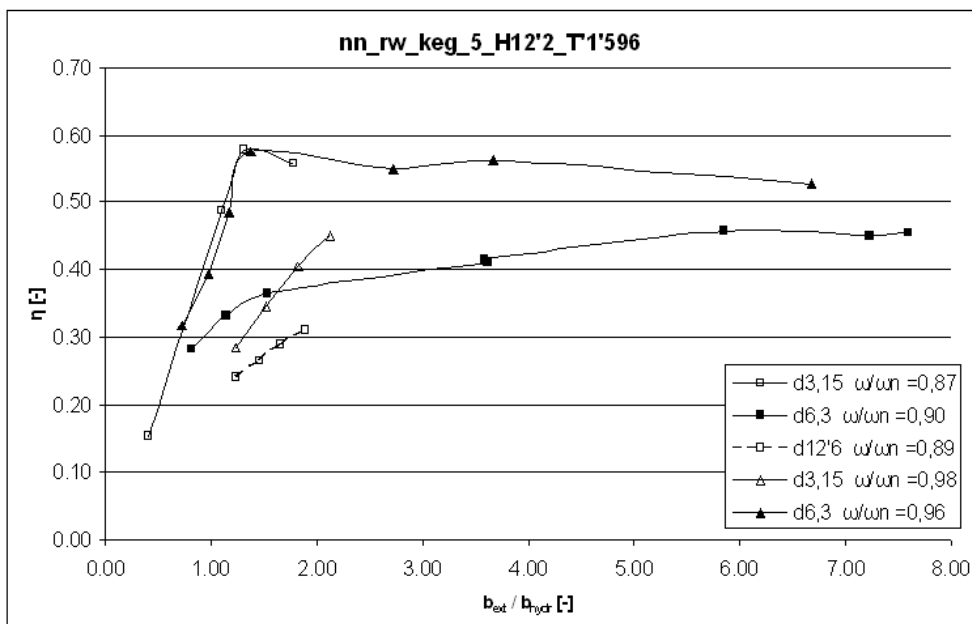
**Figuur 6.15:** Geabsorbeerd vermogen in functie van de supplementaire massa.  $H = 12,2$  cm,  $T = 1,36$  s. Diepgang kegel = 0,221 m.



**Figuur 6.16:** Efficiëntie in functie van dempingskracht en supplementaire massa.  $H = 10,2$  cm,  $T = 1,596$  s. Diepgang kegel = 0,221 m.  $m_{sup} = \{18,5;24,5;30,5;33,5\}$  kg

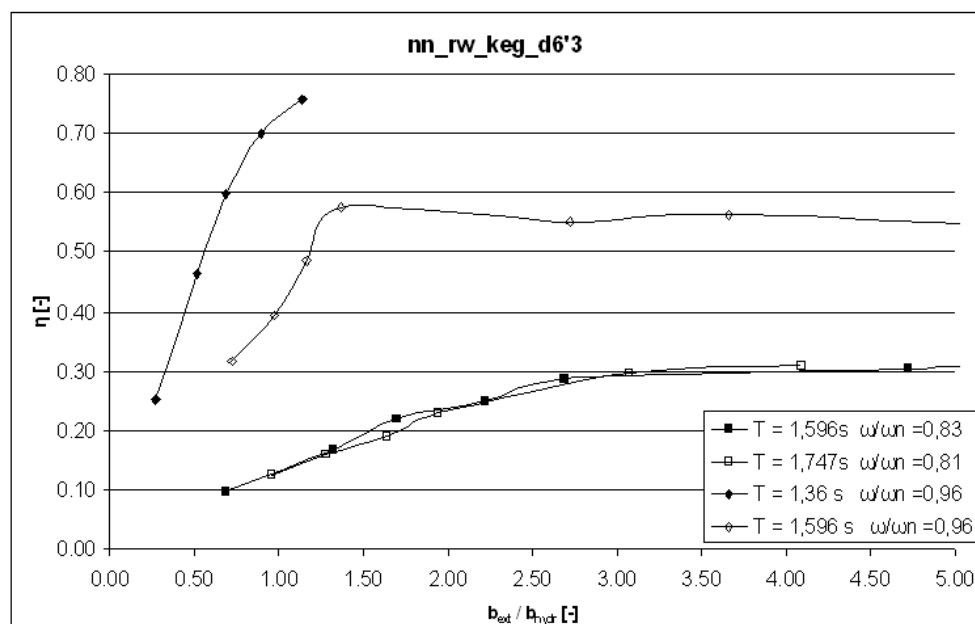


**Figuur 6.17:** Relatieve bewegingsamplitude.  $H = 10,2$  cm,  $T = 1,596$  s. Diepgang kegel = 0,221 m.  $m_{sup} = \{18,5;24,5;30,5;33,5\}$  kg



**Figuur 6.18:** Invloed van de diepgang op de efficiëntie.  $H = 10,2$  cm,  $T = 1,596$  s. Diepgang kegel =  $\{0,189;0,221;0,284\}$ m

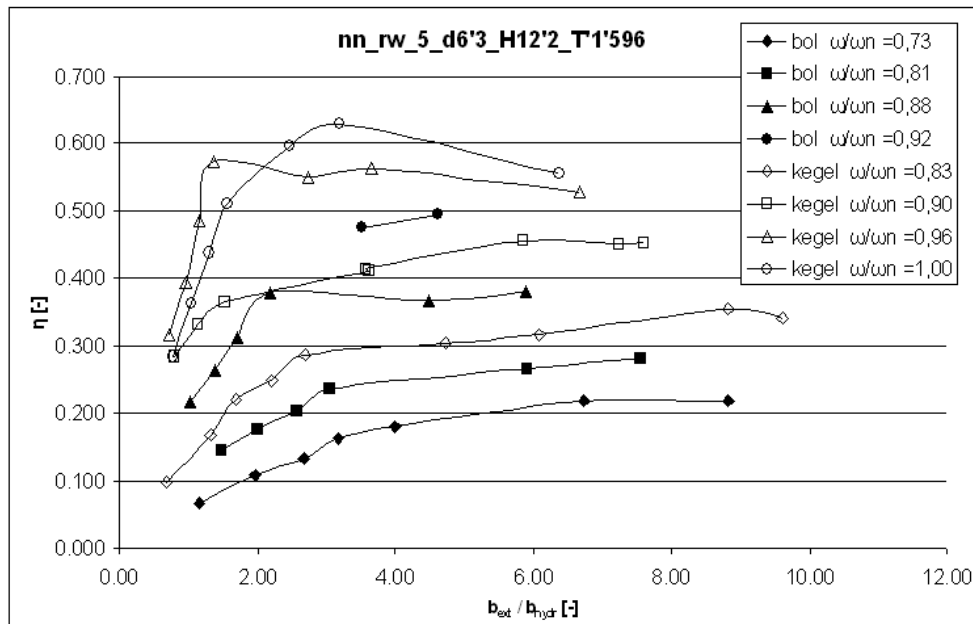
efficiëntie bereikbaar van 76%. Mogelijks stijgt deze waarde nog voor hogere waarden van de dempingskracht.



**Figuur 6.19:** Invloed van de golfperiode op de efficiëntie

### Vergelijking bol en kegel

De grote hoeveelheid uitgevoerde proeven maakt het mogelijk om de bol- en kegelvormige vlotter te vergelijken. Zoals reeds eerder opgemerkt is het mogelijk om gelijkaardige proeven te vergelijken: proeven die zowel voor de bolvorm als de kegelvorm uitgevoerd zijn met dezelfde waarde van diepgang, supplementaire massa en dempingskracht. Enkel is de waarde van  $\omega_n$  niet dezelfde voor beide vlotter. Gezien de grote invloed van de verhouding  $\omega/\omega_n$  op de efficiëntie lijkt het nuttiger om enkel de proeven te vergelijken die eenzelfde waarde van de verhouding  $\omega/\omega_n$  bezitten. Figuur 6.20 vat de resultaten samen van figuur 6.9 en figuur 6.16. In deze proeven is de golfhoogte 10,2 cm, de golfperiode 1,597 s en de diepgang van het cilindrische stuk 6,3 cm. De extra supplementaire massa's toegevoegd aan het systeem zijn 0, 6, 12 en 15 kg. De dempingsgewichten variëren van 0,5 tot 3 kg.



**Figuur 6.20:** Vergelijking efficiëntie bij bol- en kegelvormige vlotter.  $H = 10,2$  cm,  $T = 1,596$  s. Diepgang vlotter =  $0,221$  m

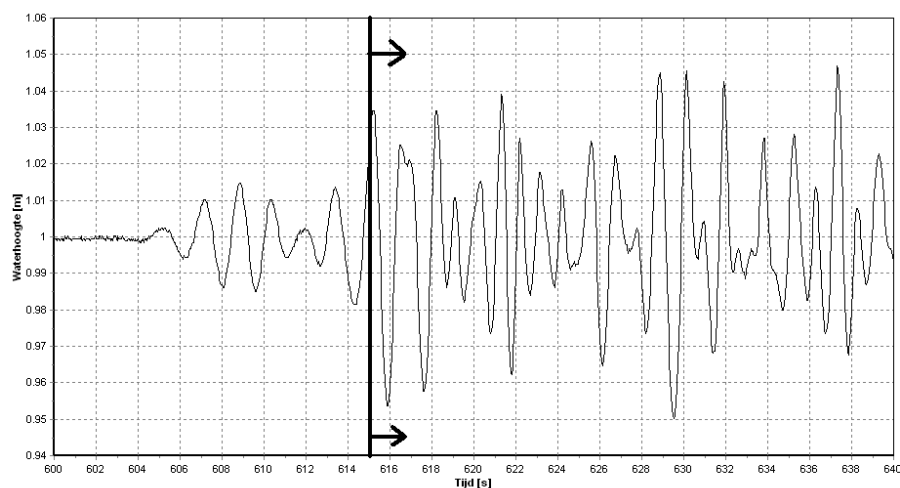
Op de figuur is te zien dat voor gelijke waarden van  $\omega/\omega_n$  de kegel een iets grotere efficiëntie bezit. Voor de bol werd een maximale efficiëntie waargenomen van  $0,495$ . Hierbij moet wel vermeld worden dat de waarde van  $\omega/\omega_n$  beperkt werd tot  $0,92$  door te grote bewegingsamplitudes. De kegelvormige vlotter bereikt een efficiëntie van  $0,63$  wanneer hij in resonantie is met de invallende golf en met een externe dempingscoëfficiënt  $3,20$  keer groter dan de hydrodynamische dempingscoëfficiënt.

Zowel voor de kegelvormige als de bolvormige vlotter is het duidelijk dat de supplementaire massa een grote invloed heeft op de efficiëntie. Hoe dichter bij resonantie, hoe groter het geabsorbeerd vermogen. Voor de dempingskracht is het vooral bij lage waarden ervan dat de efficiëntie sterk verandert. Bij grotere waarden blijft het geabsorbeerd vermogen ongeveer constant. Pas bij zeer grote waarden van de dempingskracht daalt het geabsorbeerde vermogen.

## 6.4 Onregelmatige golven

### 6.4.1 Beschrijving proef

Anders dan bij regelmatige golven, duurt een absorptieproef met onregelmatige golven veel langer. De onregelmatige golftrein moet immers voldoen aan zijn opgelegde spectrum en dit is onmogelijk over een meetperiode van 20 seconden. Daarom is er gekozen om de golven gedurende 240 s te laten genereren. Uiteraard blijft de periode van 600 s rust om het water in rust te krijgen te respecteren. Zoals eerder aangetoond, is er door de (kleine) reflectie een opbouw van energie in de golfkooi, waardoor de significante golfhoogte per tijdsblok stijgt (zie ook tabel 5.7). Het gekozen tijdsframe mag dus niet te lang duren, maar ook niet te kort, om genoeg golven te kunnen beschouwen. Uiteindelijk werd gekozen voor een tijdsframe met een lengte van 117,88 s, een duur die ook een snelle numerieke berekening toelaat (zie ook [28] en sectie 7.2). De gekozen starttijd ligt op 615 s, 15 s na de start van de golfgeneratie. In die 15 s is een tijd inbegrepen die nodig is voor translatie van de golven vanaf het golfschot tot aan de opstelling en een tijd nodig om de gewenste golf op te bouwen. Op 615 s treedt er ter hoogte van de vlotter een eerste piek in golfhoogte op. Figuur 6.21 toont het begin van het geselecteerde tijdsframe.



**Figuur 6.21:** Start van het tijdsframe ligt bij een eerste piek in de verheffingen op 615 s

Zoals vermeld in tabel 6.3 worden twee onregelmatige golven getest. Golf 16 stemt overeen

met een reële significante golfhoogte van 1,16 m, golf 17 met een  $H_s$  van 1,70 m.

### 6.4.2 Berekeningswijze geabsorbeerd vermogen

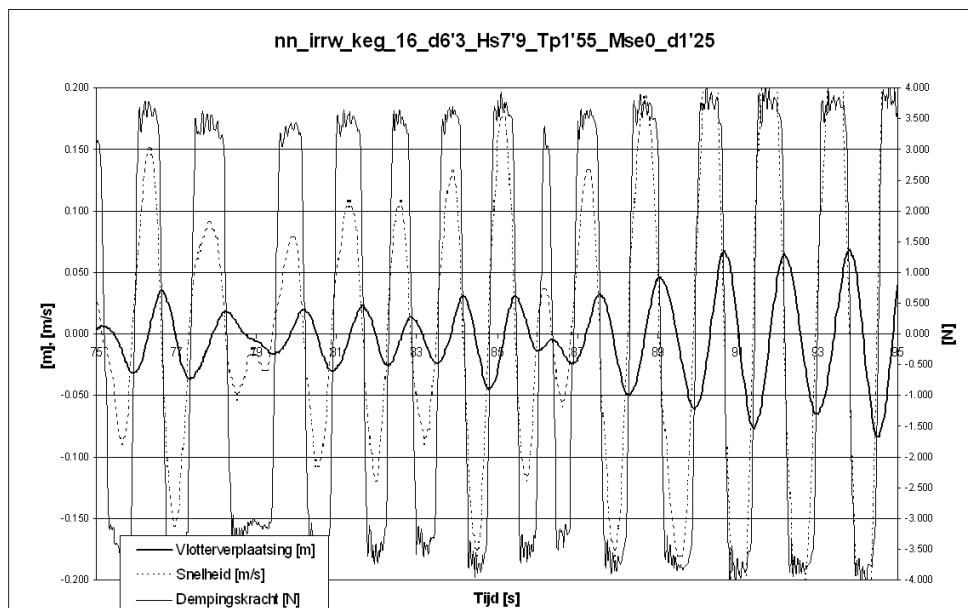
De berekening van het geabsorbeerd vermogen geschiedt op een analoge manier als bij de regelmatige golven. Toch zijn er enkele verschillen. De verplaatsing van de vlotter is geen sinusvormige curve, maar vertoont een onregelmatig karakter. In theorie is het mogelijk om dit signaal als een fourierreeks te schrijven, maar deze berekening is in een rekenblad praktisch niet realiseerbaar. Bij de analyse van regelmatige golven is gebleken dat het discreet afgeleide snelheidssignaal slechts weinig verschilt van het gefitte snelheidssignaal. Daarom lijkt het ook aangewezen om bij onregelmatige golven het snelheidssignaal van de vlotterverplaatsing te bekomen door de vlotterverplaatsing discreet af te leiden naar de tijd: d.w.z. het verschil te nemen van 2 opeenvolgende metingen van de verplaatsing en dit te delen door de sampleperiode (0,02 s). Om hevige sprongen in het snelheidssignaal te vermijden werd elke waarde van het verplaatsingssignaal uitgemiddeld over de vorige 2 en de volgende 2 opmetingen.

Figuur 6.22 toont de verplaatsing en de discreet afgeleide snelheid samen met de dempingskracht voor de proef *nn\_irrw\_keg\_16\_d6'3\_Hs7'9\_Tp1'55\_Mse0\_d1'25*. Dit is een onregelmatige golf met (input) significante golfhoogte 7,9 cm en piekperiode 1,55 s inwerkend op de kegelvormige vlotter met diepgang 6,3 cm van het cilindrisch gedeelte. De massa van het dempingsgewicht bedraagt 1,25 kg, er is geen extra supplementaire massa toegevoegd. Op de figuur worden direct enkele dingen duidelijk: de gerealiseerde dempingskracht is onafhankelijk van de grootte van de snelheid, enkel van het teken. Ook is de dompsnelheid van de vlotter in fase met de dempingskracht.

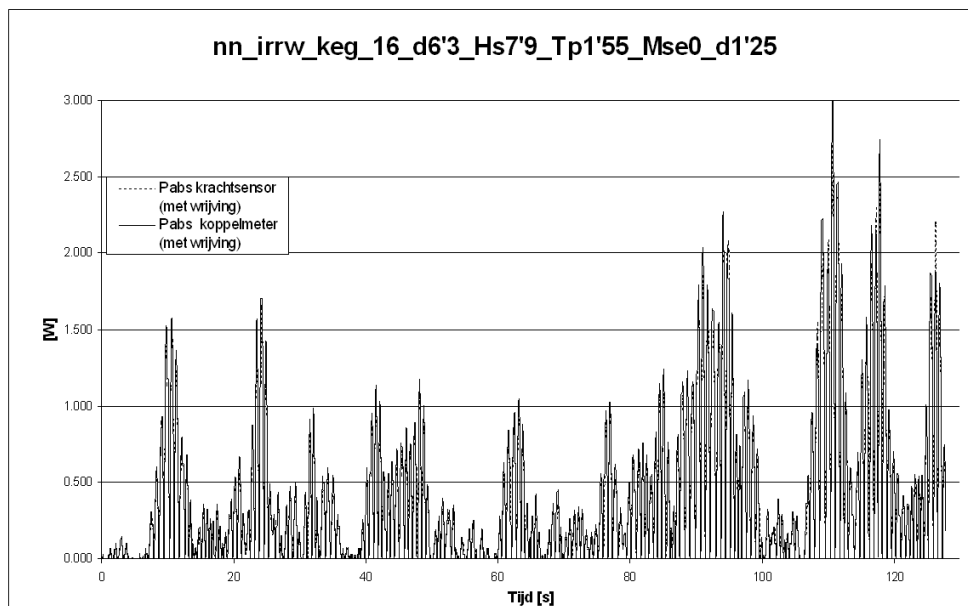
Het geabsorbeerde vermogen wordt wederom berekend door de onmiddellijke snelheid te vermenigvuldigen met de som van de onmiddellijke dempingskracht en de inwendige wrijving. Figuur 6.23 toont het geabsorbeerde vermogen in functie van de tijd. De verschillen tussen het geabsorbeerde vermogen berekend met de krachtsensor of met de koppelmeter zijn zeer klein. Dit is ook merkbaar aan het gemiddeld geabsorbeerd vermogen: 0,422 W berekend met de koppelmeter en 0,417 W berekend met de krachtsensor.

Figuur 6.24 toont de responsie van het systeem op de verheffingen van het wateroppervlak. Bij de meeste golven is het faseverschil tussen het wateroppervlak en de vlotter ongeveer  $90^\circ$ , wat ervoor zorgt dat de vlottersnelheid ongeveer in fase is met de verheffingen en dus



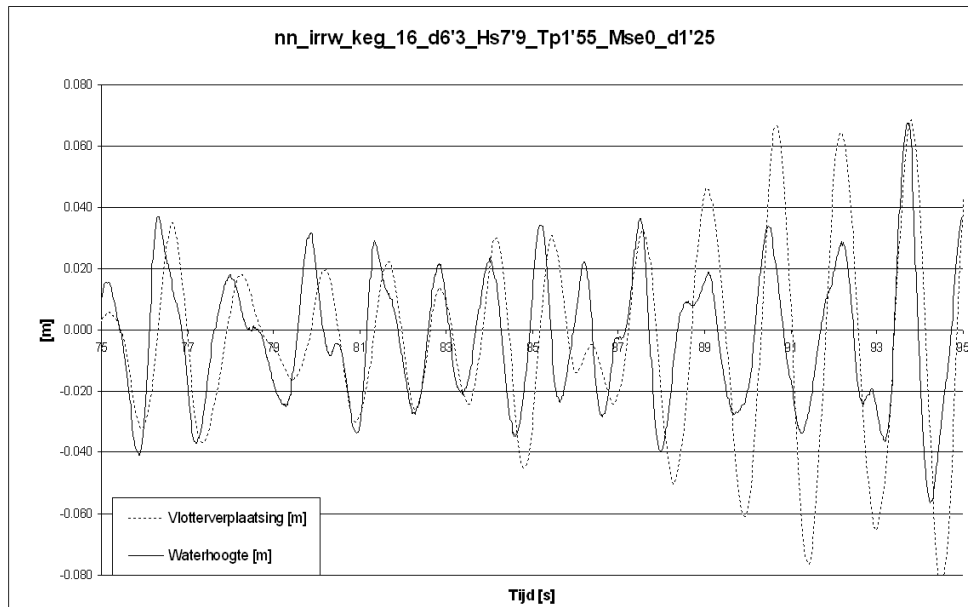


**Figuur 6.22:** Opmeting van de dompverplaatsing, -snelheid en dempingskracht. Onregelmatige golf  $H_s = 7,3$  cm,  $T_p = 1,463$  s. Diepgang kegel = 0,221 m.



**Figuur 6.23:** Het geabsorbeerd vermogen in functie van de tijd. Onregelmatige golf  $H_s = 7,3$  cm,  $T_p = 1,463$  s. Diepgang kegel = 0,221 m.

ook met de excitatiekrachten. Verder is ook zichtbaar dat de amplitude van de vlotterverplaatsingen groter is dan de golfamplitude bij de grote golven. Dit betekent dat de golffrequentie dicht bij de eigenfrequentie zit voor de grote golven.



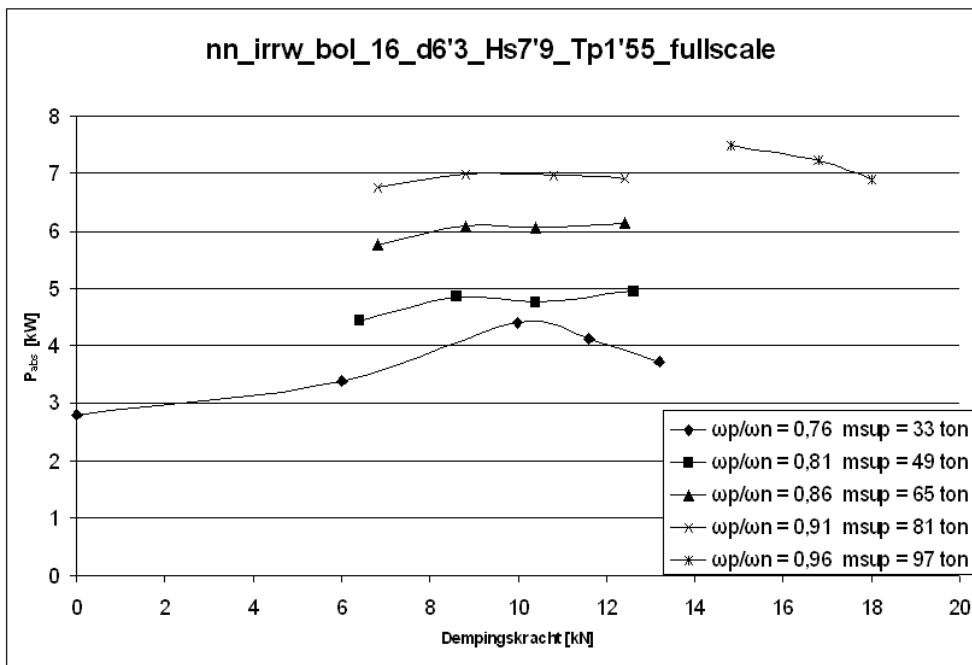
**Figuur 6.24:** Verheffingen van het wateroppervlak ter plekke van de vlotter samen met de vlotterverplaatsing. Onregelmatige golf  $H_s = 7,3$  cm,  $T_p = 1,463$  s. Diepgang kegel = 0,221 m.

### 6.4.3 Resultaten

In tegenstelling tot de dimensieloze grafieken in de sectie van de regelmatige golven, zullen in deze sectie meer niet-dimensieloze grafieken staan. De reden hiervoor is dat bij onregelmatige golven geen externe dempingscoëfficiënt meer berekend wordt. In de grafieken zal dus de dempingskracht voorgesteld worden. Ook de verhouding  $\omega/\omega_n$  valt niet meer exact te bepalen, gezien de golffrequentie in een onregelmatige golf steeds verandert en ook de eigenfrequentie van het systeem afhankelijk is van de golffrequentie. De toegevoegde massa is immers frequentiegebonden. In de grafieken wordt de verhouding van de piekgolffrequentie tot de eigenfrequentie van het systeem gebruikt. Om tot een efficiëntie te komen was ook het golfvermogen nodig. Deze resultaten werden bekomen door Tri Hoang Tran, een medewerker van Prof. Vantorre. Tabel 6.4 toont het berekende gemiddelde golfvermogen over een eenheidslengte en over lengte even groot als de diameter van de vlotter.

### 6.4.4 Bolvormige vlotter

Figuur 6.25 toont de resultaten van absorptieproeven in een onregelmatige golf met significante golfhoogte  $H_s = 1,16$  m en piekperiode  $T = 5,83$  s op ware schaal. Op die figuur is zichtbaar hoe het geabsorbeerde vermogen toeneemt naarmate de eigenfrequentie van het systeem nadert tot de piekgolffrequentie. De figuur toont aan dat de supplementaire massa een grote invloed heeft op het geabsorbeerde vermogen. De dempingskracht daarentegen heeft een merkelijk kleinere invloed. Er is een maximum in geabsorbeerd vermogen te vinden voor een dempingskracht van ongeveer 10 kN. Voor de proef met  $\omega_p/\omega_n = 0,96$  kon dit maximum bij 10 kN niet gevonden worden. Te grote bewegingsamplitudes verhinderden om een lagere dempingskracht te gebruiken.

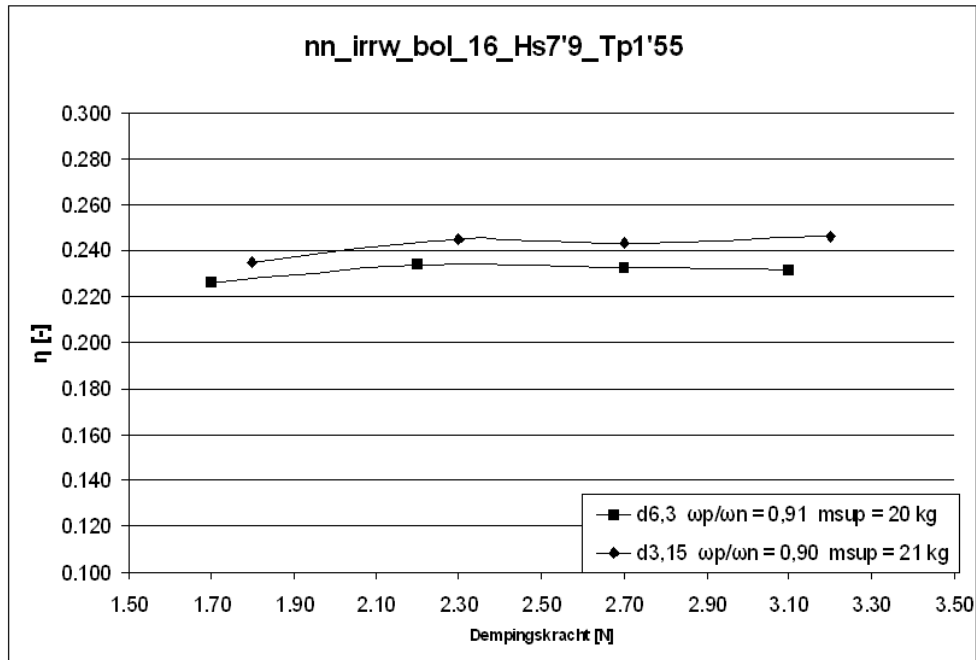


**Figuur 6.25:** Geabsorbeerd vermogen in functie van dempingskracht. Onregelmatige golf  $H_s = 1,16$  m,  $T_p = 5,83$  s (ware schaal). Diepgang bol = 3,5 m.

$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	$P_{\text{wave}}$ [W/m]	$P_{\text{wave,vlotter}}$ [W]
0,073	1,463	5,953	1,875
0,107	1,707	11,507	3,625

**Tabel 6.4:** Berekening van het golfvermogen uit de opmeting van de verheffingen van twee onregelmatige golven

Ook bij onregelmatige proeven werd de invloed van de diepgang nagegaan. Figuur 6.26 toont het resultaat hiervan. Zoals verwacht is het geabsorbeerde vermogen voor de kleinere diepgang groter. Het verschil is echter zeer klein: gemiddeld 4%.

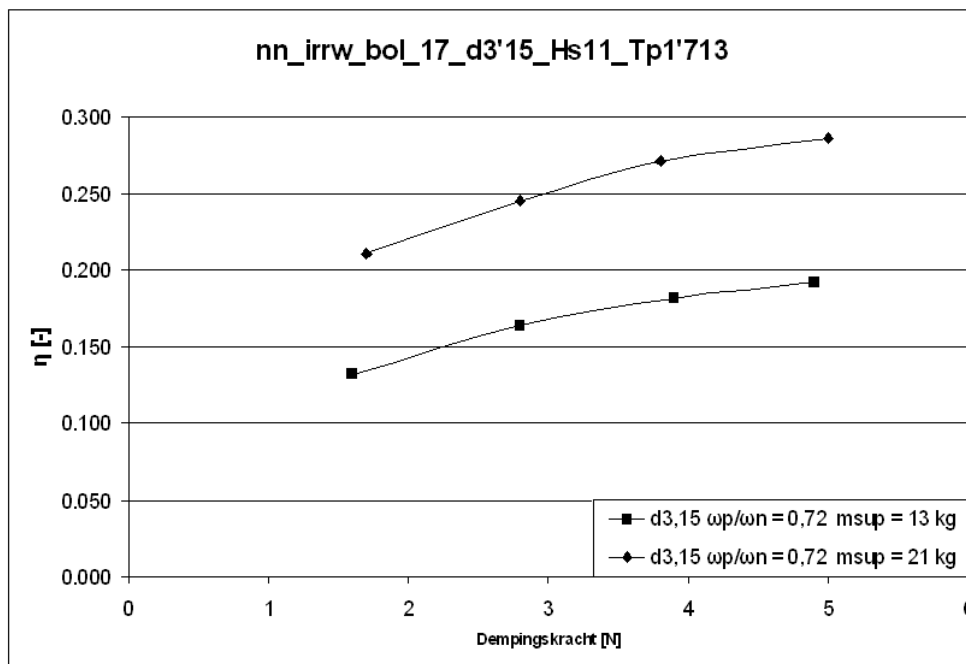


**Figuur 6.26:** Efficiëntie in functie van dempingskracht voor 2 verschillende diepgangen. Onregelmatige golf  $H_s = 7,3$  cm,  $T_p = 1,463$  s. Diepgang bol =  $\{0,189; 0,221\}$ m

Voor de kleinste diepgang d3,15; overeenstemmend met 3,15 cm diepgang van het cilindrisch gedeelte en met een totale diepgang van 0,189 m werden enkele proeven uitgevoerd in grote onregelmatige golven. De significante golfhoogte bedroeg 10,7 cm en de piekperiode was 1,707 s. Figuur 6.27 toont de resultaten. Met een totale supplementaire massa van 21 kg is het mogelijk om tot een efficiëntie van 28,6 % te komen. Dit stemt overeen met een geabsorbeerd vermogen (op schaalmodel) van 1,04 W en op ware schaal 16,6 kW.

Omdat niet alleen geabsorbeerd vermogen belangrijk is, werd ook eens gekeken wat het verschil is in bewegingsamplitude. Daartoe werden twee onregelmatige golfproeven met elkaar vergeleken. De enige parameter die gevarieerd werd is de dempingskracht. De proeven gebeurden in een onregelmatige golf met  $H_s = 7,3$  cm en  $T_p = 1,436$  s. De supplementaire massa  $m_{sup}$  bedroeg 8 kg. De dempingskracht was 0 N in het ene geval en 2,90 N in het andere geval. In het geval van geen dempingskracht was er toch energieabsorptie door

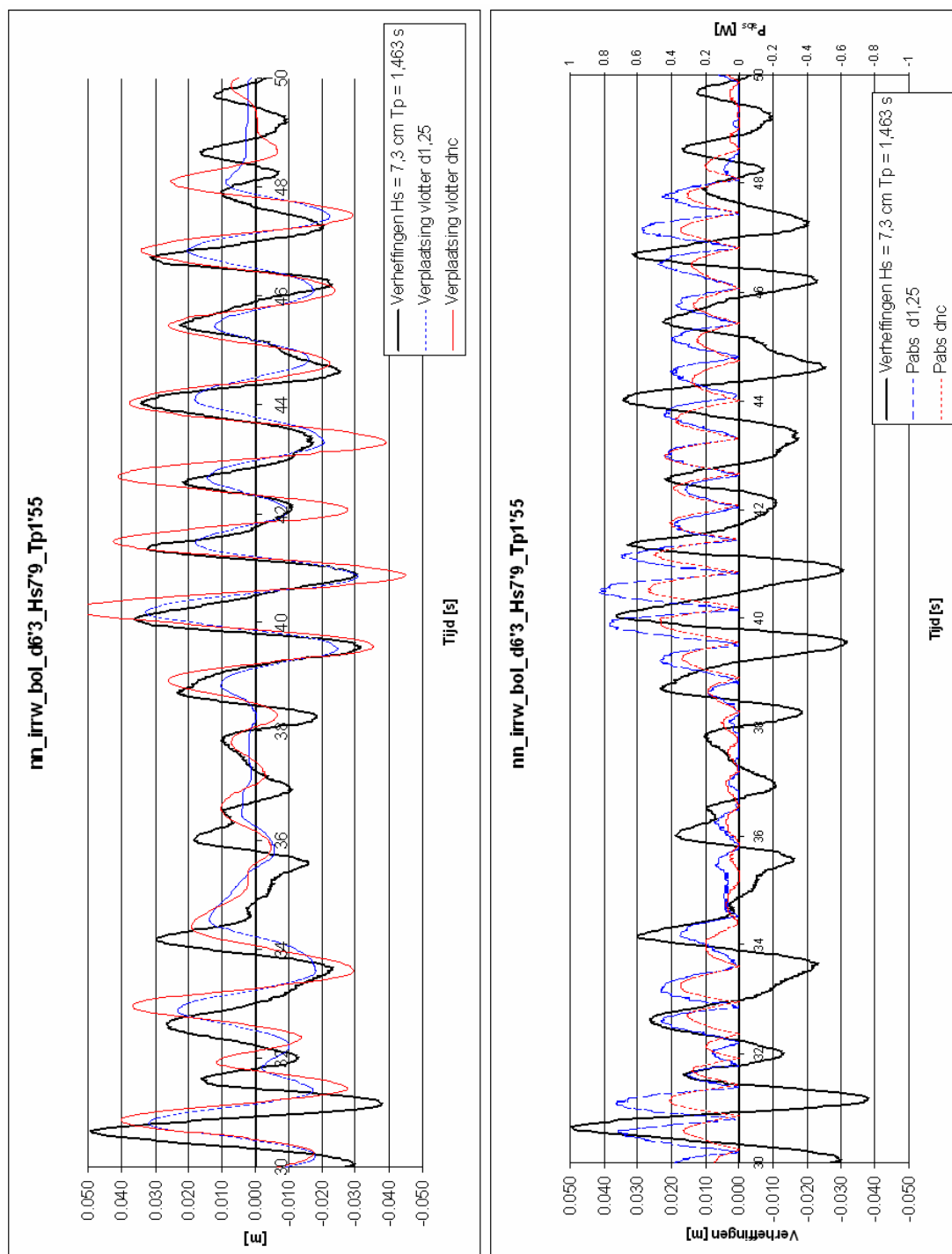
de inwendige wrijving. De verschillen in verplaatsing en geabsorbeerd vermogen in een tijdsvenster van 20 s zijn te zien in figuur 6.28. In de eerste figuur zijn de vlotterverplaatsingen op elkaar gelegd. In de onderste figuur de vermogens. Het gemiddeld geabsorbeerd vermogen bedraagt in het geval van enkel inwendige wrijving 0,176 W, in het geval van een dempingskracht van 2,9 N is dit geabsorbeerd vermogen 0,258 W. In het geval van geen dempingskracht bedraagt de maximale bewegingsamplitude 9 cm, terwijl de maximale golfamplitude 7,5 cm is. Voor het geval van een dempingskracht van 2,9 N is de maximale bewegingsamplitude 6,9 cm. Omdat de verhoudingen van de maximale amplitudes weinig zeggen, zou het beter zijn om het amplitudespectrum van de verplaatsingen te vergelijken met het amplitudespectrum van de invallende golf. Per componente kan dan de responsie bekijken. Door het vele rekenwerk en de weinige tijd werd deze vergelijking niet uitgevoerd.



**Figuur 6.27:** Efficiëntie in functie van dempingskracht voor 2 waarden van  $m_{\text{sup}}$ . Onregelmatige golf  $H_s = 10,7$  cm,  $T_p = 1,707$  s. Diepgang bol = 0,189 m

### 6.4.5 Kegelvormige vlotter

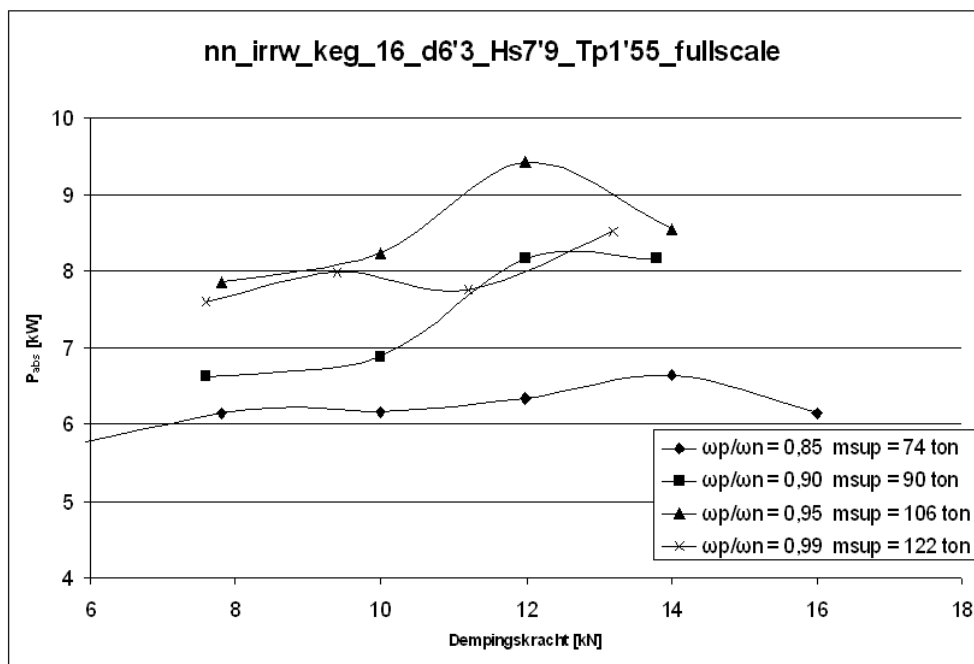
Figuur 6.29 toont het resultaat van vermogensabsorptieproeven in onregelmatige golven op de kegelvormige vlotter. De resultaten zijn herschaald op ware schaal. De onregelmatige



**Figuur 6.28:** Verheffingen en vlotterverplaatsingen voor twee waarden van de dempingskracht. Ogenblikkelijk geabsorbeerd vermogen voor twee waarden van de dempingskracht. Onregelmatige golf  $H_s = 7,3$  cm,  $T_p = 1,463$  s. Diepgang bol = 0,221 m.

golf heeft een significante golfhoogte  $H_s = 1,16$  m en piekperiode  $T_p = 5,83$  s. We kunnen enkele zaken opmerken in verband met de figuur. Ten eerste stijgt het geabsorbeerde vermogen naarmate de eigenfrequentie nadert tot de piekfrequentie van de golven. Het maximum lijkt echter te liggen op een verhouding van 96 %. A priori is het niet geweten is wat de ideale frequentieverhouding is voor optimale absorptie, tenzij uit numerieke berekeningen. Deze zijn echter nog niet talrijk genoeg uitgevoerd. Daarom kan uit figuur 6.29 besloten worden dat het (sub)optimum ligt op  $\omega_p/\omega_n = 0,96$ . Het is mogelijk dat er nog een optimum ligt voor verhoudingen  $> 1$ , maar de supplementaire massa wordt dan zodanig groot dat dit optimum in de praktijk niet gerealiseerd kan worden.

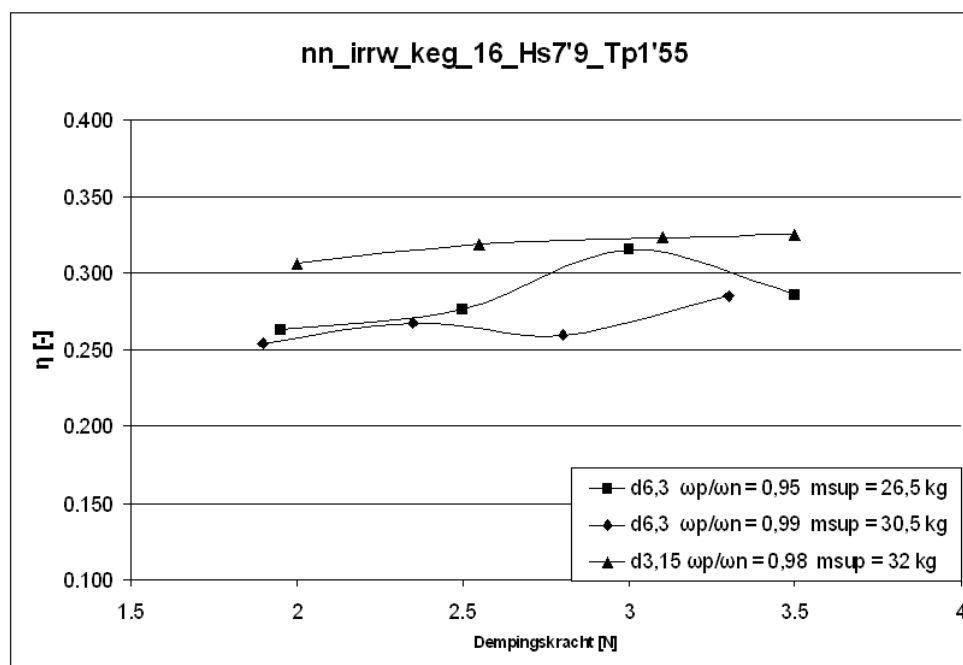
Ten tweede lijkt er een optimum in absorptie te bestaan voor een dempingskracht (op ware schaal) van 12 kN. Het maximaal geabsorbeerde vermogen in deze onregelmatige golf bedraagt dan 9,4 kW.



**Figuur 6.29:** Geabsorbeerd vermogen in functie van dempingskracht. Onregelmatige golf  $H_s = 1,16$  m,  $T_p = 5,83$  s (ware schaal). Diepgang kegel = 3,5 m.

Als naar de invloed van de diepgang van de vlotter gekeken wordt, kan men concluderen dat ook bij deze proeven de kleinste diepgang de grootste efficiëntie oplevert. Figuur 6.30 illustreert deze bewering. Niet alleen is de efficiëntie groter bij de diepgang van 0,189 m (op

schaalmodel), ook is het geabsorbeerd vermogen minder afhankelijk van de dempingskracht. De curve voor de kleinste diepgang vertoont geen uitgesproken zoals het geval is voor de diepgang d6,3 (totale diepgang van 0,221 m).



**Figuur 6.30:** Efficiëntie in functie van dempingskracht voor 2 verschillende diepgangen. Onregelmatige golf  $H_s = 7,3$  cm,  $T_p = 1,463$  s. Diepgang kegel =  $\{0,189;0,221\}$ m

Bij de kleinste diepgang, die het grootste geabsorbeerde vermogen oplevert, werden proeven gedaan met onregelmatige golven met  $H_s = 10,7$  cm en  $T_p = 1,707$  s. Op figuur 6.31 is zichtbaar dat er een maximale efficiëntie te behalen is van 50%. Omdat dit punt zo hoog ligt, is de proef nog eens herhaald, met hetzelfde resultaat. Het geabsorbeerde vermogen zou hier 1,82 W zijn, wat op ware schaal overeenkomt met 29 kW.

Tot slot werd ook nagegaan wat de bewegingsamplitudes zijn voor verschillende waarden van de dempingskracht. Daarvoor werd dezelfde golf als bij de bolvormige vlotter beschouwd:  $H_s = 7,3$  cm en  $T_p = 1,463$  s. De supplementaire massa  $m_{sup}$  bedroeg 18,5 kg. Er werd een ongedempte proef en een proef met een dempingskracht van 3,5 N uitgevoerd. Bij de ongedempte proef is er energieabsorptie door inwendige wrijving. Figuur 6.32 toont de resultaten. Er zijn grote verschillen te zien in bewegingsamplitude. Als men kijkt naar de blauwe curve, met een dempingskracht van 3,5 N, is te zien dat de vlotter bijna stil



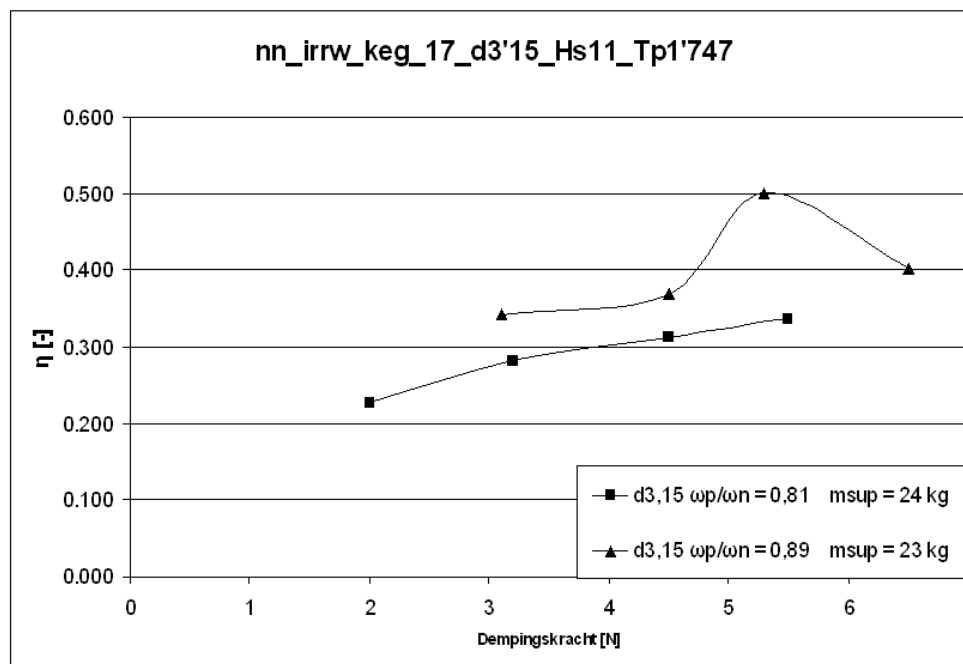
staat bij kleine golven (bv. tussen 36 en 39 s). Het geabsorbeerd vermogen is hier dan ook vrij klein. Bij de grotere golven is de bewegingsamplitude in dezelfde grootteorde als de invallende golf. Vooral bij deze golven wordt er veel vermogen geabsorbeerd. Het gemiddelde geabsorbeerde vermogen is voor de ongedempte beweging 0,278 W en 0,417 W voor de dempingskracht van 3,5 N.

## 6.5 Voorlopige besluiten

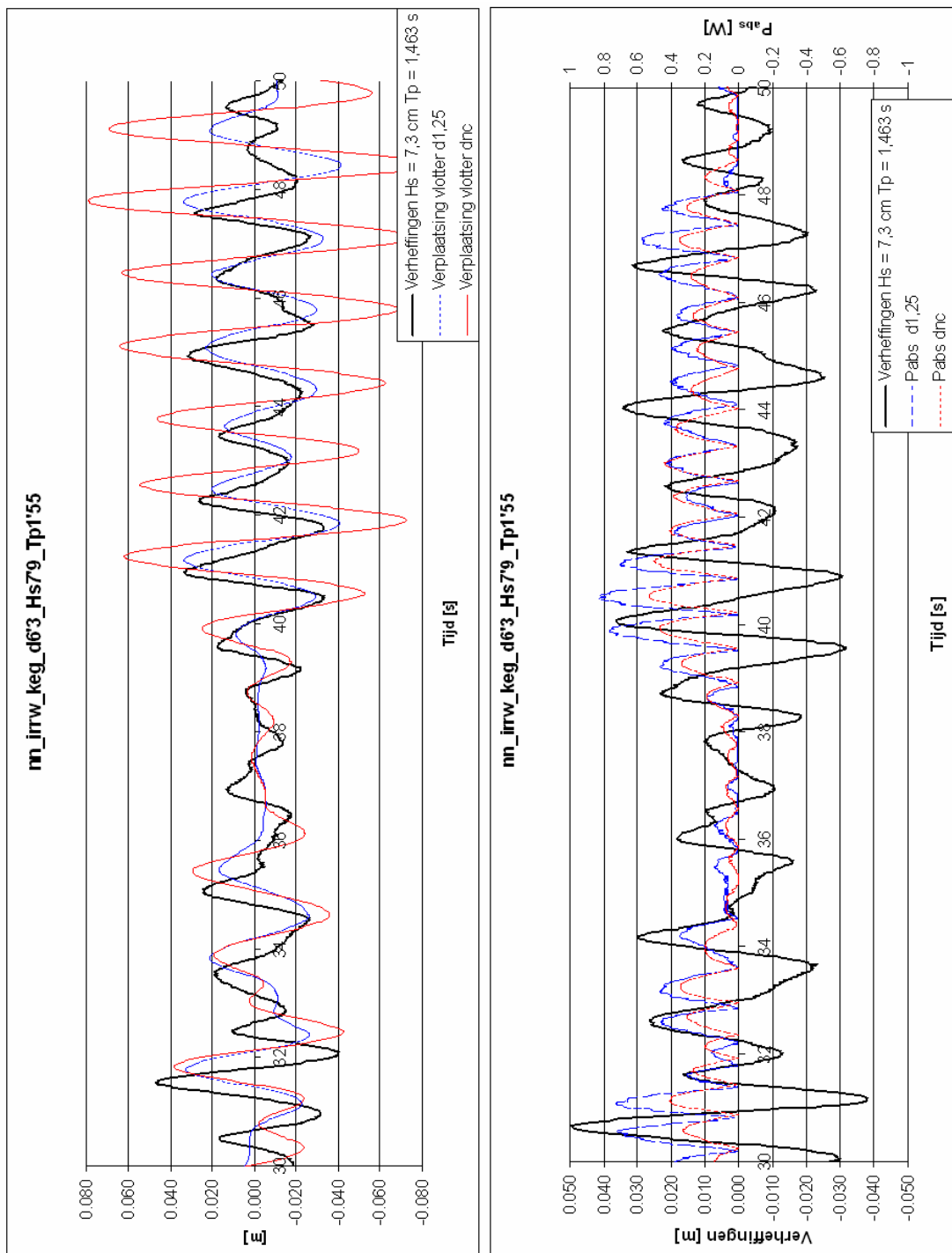
Uit voorgaande resultaten kunnen al enkele voorlopige besluiten getrokken worden.

Als eerste geeft de kegel een iets groter geabsorbeerd vermogen dan de bolvormige vlotter. Dit resultaat is enigzins voorspelbaar omdat de kegel grotere excitatiekrachten ondervindt. Daarnaast is de kegelvorm echter minder geschikt op vlak van niet-lineariteiten: de kegel zorgt voor veel grotere wervels, waardoor er energie verloren gaat. De winst lijkt echter groter te zijn dan verlies.

Optimale energieabsorptie wordt bekomen wanneer het systeem voor het geval van de regel-



**Figuur 6.31:** Efficiëntie in functie van dempingskracht voor 2 waarden van  $m_{sup}$ . Onregelmatige golf  $H_s = 10,7$  cm,  $T_p = 1,707$  s. Diepgang kegel = 0,189 m



**Figuur 6.32:** Verheffingen en vlotterverplaatsingen voor twee waarden van de dempingskracht. Ogenblikkelijk geabsorbeerd vermogen voor twee waarden van de dempingskracht. Onregelmatige golf Hs = 7,3 cm, Tp = 1,463 s. Diepgang kegel = 0,221 m.

matige golven in resonantie is met de golf. Voor het geval van onregelmatige golven moet de natuurlijke trillingsfrequentie van het systeem ongeveer 95% van de piekgolffrequentie bedragen. De externe dempingskracht zou ongeveer 3 tot 4 keer de hydrodynamische dempingskracht moeten zijn.

Verder is er ook duidelijk dat de kleinste diepgang de grootste efficiëntie oplevert, maar dat ook de bewegingsamplitudes hierbij het grootste zijn.

# Hoofdstuk 7

## Vergelijking met numerieke resultaten

In onderstaande tekst worden de resultaten behaald uit de fysische experimenten vergeleken met numerieke resultaten. Zowel voor regelmatige golven als voor onregelmatige golven is het mogelijk om de differentiaalvergelijking (4.24) numeriek op te lossen. De numerieke berekening voor het geval van onregelmatige golven werd door Yves Willems uitgevoerd [28]. De resultaten worden verder in sectie 7.2 vergeleken met de experimenteel behaalde waarden. Op voorhand kan zowel voor de regelmatige als voor de onregelmatige golven gezegd worden dat de numerieke resultaten een grotere efficiëntie zullen weergeven omdat deze modellen geen rekening houden met viskeuze verliezen en niet-lineaire effecten.

### 7.1 Regelmatige golven

Zoals eerder theoretisch en experimenteel aangetoond werd, is de excitatiekracht in regelmatige golven een harmonische trilling. In sectie 4.2.3 werd dan aangetoond dat het regimeantwoord op een dergelijke belasting ook een harmonische trilling is met dezelfde frequentie, maar een andere fasehoek en amplitude gegeven door (4.36). Met behulp van een MATLAB-scriptje, geschreven door begeleider Griet De Backer, kan dan de responsie en het eruit voortvloeiend geabsorbeerd vermogen berekend worden. Als input zijn de constanten die voorkomen in de bewegingsvergelijking (4.24) en de golfparameters nodig. Die constanten zijn de massa  $m$ , de supplementaire massa  $m_{sup}$ , de toegevoegde massa  $m_a$ , de hydrodynamische dempingscoëfficiënt  $b(\omega)$ , de externe dempingscoëfficiënt  $b_{ext}$ , de hydrostatische herstelkrachtcoëfficiënt  $c$  en de (amplitude van de) golfexcitatiekracht  $F_e(t)$ .

De massa en supplementaire massa worden experimenteel bepaald. De toegevoegde massa, de hydrodynamische dempingscoëfficiënt en de golfexcitatiekracht werden gehaald uit numerieke berekeningen [7]. De externe dempingskracht werd berekend via (6.3), de hydrostatische herstelkrachtcoëfficiënt via (5.5).

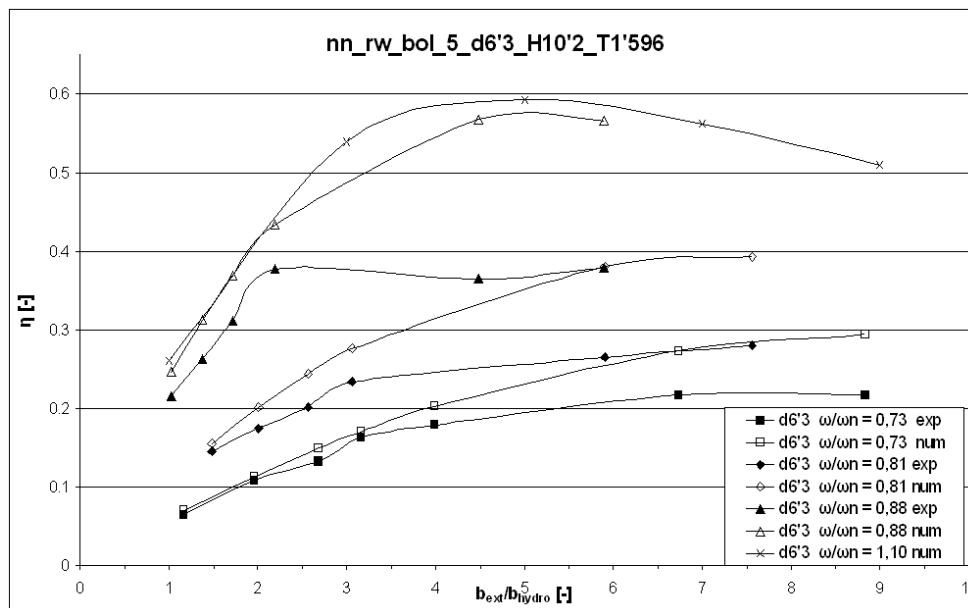
### 7.1.1 Bolvormige vlotter

Als eerste worden de resultaten met de bolvormige vlotter besproken. Figuur 7.1 vergelijkt de efficiëntie in functie van de dempingskracht voor verschillende waarden van de supplementaire massa. De regelmatige golf had een golfhoogte van 10,2 cm (inputgolfhoogte 12,2 cm) en een periode van 1,596 s. De diepgang van de vlotter was 6,3 cm van het cilindrisch gedeelte ofwel 0,221 m totale diepgang. De volle icoontjes stellen de experimenteel behaalde resultaten voor. De lege icoontjes zijn numerieke resultaten. De grafiek toont aan dat voor waarden van de verhouding  $b_{ext}/b_{hydro} < 3$  de numeriek en experimenteel behaalde efficiënties ongeveer gelijk zijn. Het verschil is gemiddeld 13%. Voor grotere waarden van de dempingskracht wordt het verschil groter. De verschillen in efficiëntie lopen dan op tot 40%. Deze trend is ook op te merken wanneer de dompamplitude van de vlotter vergeleken wordt met de golfamplitude (zie figuur 7.2), de verschillen zijn hier wel kleiner. Ze bedragen hier 6% en 20% respectievelijk.

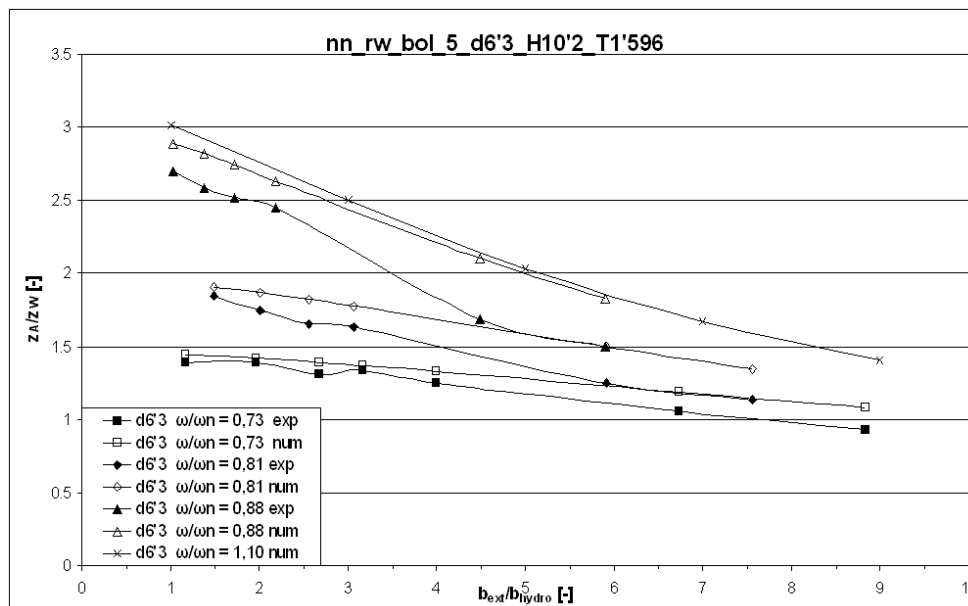
Wat ook opvalt in de figuren is dat de verschillen tussen experimenteel en numeriek groter worden als de eigenfrequentie van het systeem nadert tot de golffrequentie. In de buurt van resonantie zijn numerieke berekeningen echter niet betrouwbaar. Niet-lineaire effecten worden dan belangrijk. De responsie als het systeem (ongeveer) in resonantie is wordt numeriek sterk overschat. Bijvoorbeeld met een verhouding van  $\omega/\omega_n = 1$  en met  $b_{ext}/b_{hydr} = 1$  zou de dompamplitude 40 cm bedragen, ofwel 8 keer (!) de golfamplitude.

In figuur 7.1 is ook het numerieke resultaat voor de efficiëntie weergegeven wanneer de verhouding  $\omega/\omega_n = 1,10$  bedraagt. Zoals zichtbaar daalt de efficiëntie terug wanneer de eigenfrequentie van het vlottersysteem kleiner wordt dan de golffrequentie. In resonantie bedraagt de numeriek berekende efficiëntie 173%, wanneer de externe demping gelijk is aan de hydrodynamische.

Figuur 7.3 toont de invloed van de diepgang van de vlotter op het geabsorbeerde vermogen. De resultaten zijn op ware schaal voorgesteld. In de figuur is te zien dat het geabsorbeerd vermogen groter is bij een (totale) diepgang van 3 m dan bij de diepgang 4,5 m. De

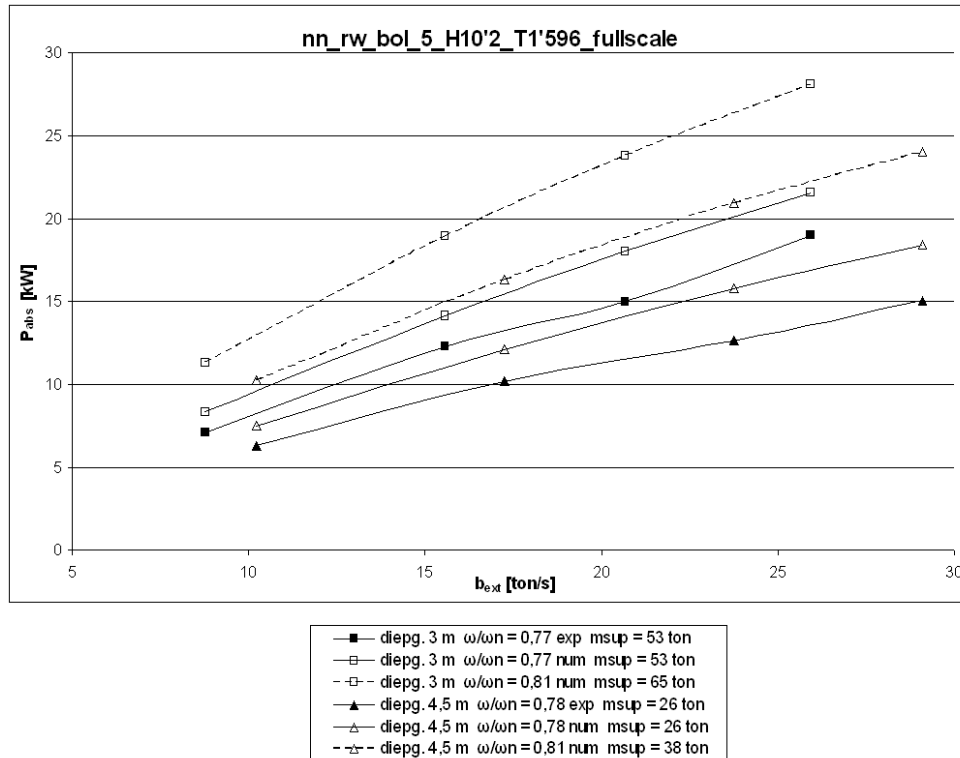


**Figuur 7.1:** Efficiëntie in functie van de dempingskracht. Regelmatige golf  $H = 10,2$  cm,  $T = 1,596$  s. Diepgang bol =  $0,221$  m.  $m_{sup} = \{8,14,20,31,41\}$  kg



**Figuur 7.2:** Bewegingsamplitude in functie van de dempingskracht. Regelmatige golf  $H = 10,2$  cm,  $T = 1,596$  s. Diepgang bol =  $0,221$  m.  $m_{sup} = \{8,14,20,31,41\}$  kg

verschillen tussen experimenteel en numeriek bedragen ongeveer 20%. De resultaten tonen dat experimenteel een geabsorbeerd vermogen van 19 kW haalbaar is. Op de figuur is ook het verschil zichtbaar tussen de frequentieverhouding van 77% en 81%. De verschillen zijn redelijk groot hoewel het verschil in eigenfrequentie betekelmijk klein is. Dit verklaart dat de op het eerste zicht merkwaardige resultaten op figuur 6.11 te wijten zijn aan het verschil in de verhouding  $\omega/\omega_n$ .

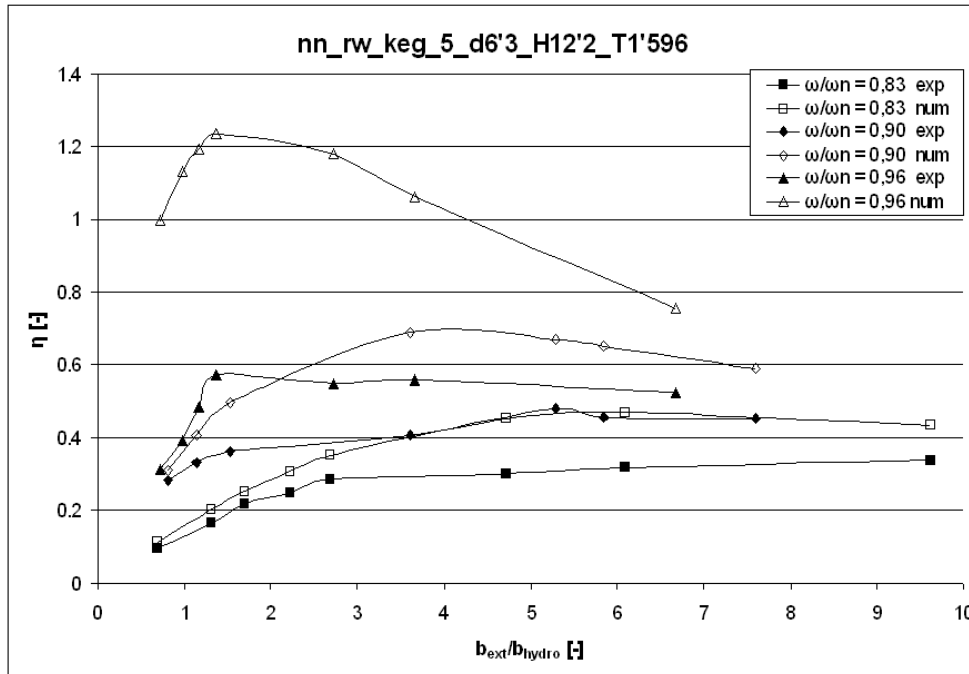


**Figuur 7.3:** Geabsorbeerd vermogen op ware schaal. Regelmatige golf  $H = 1,62$  m,  $T = 6,36$  s.

### 7.1.2 Kegelvormige vlotter

Voor de kegelvormige vlotter kunnen vergelijkbare grafieken opgemaakt worden. In figuur 7.4 wordt de efficiëntie voorgesteld als functie van de (relatieve) dempingskracht voor verschillende waarden van de frequentieverhouding. Net zoals bij de bolvormige vlotter is het verschil tussen de experimentele en numeriek berekende efficiëntie klein voor kleine waarden van  $b_{ext}/b_{hydro}$ . Bij grotere waarden van de relatieve dempingskracht neemt het verschil eerst toe, maar vanaf een verhouding van ongeveer 6 neemt het verschil weer af. De piek in efficiëntie bij de numerieke berekening komt niet voor in de experimentele resultaten.

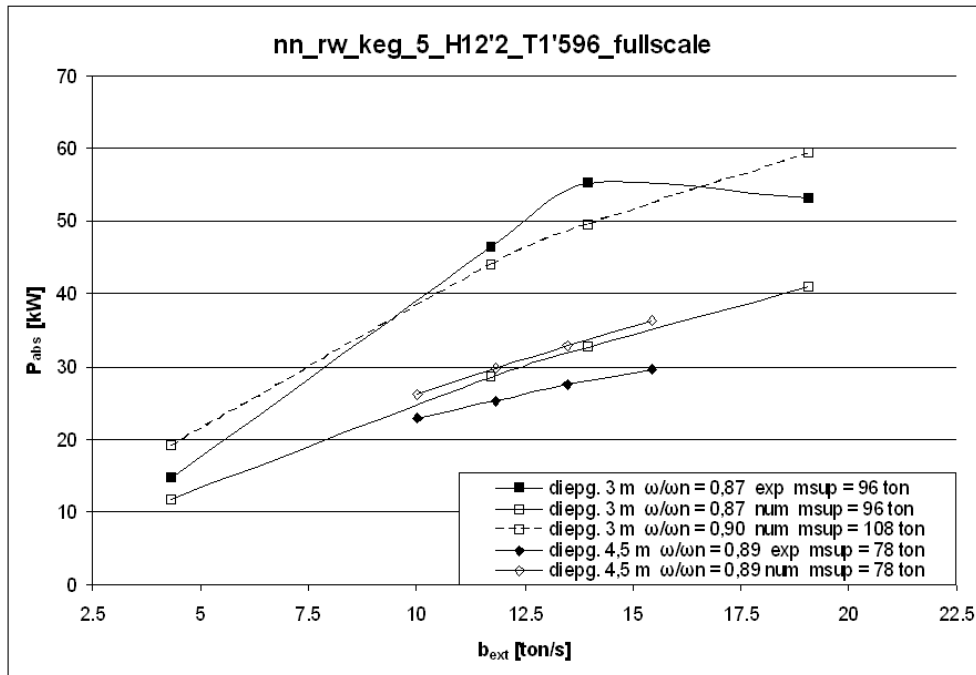
Op de figuur is nog te merken dat de numerieke resultaten bij een frequentieverhouding van 96% sterk afwijken van de experimentele. Ook hier zit het systeem dicht tegen resonantie en geeft de numerieke oplossing een onrealistisch hoge efficiëntie.



**Figuur 7.4:** Efficiëntie in functie van de dempingskracht. Regelmatige golf  $H = 10,2$  cm,  $T = 1,596$  s. Diepgang kegel =  $0,221$  m.  $m_{sup} = \{19,25,31\}$  kg

Figuur 7.5 toont op ware schaal het geabsorbeerde vermogen in functie van de dempingskracht voor twee waarden van de diepgang. De proef op ware schaal zou een regelmatige golf zijn met golfhoogte  $H = 1,162$  m en periode  $T = 6,36$  s. Op de figuur is duidelijk te zien dat de kleinste diepgang het grootste geabsorbeerde vermogen oplevert. Het maximum geabsorbeerd vermogen bedraagt ongeveer 55 kW. Daarvoor moet er wel een supplementaire massa van 96 ton aangebracht worden samen met een externe dempingscoëfficiënt van 14 ton/s hetgeen overeenkomt met een (constante) dempingskracht van 22 kN.





**Figuur 7.5:** Geabsorbeerd vermogen op ware schaal. Regelmatige golf  $H = 1,62$  m,  $T = 6,36$  s.

## 7.2 Onregelmatige golven

Voor onregelmatige golven is het aantal numerieke analyses, uitgevoerd door Yves Willems, beperkt gebleven door de lange rekentijd. Zoals eerder vermeld, gebeurt de numerieke analyse van de responsie in onregelmatige golven door het oplossen van de bewegingsvergelijking (4.24). Het enige dat werd aangepast aan de vergelijking, is dat de dempingskracht correcter gemodelleerd werd, namelijk als een blokgolf met constante amplitude, waarvan het teken afhangt van het teken van de snelheid. De dempingskracht die ingevoerd werd, is deze zoals ze experimenteel in de proeven werd waargenomen. Op deze manier is de numerieke modellering zo getrouw mogelijk met de werkelijkheid.

In de verdere figuren zal steeds het geabsorbeerde vermogen vergeleken worden. Om de efficiëntie te bekomen, moet er gedeeld worden door het golfvermogen, maar er is enige onzekerheid over de werkelijke waarde van het golfvermogen. Zowel Yves Willems als Tri Hoang Tran hebben dit vermogen berekend, maar er zit enig verschil op de resultaten. Om geen verkeerde conclusies te trekken uit bijvoorbeeld de maximale efficiëntie wordt dit hier achterwege gelaten. Ter informatie toont tabel 7.1 de resultaten van het berekende

golfvermogen.

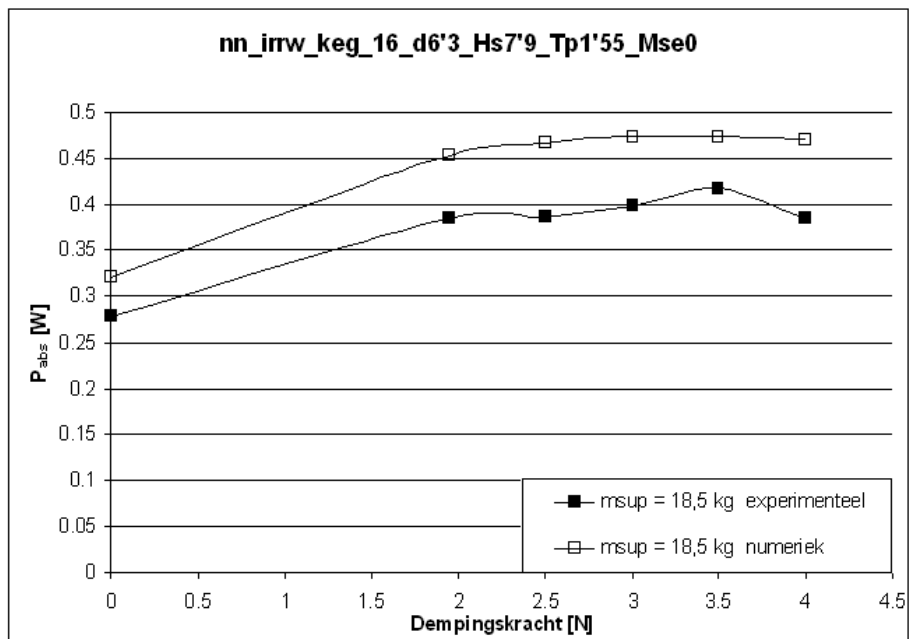
Hs	Tp	Pw Tri	Pw Yves	Vershil
[m]	[s]	[W]	[W]	[%]
0,073	1,463	1,875	1,254	49,52%
0,0107	1,707	3,625	3,429	5,72%

**Tabel 7.1:** Vergelijking van het invallend golfvermogen berekend over de diameter van een vlotter

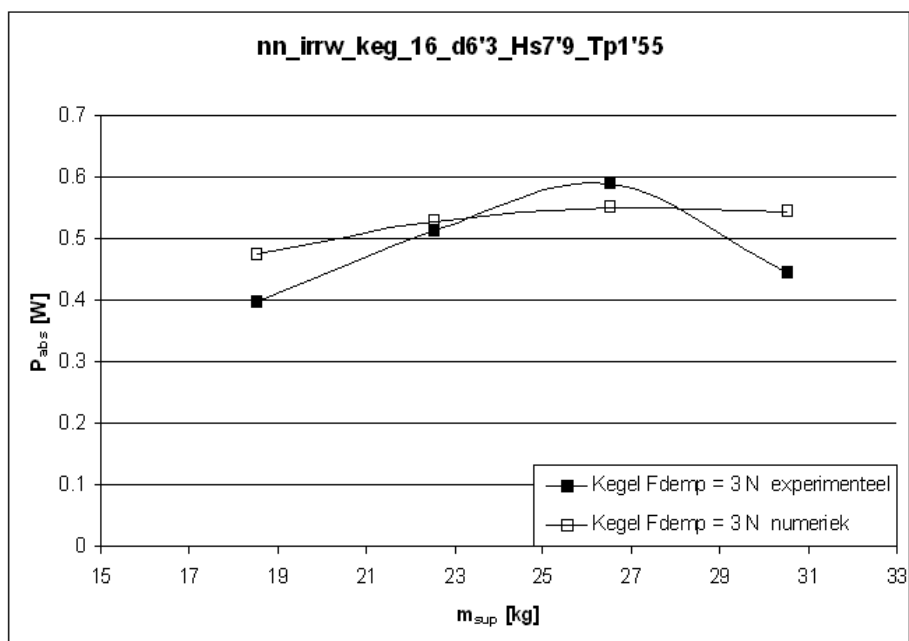
Figuur 7.6 toont voor de kegelvormige vlotter het verschil in numeriek en experimenteel bepaald geabsorbeerd vermogen in functie van de dempingskracht. Deze proef is uitgevoerd in onregelmatige golven met significante golfhoogte  $H_s = 7,3$  cm en piekperiode  $T_p = 1,463$  s. De dempingskracht bedraagt 18,5 kg, resulterend in een frequentieverhouding  $\omega_p/\omega_n$  van 0,85. De figuur vertoont zeer goede resultaten: niet alleen is het verschil in geabsorbeerd vermogen klein (gemiddeld 18%), anderzijds is het verschil tussen de twee curves ook constant. De figuur vertoont voor de numerieke berekening een optimum voor een dempingskracht tussen 3 en 3,5 N. Bij de experimentele bepaling ligt het optimum op 3,5 N. Het geabsorbeerde vermogen is dan 0,417 W. De reden waarom bij de numerieke resultaten een hogere waarde van het geabsorbeerd vermogen bekomen wordt is omdat er geen rekening gehouden wordt met niet-lineaire effecten. Ook kan het zijn dat bij de kleinere bewegingen de inwendige wrijving groter is dan de aangenomen constante waarde van 2,2 N.

Er werd ook gekeken wat het verschil tussen de numerieke en experimentele waarde van de absorptie zou zijn als de dempingskracht constant gehouden wordt en als de supplementaire gevarieerd wordt. Figuur 7.7 toont het resultaat. Weer is er een zeer goede overeenstemming tussen het numerieke en experimentele resultaat. De resultaten liggen weer binnen de 20 % van elkaar. Op de figuur is ook te zien dat de experimenteel bepaalde curve een meer uitgesproken optimum vertoont. De optima werden wel behaald voor dezelfde waarde van de supplementaire massa, namelijk 26,5 kg, resulterend in een verhouding  $\omega_p/\omega_n$  van 0,95.

Ook voor de bolvormige vlotter kunnen we een curve opstellen die het verband geeft tussen de supplementaire massa en het geabsorbeerd vermogen. Figuur 7.8 toont het resultaat. Numeriek wordt gemiddeld een 21% hoger geabsorbeerd vermogen gemeld. Op de figuur is

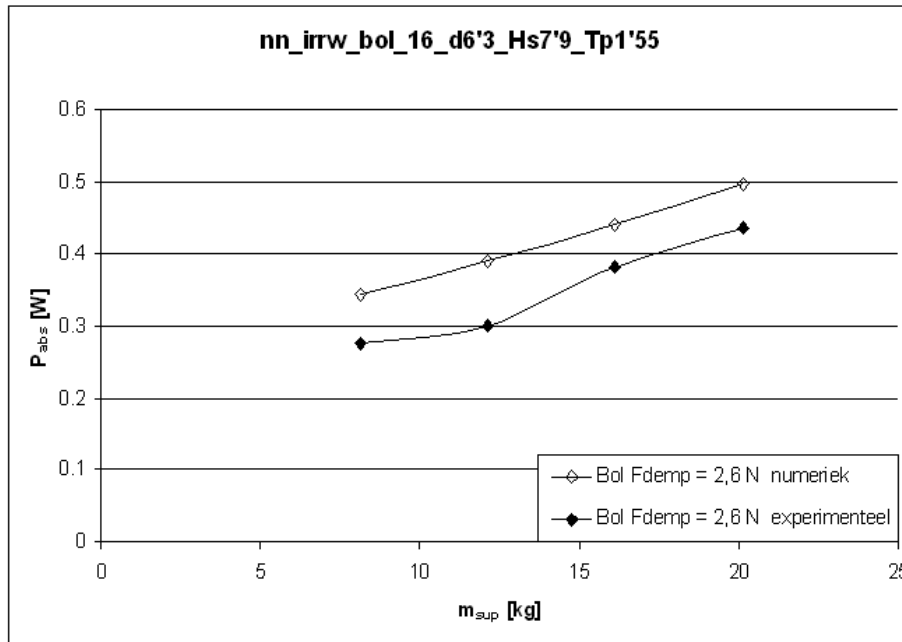


**Figuur 7.6:** Geabsorbeerd vermogen in functie van dempingskracht. Onregelmatige golf  $H_s = 7,3$  cm,  $T_p = 1,463$  s. Diepgang kegel = 0,221 m.



**Figuur 7.7:** Geabsorbeerd vermogen in functie van supplementaire massa. Onregelmatige golf  $H_s = 7,3$  cm,  $T_p = 1,463$  s. Diepgang kegel = 0,221 m.

er geen optimum zichtbaar. De maximaal geteste waarde van de supplementaire massa is 21 kg, resulterend in een verhouding  $\omega_p/\omega_n$  van 0,91. Naar grote waarschijnlijkheid zal ook hier het optimum rond een verhouding van 0,95 schommelen. Een numerieke berekening zou deze bewering kunnen staven.



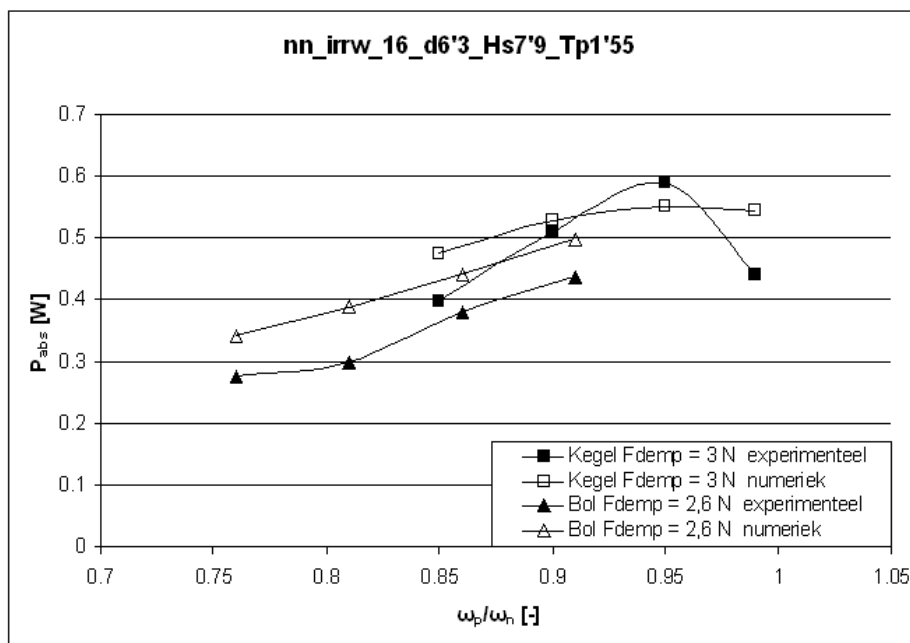
**Figuur 7.8:** Geabsorbeerd vermogen in functie van supplementaire massa. Onregelmatige golf Hs = 7,3 cm, Tp = 1,463 s. Diepgang bol = 0,221 m.

In figuur 7.9 worden tenslotte de resultaten van de bol en de kegel eens naast elkaar gelegd. Als men ermee rekening houdt dat er bij de bolvorm een iets lagere dempingskracht gebruikt was, dan kan men aannemen dat het verschil in geabsorbeerd vermogen tussen de twee vlotters zeer klein is. Aan de helling van de twee experimenteel bepaalde curven kan men wel zien dat de kegel een iets hoger optimum oplevert. De kegel lijkt dan ook gevoeliger te zijn aan de 'juiste' waarde van de supplementaire massa.

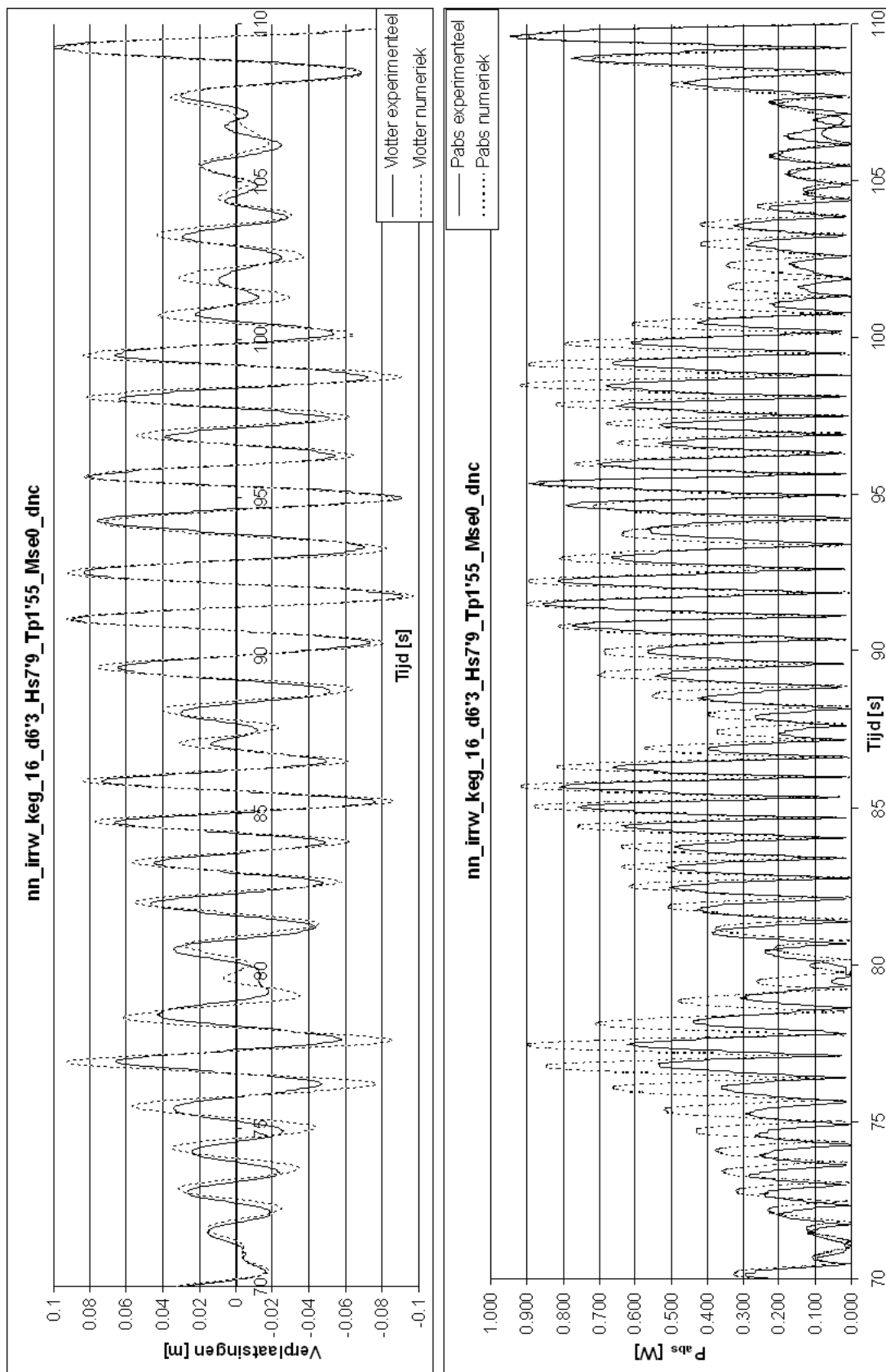
Tot slot werden de resultaten van de responsie (d.i. de dompbeweging) met elkaar vergeleken. Dit werd gedaan voor twee proeven in een onregelmatige golf met Hs = 7,3 cm en Tp = 1,463 s. De supplementaire massa bedroeg 18,5 kg. De twee gebruikte waarden voor de dempingskracht zijn enerzijds 0 N waarbij er dus geen externe demping werd toegepast, en anderzijds een dempingskracht van 3 N. Figuur 7.10 toont in de bovenste grafiek de numeriek berekende (stippellijn) en de experimenteel waargenomen (volle lijn) dompbeweging

van de vlotter. Op de onderste figuur is het ogenblikkelijk geabsorbeerde vermogen weer-gegeven. Er is zichtbaar dat het numerieke resultaat zeer mooi past op het experimenteel waargenomen resultaat. De numerieke curve heeft iets grotere amplitudes vertoont iets grotere amplitudes. In eerste plaats zou men denken aan niet-lineaire effecten, maar net bij de grootste bewegingen zoals bv. op  $t = 91$  s en  $t = 109$  s zijn de maxima vergelijkbaar, wat dus de hypothese van niet-lineariteit tegenspreekt. Een betere verklaring is dat het numerieke model uitgaat van constante parameters  $m_a$ ,  $b$  en  $F_{excitatie}$ , daar waar die in werkelijkheid frequentieafhankelijk zijn. Dus voor bepaalde frequenties zal de responsie anders zijn dan de ware dompbeweging. Het totaal geabsorbeerde vermogen in deze proef was experimenteel 0,278 W en numeriek 0,321 W, een verschil van 13%.

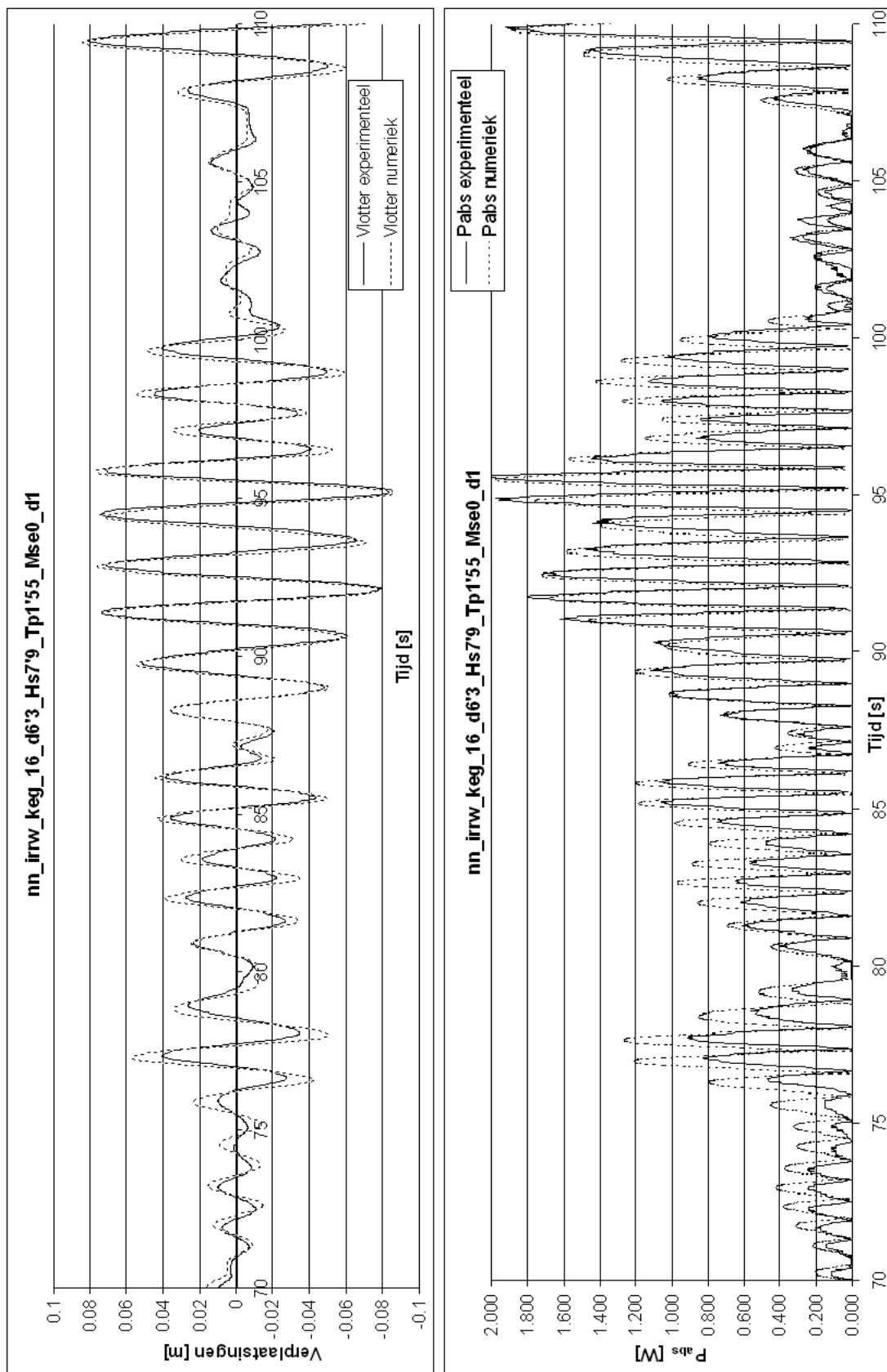
Voor een dempingskracht van 3 N werd eenzelfde figuur opgesteld. Figuur 7.11 toont het resultaat. Ook hier blijkt het verschil in responsie afhankelijk van de golfcomponent. Het geabsorbeerde vermogen bedraagt experimenteel 0,398 W terwijl het numerieke resultaat 0,475 W oplevert, een verschil van 20%. Zoals zichtbaar zijn de amplitudes in deze figuur iets kleiner dan in de vorige figuur. Dit komt uiteraard door de grotere demping. Ook het verschil in geabsorbeerd vermogen is duidelijk. Op figuur 7.10 waren pieken tot 1 W te zien, terwijl er hier pieken zijn tot het dubbele. Wanneer de figuren van de dompbeweging verder vergeleken worden voor de twee dempingskrachten, is te zien dat vooral in de kleine golven het amplitudeverschil groot is. Bij de grotere dempingskracht worden deze golfjes te sterk gedempt, waardoor er slechts een kleine dompsnelheid ontstaat. Het geabsorbeerde vermogen in deze golfjes is niet veel groter dan bij de ongedempte beweging. Dit toont nogmaals het belang van een snelheidsafhankelijke demping aan.



**Figuur 7.9:** Geabsorbeerd vermogen in functie van de frequentieverhouding  $\omega_p/\omega_n$ . Onregelmatige golf Hs = 7,3 cm, Tp = 1,463 s. Diepgang vlotter = 0,221 m.



**Figuur 7.10:** Dompbeweging vlotter en ogenblikkelijk geabsorbeerd vermogen. Onregelmatige golf  $H_s = 7,3$  cm,  $T_p = 1,463$  s. Diepgang kegel = 0,221 m.  $m_{sup} = 18,5$  kg. Geen externe dempingskracht.



**Figuur 7.11:** Dompbeweging vlotter en ogenblikkelijk geabsorbeerd vermogen. Onregelmatige golf  $H_s = 7,3$  cm,  $T_p = 1,463$  s. Diepgang kegel = 0,221 m.  $m_{sup} = 18,5$  kg.  $F_{demp} = 3$  N.



# Hoofdstuk 8

## Conclusies

In dit hoofdstuk worden besluiten getrokken in verband met het onderwerp van dit afstudeerwerk. In de inleidende hoofdstukken over golfenergieconvertoren werd duidelijk dat er vele types zijn, elk met hun eigen sterktes en zwaktes. Bij de point absorbers wordt er vooral op gerekend dat ze opereren in resonantie met de invallende golven. Om tot dat resonantiegedrag te komen, zijn er (minstens) drie manieren: tuning, latching en free-wheeling. Tuning betekent dat de eigenfrequentie van het systeem steeds aangepast wordt aan de invallende golffrequentie door toevoeging van supplementaire massa. Bij latching en free-wheeling wordt er geen massa toegevoegd, maar wordt de dompbeweging gecontroleerd. Voor huidige thesis werd tuning vooropgesteld omdat dit mechanisme reeds in het verleden aan de universiteit getest is. Met behulp van de oude opstelling is er een nieuwe opstelling ontwikkeld die probeert alle mindere kanten van de oude opstelling te vermijden. Onder andere is de inwendige wrijving gehalveerd, is de constructie veel stijver gemaakt en worden de bewegingen en krachten nauwkeuriger opgemeten. De ontwikkeling van de huidige opstelling kan echter nog verdergaan: men kan de inwendige wrijving nog verminderen door de lagers te verbeteren en de krachtmetingen nog verbeteren door de uitlijning van de verschillende onderdelen te verbeteren.

In de golfboot in Borgerhout zijn er verschillende vermogensabsorptieproeven uitgevoerd op zowel regelmatige als onregelmatige golven. Er zijn proeven gebeurd met twee verschillende vlotters op 3 verschillende diepgangen. De bolvormige vlotter is uit hydrodynamisch standpunt de minst gunstige, terwijl de kegelvormige vlotter voor meer wervelvorming en dus energieverlies zorgt. De kleinste geteste diepgang is uit hydrodynamisch standpunt de beste, terwijl bij de grootste diepgang de kans op slamming de kleinste is. De intermediaire diepgang is een compromis tussen beide diepgangen. Daarnaast is ook de supplementaire

massa en dempingskracht gevarieerd per proef.

Uit de experimentele proeven volgt dat optimale energieabsorptie optreedt onder resonantie. Bij het testen in regelmatige golven is gebleken dat de optimale waarde van de supplementaire massa zo is dat de natuurlijke trillingsperiode gelijk is aan de invallende golfperiode. Om tot die optimale waarden te komen blijkt echter dat de supplementaire massa's op ware schaal onrealistisch groot worden: zo is aangetoond dat er soms meer dan 100 ton nodig is om tot resonantie te komen. Een latching strategie is daarom veel realistischer. Numerieke studie heeft ook aangetoond dat met latching een groter geabsorbeerd vermogen te bekomen is. Als gekeken wordt naar de dempingskracht, dan moet die ongeveer 3 tot 4 keer de waarde van de hydrodynamische dempingskracht bedragen om optimale energieabsorptie te bekomen. In regelmatige golven werd een maximaal geabsorbeerd vermogen van 6,4 W bekomen, overeenstemmend met 100 kW op ware schaal.

Uit proeven op onregelmatige golven is gebleken dat optimale energieabsorptie bekomen wordt als de natuurlijke trillingsfrequentie van het vlottersysteem 95% van de piekgolf-frequentie bedraagt. De optimale waarde van de dempingskracht blijkt dezelfde als bij regelmatige golven.

Tot slot werd ook nog een vergelijking met numerieke data gemaakt. Ondanks de sterke vereenvoudigingen die bij de numerieke modellering aanwezig zijn (o.a. constante excitatiekrachten en toegevoegde massa's), komen de resultaten zeer goed overeen. Voor kleine waarden van de dempingskracht blijkt de numerieke studie een 15% hogere efficiëntie op te leveren. Voor grotere waarden van de dempingskracht loopt het verschil op tot 40%. Naarmate de frequentieverhouding nadert tot het resonantiegeval, ligt het numerieke resultaat steeds verder van het experimenteel bepaalde. Dit komt door de sterk niet-lineaire effecten die dan optreden. Ook bij onregelmatige golven zijn de overeenkomsten frappant.

Doordat de numerieke resultaten zo goed overeenkomen met de experimentele resultaten, is het mogelijk om op voorhand een zeer uitgebreide numerieke studie te doen in onregelmatige golven. Op basis van deze resultaten kan dan een nieuw proefschema opgesteld worden om gericht proeven te doen. Bijvoorbeeld met veel grotere dempingskrachten. Daarvoor zullen echter ook enkele beperkingen van het systeem (o.a. zwakke koppelingen) verbeterd moeten worden daar dit met het huidige systeem niet mogelijk is.

# Bijlage A

## Koppelmeter

De gebruikte koppelmeter is van het type Digital RWT/310 van het merk Sensor Technology. Het bereik van de koppelmeter is  $\pm 3Nm$  met een juistheid van  $\pm 0,25\%$ , d.w.z. 7,5 Nmm. De datasheet volgt hierna.

# TORQSENSE®

## RWT310/320 series Torque Transducer



## Digital RWT310/320 series Torque Transducer

TorqSense Digital RWT310 & 320 series transducers with integral electronics now offer cost effective, non-contact digital rotary torque measurement, using Surface Acoustic Wave technology, suitable for torque monitoring, testing or controlling drive mechanisms. TorqSense RWT310 & 320 series transducers and their technology are particularly appropriate for OEM applications.

### Benefits

- Minimal shaft length  
- High shaft stiffness
- Low inertia – High Speed capability because electronics are not fixed on to shaft
- Non contact measurement
- High bandwidth  
200% safe mechanical overload
- High accuracy and resolution
- Excellent noise immunity
- Integral digital electronics
- Operates both statically and dynamically  
- Clockwise/anti-clockwise
- Any full scale torque can be specified within Standard range: 500mNm through to 10,000Nm
- Lifetime warranty



Consult factory for ranges greater than 10KNm

High speeds available on request

### Technology

TorqSense patented technology is the measurement of the resonant frequency change in 'frequency dependent' surface acoustic wave devices, caused when strain is applied. The signal is coupled via a non-contact RF rotating couple from the shaft to a fixed pick-up.

Integral electronics enables the resonant frequencies to be measured and offer user selectable features, digital outputs and diagnostics. SAW devices are not affected by magnetic fields.

US Patents: US5585571, US6478584.  
RWT3243R

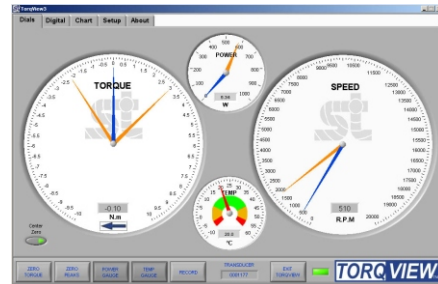
### Software

TorqView is an easy to use advanced torque monitoring software, available to assist data recording and instrumentation displays that interface with Windows based PCs. See TorqView datasheet.

Features: 3 types of display. Text files compatible with Matlab and Excel. Real time chart plotting.

LabView VIs are available for users to design their own process control applications.

DLLs are also available for users to write their own custom software.



### TorqSense RWT310 series transducers offer:

- Fixed voltage or current analog outputs (one for torque and the other for speed or power) for interfacing with legacy analog instrumentation
- BIT Self-diagnostics for letting the manufacturer know that the transducer's torque, speed ratings and calibration due date have not been exceeded.
- Simple 'Fail' output pin
- Sensors to monitor shaft temperature for better compensation and accuracy

### Whereas, TorqSense RWT320 series transducers offer:

- 2 x user selectable voltage or current analog outputs (one for torque and the other for speed, power or peak torque) for interfacing with legacy analog instrumentation
- Digital outputs, such as RS232 and USB, for interfacing with modern instrumentation and laptops
- Digital input for configuring transducer via PC
- BIT Self-diagnostics for letting users know data is trustworthy, that the transducer's torque, speed ratings and calibration due date have not been exceeded
- Transducer configuration software to allow user to changes transducer variables
- Ability to connect up to 10 transducers using USB
- Simple 'Fail' output pin
- Sensors to monitor shaft temperature for better compensation and accuracy

## RWT310/320 Series Torque Transducers - Data Specification

Parameter	Condition	Data								Units	
<b>RWT310/320 Torque measurement system</b>											
Measurement method	Strain Dependent Surface Acoustic Wave Resonators (interrogated by an incremental electronic scanning method)										
Torque range	<i>(See Notes 1 &amp; 2 below)</i>	0 – 0.5 to 0 – 1	0 – 1.1 to 0 – 20	0 – 21 to 0 – 100	0 – 101 to 0 – 500	0 – 501 to 0 – 2000	0 – 2001 to 0 – 10000				Nm
		<i>[0 – 5 to 0 – 10]</i>	<i>[0 – 11 to 0 – 200]</i>	<i>[0 – 201 to 0 – 1000]</i>	<i>[0 – 1001 to 0 – 5000]</i>	<i>[0 – 5001 to 0 – 20000]</i>	<i>[0 – 2001 to 0 – 100000]</i>				<i>[lbf in]</i>
Shaft size (diameter)		6	12	20	30	50	75				mm
<b>Rotation speed/angle of rotation measurement system</b>											
Measurement method	IR optical transceiver through slotted disc										
Output signal	Digital, TTL level (5V, square wave signal)										
Update rate (frequency mode above 80 rpm)	Fixed output	1								sec	
Update time (period mode below 80 rpm)	Variable output	1000/(RPM x 60)								ms	
Rotational speed (max)	<i>(See Note 3)</i>	30,000	20,000	15,000	12,000	9,000	6,000				RPM
<b>Temperature</b>											
Measurement method	IR temperature sensor monitoring actual shaft temperature										
Temperature accuracy		±1								°C	
Reference temperature, T <sub>RT</sub>		20								°C	
Operating range, ΔT <sub>O</sub>		-10 to +50								°C	
Storage range, ΔT <sub>S</sub>		-20 to +70								°C	
Temperature drift (FS)	Max	0.05								%FS/°C	
<b>RWT310 Series Transducers ONLY</b>											
Linearity		±0.2								%FS	
Hysteresis		<0.1								%FS	
Resolution		0.1								%FS	
Frequency response		101								Hz	
Accuracy	20°C, SM <i>(See Note 4)</i>	±0.25								%FS	
<b>RWT320 Series Transducers ONLY</b>											
Linearity		±0.2								%FS	
Hysteresis		<0.1								%FS	
Resolution		0.1								%FS	
Frequency response		1620	810	405	202	101	50	25	12	Hz	
Accuracy	20°C, SM <i>(See Note 4)</i>	±1	±0.7	±0.5	±0.4	±0.25	±0.25	±0.25	±0.25	%FS	
Digital averaging	<i>(See Note 5)</i>	1	2	4	8	16	32	64	128	N	
<b>Analogue output</b>											
Output voltage		±1 / ±5 / ±10 (Default is ±5Vdc on RWT310 Series) (Output voltage is user selectable from ±1 to ±10 on RWT320 Series)								Vdc	
Output current		4-20 optional (0-20 not yet available) (user selectable on RWT320 Series when 0-20 available)								mA	
Load impedance		1								KΩ	
<b>Digital output (RWT320 Series Transducers ONLY)</b>											
Output type		RS-232 (Standard), USB (optional)									
Sampling rate		1.62								ksps	
<b>Power supply</b>											
Nominal voltage, V <sub>S</sub>		12 to 32 (max)								V	
Current consumption, I <sub>S</sub>		290 (max)								mA	
Power consumption, W <sub>S</sub>		3.5								W	
Allowed residual ripple of excitation voltage, V <sub>ripple</sub>		500 (above nominal supply voltage)								mVp-p	
<b>Electromagnetic compatibility</b>											
EMC compatibility		EN 61326:2006									

*Note 1. Any torque/FSD is possible between ranges – please specify max rated torque.*

*Note 2. Max rated torque should not be exceeded.*

*Note 3. Please consult factory for applications requiring rotational speeds that exceed maximum figures given.*

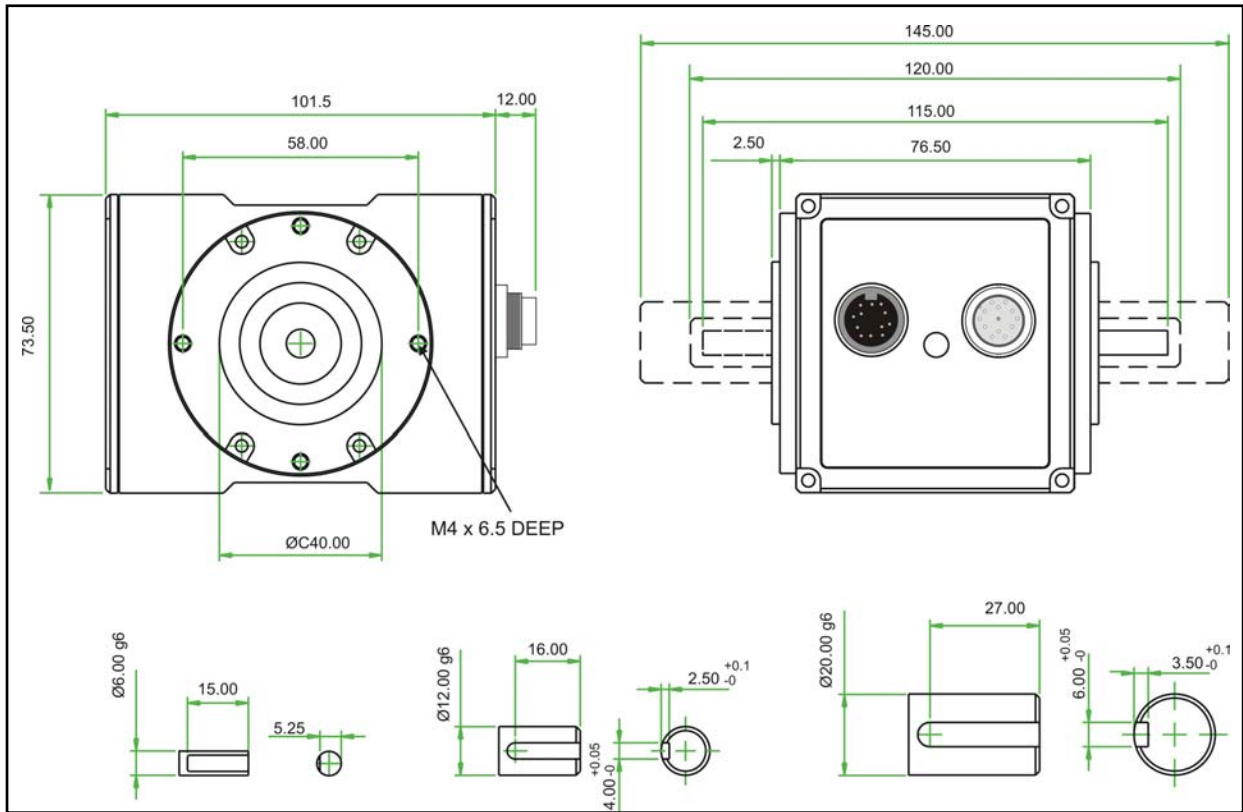
*Note 4. SM – Static Mode. Dynamic values will depend upon user application and has to be adjusted accordingly.*

*Note 5. Digital averaging can be configured by user to optimise accuracy/frequency response for specific user applications. Digital averaging default setting is N=16. For details see User Manual.*

*Sensor Technology Ltd reserves the right to change specification and dimensions without notice.*

# RWT310/320 Series Torque Transducers

## Dimensions (0.5Nm to 100Nm)



Parameter	Data													Units
<b>Mechanical Properties</b>														
Torque (Max)	0.6	1	2.5	3.9	6	8.5	13	17.5	20	30	55	85	100	Nm
Shaft Code	CE	CF	DA	DF	DB	DC	DG	DD	DE	EB	EC	ED	EE	
Shaft Size (Diameter)	6		12						20					mm
Torsional Stiffness (Note 5)	0.22	0.23	1.28	1.3	1.32	1.6	1.7	1.8	1.9	4.1	6.4	8.1	9.2	KNm/rad
Mass moment of inertia, $L_v$	0.42	0.45	5.96	6.00	6.04	6.13	6.18	6.24	6.42	22.9	23.9	25.4	27.2	$\times 10^{-6}$ kg m <sup>2</sup>
Max measurable load limit	120 (of rated torque)													%
Static safe load breaking	200 (of rated torque)													%
Shaft weight, approx	0.03	0.03	0.14	0.14	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15	0.36	0.37	0.40	0.41	kg
Transducer with shaft weight, approx	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1.0	1.0	1.1	1.1	kg

Data parameters measured at +20°C  
 Sensor Technology Ltd reserves the right to change specification and dimensions without notice.

# Bijlage B

## Reflectieanalyse

*De hierna volgende reflectieanalyse werd gemaakt met het programma Wavelab 2, ontwikkeld door de Universiteit van Aalborg in Denemarken. De reflectieanalyse betreft een regelmatige golf met (input)golfhoopte  $H = 4,1$  cm en periode  $T = 1,052$  s.*



# Reflection Analysis

## Input Parameters

### General

Data file: F:\...2008\_03\_26\_rw\_H4'1\_T1'052.lf  
 Sample frequency: 25 Hz  
 Water depth: 1 m  
 Length scale (Prototype/Model): 1  
 Distance between gauge 1 and 2: 0.3 m  
 Distance between gauge 1 and 3: 0.64 m

	Gauge 1	Gauge 2	Gauge 3
Channel number:	3	5	9
Calibration function:	1.0*X	1.0*X	1.0*X
Skipped lines	Header: 45	Start: 15500	End: 500

### Bandpass filtering

Freq. lower bound: 0.309 Hz  
 Freq. upper bound: 2.783 Hz

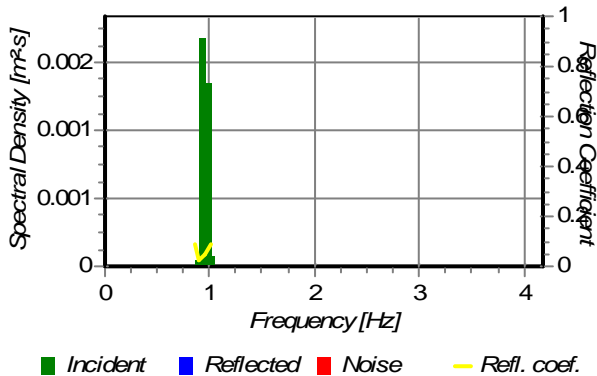
### Freq. Domain Analysis (MF)

Overlap of subseries: 20%  
 Cosine taper width: 20%  
 Data No. in FFT block: 512  
 Number of FFT blocks: 9

### Time Domain Analysis (MF+InvFFT)

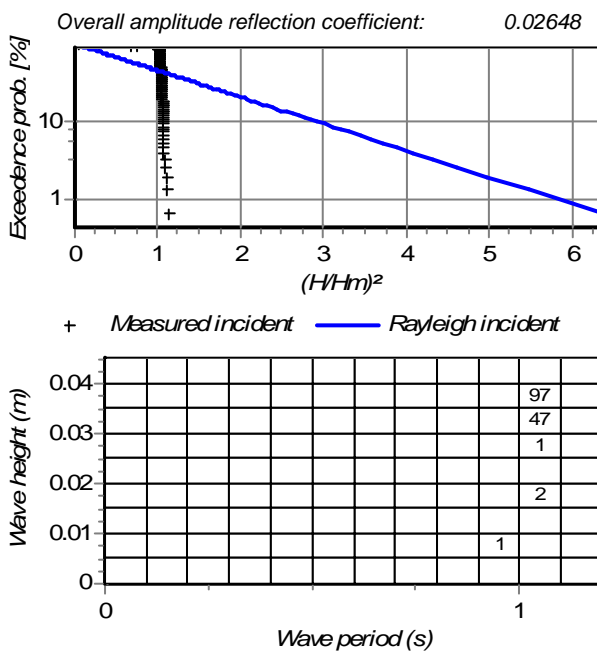
Min. points between downcrossings: 5  
 Hilbert filter length: 256  
 X-Coord for results: 0 m

## Frequency Domain Analysis (Mansard & Funke)



	Incident	Reflected
Overall amplitude reflection coefficient:		0.04455
Sig. wave height $H_{m0}$ (m):	0.04965	0.002212
Peak wave period $T_p$ (s):	1.078	1.024
Mean wave period $T_{-1,0}$ (s):	1.054	1.101
Mean wave period $T_{0,1}$ (s):	1.052	1.063
Mean wave period $T_{0,2}$ (s):	1.052	1.043
Spectral Width (Broadness):	0.08726	0.4606
Spectral Width (Narrowness):	0.03824	0.1993

## Time Domain Analysis (MF+InvFFT)



	Incident	Reflected
Overall amplitude reflection coefficient:		0.02648
Number of waves:	148	153
Mean wave height $H_m$ (m):	0.0347	0.0008533
Mean wave period $T_m$ (s):	1.053	1.016
Sig. wave height $H_s$ (m):	0.03567	0.001174
$T_{H_{1/3}}$ (s):	1.052	1.044
Sig. wave period $T_s$ (s):	1.056	1.138
$H_{max}$ (m):	0.03678	0.002518
$T_{H_{max}}$ (s):	1.051	1.136
$H_{1/10}$ (m):	0.03602	0.001554
$H_{1/50}$ (m):	0.03662	0.002266
$H_{1/100}$ (m):	0.03678	0.002387
$H_{1/250}$ (m):	0.03678	0.002518
$H_{0.1\%}$ (m):	Not enough data	Not enough data
$H_{1\%}$ (m):	0.03676	0.002379
$H_{2\%}$ (m):	0.03638	0.002014
$H_{10\%}$ (m):	0.03571	0.001226
Groupiness factor GF:	0.1015	1.065
Skewness b1:	-0.006611	-0.02318
Kurtosis b2:	1.535	3.362



Department of Civil Engineering

Ghent University

Project title	Reflectie analyse
Drawn by	Kim De Beule
Date	6. apr 2008
Remarks	rw_H4'1_T1'052
Page	1 of 1

# Bijlage C

## Numerieke gegevens uit Wamit

*Deze gegevens zijn bekomen via Griet De Backer voor een vlotter met diameter 5 meter.  
Ze werden herschaald naar de vlotters van 0,315 m diameter.*

## TABEL MET NUMERIEKE PARAMETERS BEREKEND MET WAMIT

### 1. BOL

Diepgang cil. stuk [m]	Diepgang totaal [m]	golfnr.	H [m]	T [s]	$\omega$ [rad/s]	k [N/m]	$m_a$ [kg]	m [kg]	Mss [kg]	Mse [kg]	$m_{sup}$ [kg]	$\omega_h$ [rad/s]	$b_{hydr}$ [kg/s]
0.0315	0.189	4	0.122	1.360	4.620	764.5	5.376	10.221	13.232	6.989	20.221	4.620	11.456
0.0315	0.189	5	0.122	1.596	3.937	764.5	5.951	10.221	13.232	19.923	33.155	3.937	9.275
0.0315	0.189	6	0.163	1.747	3.597	764.5	6.251	10.221	13.232	29.399	42.630	3.597	7.950
0.063	0.2205	4	0.122	1.360	4.620	764.5	5.126	12.771	8.132	9.789	17.921	4.620	10.161
0.063	0.2205	5	0.122	1.596	3.937	764.5	5.676	12.771	8.132	22.748	30.880	3.937	8.478
0.063	0.2205	6	0.163	1.747	3.597	764.5	5.976	12.771	8.132	32.224	40.355	3.597	7.372
0.126	0.2835	4	0.122	1.360	4.620	764.5	4.838	17.771	6.532	6.677	13.209	4.620	7.818
0.126	0.2835	5	0.122	1.596	3.937	764.5	5.328	17.771	6.532	19.696	26.228	3.937	7.022
0.126	0.2835	6	0.163	1.747	3.597	764.5	5.596	17.771	6.532	29.204	35.736	3.597	6.306

### 2. KEGEL

Diepgang cil. stuk [m]	Diepgang totaal [m]	golfnr.	H [m]	T [s]	$\omega$ [rad/s]	k [N/m]	$m_a$ [kg]	m [kg]	Mss [kg]	Mse [kg]	$m_{sup}$ [kg]	$\omega_h$ [rad/s]	$b_{hydr}$ [kg/s]
0.0315	0.189	4	0.122	1.360	4.620	764.5	6.126	6.355	23.932	-0.595	23.336	4.620	13.847
0.0315	0.189	5	0.122	1.596	3.937	764.5	6.726	6.355	23.932	12.314	36.246	3.937	10.659
0.0315	0.189	6	0.163	1.747	3.597	764.5	7.001	6.355	23.932	21.814	45.746	3.597	8.906
0.063	0.2205	4	0.122	1.360	4.620	764.5	5.676	9.055	18.532	2.555	21.086	4.620	12.353
0.063	0.2205	5	0.122	1.596	3.937	764.5	6.276	9.055	18.532	15.464	33.996	3.937	9.763
0.063	0.2205	6	0.163	1.747	3.597	764.5	6.551	9.055	18.532	24.964	43.496	3.597	8.298
0.126	0.2835	4	0.122	1.360	4.620	764.5	5.159	13.555	9.532	7.572	17.104	4.620	9.589
0.126	0.2835	5	0.122	1.596	3.937	764.5	5.715	13.555	9.532	20.526	30.057	3.937	8.136
0.126	0.2835	6	0.163	1.747	3.597	764.5	5.998	13.555	9.532	30.018	39.549	3.597	7.128

# Bijlage D

## Proeventabel

*De proeven waarnaast een kruisje, x, staat, zijn proeven die omwille van te grote bewegingsamplitudes niet uitgevoerd konden worden.*

## 1. BOL REGELMATIGE GOLVEN

#	Diepg. cil stuk [m]	golfnr.	H [m]	T [s]	Mse [kg]	d [kg]	m <sub>sup</sub> [kg]	ω/ω <sub>n</sub> [-]	P <sub>abs</sub> [W]	b <sub>ext</sub> [kg/s]	z <sub>A</sub> [m]
1	0.0315	5	0.122	1.596	0	nc	13.232	77%	0.446	8.750	0.081
2	0.0315	5	0.122	1.596	0	0.5	13.232	77%	0.774	15.518	0.080
3	0.0315	5	0.122	1.596	0	1	13.232	77%	0.941	20.606	0.077
4	0.0315	5	0.122	1.596	0	1.5	13.232	77%	1.194	25.826	0.077
5	0.0315	5	0.122	1.596	10	0.5	23.232	89%	2.316	6.148	0.221
6	0.0315	5	0.122	1.596	10	1	23.232	89%	2.223	10.596	0.165
7	0.0315	5	0.122	1.596	10	1.5	23.232	89%	2.480	14.164	0.150
8	0.0315	5	0.122	1.596	10	2	23.232	89% x			
9	0.0315	5	0.122	1.596	18	1	31.232	98% x			
10	0.0315	5	0.122	1.596	18	1.5	31.232	98% x			
11	0.0315	4	0.122	1.360	18	0.5	13.232	90% x			
12	0.0315	4	0.122	1.360	18	1	13.232	90% x			
13	0.0315	4	0.122	1.360	18	1.5	13.232	90% x			
14	0.063	5	0.122	1.596	0	nc	8.132	73%	0.391	9.914	0.071
15	0.063	5	0.122	1.596	0	0.5	8.132	73%	0.651	16.618	0.071
16	0.063	5	0.122	1.596	0	1	8.132	73%	0.791	22.717	0.067
17	0.063	5	0.122	1.596	0	1.5	8.132	73%	0.979	26.849	0.069
18	0.063	5	0.122	1.596	0	2	8.132	73%	1.073	33.871	0.064
19	0.063	5	0.122	1.596	0	2'	8.132	73%	1.304	57.057	0.054
20	0.063	5	0.122	1.596	0	2.5'	8.132	73%	1.302	74.891	0.047
21	0.063	5	0.122	1.596	6	0.5	14.132	81%	0.868	12.612	0.094
22	0.063	5	0.122	1.596	6	1	14.132	81%	1.050	17.049	0.089
23	0.063	5	0.122	1.596	6	1.5	14.132	81%	1.212	21.731	0.085
24	0.063	5	0.122	1.596	6	2	14.132	81%	1.407	25.916	0.084
25	0.063	5	0.122	1.596	6	2'	14.132	81%	1.587	50.085	0.064
26	0.063	5	0.122	1.596	6	2.5'	14.132	81%	1.683	64.100	0.058
27	0.063	5	0.122	1.596	12	0.5	20.132	88%	1.295	8.752	0.138
28	0.063	5	0.122	1.596	12	1	20.132	88%	1.58	11.677	0.132
29	0.063	5	0.122	1.596	12	1.5	20.132	88%	1.869	14.515	0.129
30	0.063	5	0.122	1.596	12	2	20.132	88%	2.265	18.550	0.126
31	0.063	5	0.122	1.596	12	2'	20.132	88%	2.194	38.035	0.086
32	0.063	5	0.122	1.596	12	2.5'	20.132	88%	2.275	49.987	0.077
33	0.063	5	0.122	1.596	15	2'	23.132	92%	2.848	29.900	0.111
34	0.063	5	0.122	1.596	15	2.5'	23.132	92%	2.959	39.189	0.099
35	0.063	5	0.122	1.596	18	0.5	26.132	95% x			
36	0.063	5	0.122	1.596	18	1	26.132	95% x			
37	0.063	5	0.122	1.596	18	1.5	26.132	95% x			
38	0.063	5	0.122	1.596	18	2	26.132	95% x			
39	0.063	6	0.163	1.747	0	0.5	8.132	67%	0.807	14.865	0.092
40	0.063	6	0.163	1.747	0	1	8.132	67%	1.035	19.075	0.092
41	0.063	6	0.163	1.747	0	1.5	8.132	67%	1.227	23.645	0.090
42	0.063	6	0.163	1.747	0	2	8.132	67%	1.461	27.831	0.090
43	0.063	6	0.163	1.747	0	2'	8.132	67%	1.929	42.319	0.084
44	0.063	6	0.163	1.747	0	2.5'	8.132	67%	2.263	50.069	0.084
45	0.063	6	0.163	1.747	5	0.5	13.132	73%	0.986	12.548	0.110
46	0.063	6	0.163	1.747	5	1	13.132	73%	1.255	15.805	0.111
47	0.063	6	0.163	1.747	5	1.5	13.132	73%	1.507	19.624	0.109
48	0.063	6	0.163	1.747	5	2	13.132	73%	1.754	23.721	0.107
49	0.063	6	0.163	1.747	5	2'	13.132	73%	2.293	38.787	0.098
50	0.063	6	0.163	1.747	5	2.5'	13.132	73%	2.647	44.053	0.096
51	0.063	6	0.163	1.747	10	0.5	18.132	79%	1.259	9.824	0.141
52	0.063	6	0.163	1.747	10	1	18.132	79%	1.592	12.839	0.139
53	0.063	6	0.163	1.747	10	1.5	18.132	79%	1.922	15.714	0.138
54	0.063	6	0.163	1.747	10	2	18.132	79%	2.281	18.514	0.138
55	0.063	6	0.163	1.747	10	2'	18.132	79%	2.912	29.478	0.124
56	0.063	6	0.163	1.747	10	2.5'	18.132	79%	3.251	36.474	0.117
57	0.063	4	0.122	1.360	0	nc	8.132	85%	0.599	6.585	0.092
58	0.063	4	0.122	1.360	0	0.25	8.132	85%	0.873	10.360	0.089
59	0.063	4	0.122	1.360	0	0.5	8.132	85%	0.997	12.220	0.087
60	0.063	4	0.122	1.360	0	1	8.132	85%	1.215	15.801	0.085
61	0.063	4	0.122	1.360	0	1.5	8.132	85%	1.403	20.337	0.080
62	0.126	5	0.122	1.596	0	nc	6.532	78%	0.396	10.200	0.071
63	0.126	5	0.122	1.596	0	0.5	6.532	78%	0.64	17.201	0.069
64	0.126	5	0.122	1.596	0	1	6.532	78%	0.791	23.661	0.066
65	0.126	5	0.122	1.596	0	1.5	6.532	78%	0.946	28.992	0.065
66	0.126	5	0.122	1.596	10	0.5	16.532	90%	1.350	8.856	0.140
67	0.126	5	0.122	1.596	10	1	16.532	90%	1.640	12.210	0.132
68	0.126	5	0.122	1.596	10	1.5	16.532	90%	1.914	15.404	0.127

## 2. BOL ONREGELMATIGE GOLVEN

#	Diepg. cil stuk [m]	golfnr.	Hs [m]	Tp [s]	Mse [kg]	d [kg]	m <sub>sup</sub> [kg]	$\omega/\omega_n$ [-]	P <sub>abs</sub> [W]
1	0.063	16	0.079	1.55	0	nc	8.132	76%	0.176
2	0.063	16	0.079	1.55	0	0.5	8.132	76%	0.213
3	0.063	16	0.079	1.55	0	0.75	8.132	76%	0.205
4	0.063	16	0.079	1.55	0	1	8.132	76%	0.277
5	0.063	16	0.079	1.55	0	1.25	8.132	76%	0.258
6	0.063	16	0.079	1.55	0	1.5	8.132	76%	0.233
7	0.063	16	0.079	1.55	4	0.5	12.132	81%	0.278
8	0.063	16	0.079	1.55	4	0.75	12.132	81%	0.304
9	0.063	16	0.079	1.55	4	1	12.132	81%	0.299
10	0.063	16	0.079	1.55	4	1.25	12.132	81%	0.310
11	0.063	16	0.079	1.55	8	0.5	16.132	86%	0.361
12	0.063	16	0.079	1.55	8	0.75	16.132	86%	0.382
13	0.063	16	0.079	1.55	8	1	16.132	86%	0.381
14	0.063	16	0.079	1.55	8	1.25	16.132	86%	0.384
15	0.063	16	0.079	1.55	12	0.5	20.132	91%	0.424
16	0.063	16	0.079	1.55	12	0.75	20.132	91%	0.438
17	0.063	16	0.079	1.55	12	1	20.132	91%	0.436
18	0.063	16	0.079	1.55	12	1.25	20.132	91%	0.434
19	0.063	16	0.079	1.55	16	1.25	24.132	96%	x
20	0.063	16	0.079	1.55	16	1.5	24.132	96%	
21	0.063	16	0.079	1.55	16	1.75	24.132	96%	
22	0.063	16	0.079	1.55	16	2	24.132	96%	
23	0.0315	16	0.079	1.55	8	0.5	21.232	90%	0.44
24	0.0315	16	0.079	1.55	8	0.75	21.232	90%	0.459
25	0.0315	16	0.079	1.55	8	1	21.232	90%	0.456
26	0.0315	16	0.079	1.55	8	1.25	21.232	90%	0.462
27	0.0315	17	0.11	1.713	0	0.5	13.232	72%	0.477
28	0.0315	17	0.11	1.713	0	1	13.232	72%	0.595
29	0.0315	17	0.11	1.713	0	1.5	13.232	72%	0.658
30	0.0315	17	0.11	1.713	0	2	13.232	72%	0.697
31	0.0315	17	0.11	1.713	8	0.5	21.232	81%	0.765
32	0.0315	17	0.11	1.713	8	1	21.232	81%	0.89
33	0.0315	17	0.11	1.713	8	1.5	21.232	81%	0.981
34	0.0315	17	0.11	1.713	8	2	21.232	81%	1.035

### 3. KEGEL REGELMATIGE GOLVEN

#	Diepg. cil stuk [m]	golfrn.	H [m]	T [s]	Mse [kg]	d [kg]	m <sub>sup</sub> [kg]	ω/ω <sub>n</sub> [-]		P <sub>abs</sub> [W]	b <sub>ext</sub> [kg/s]	Z <sub>A</sub> [m]
1	0.0315	5	0.122	1.596	0	0.5	23.9316	87%	x			
2	0.0315	5	0.122	1.596	0	nc	23.9316	87%		0.917	4.312	0.1657
3	0.0315	5	0.122	1.596	0	1.5	23.9316	87%		2.917	11.674	0.1796
4	0.0315	5	0.122	1.596	0	2	23.9316	87%		3.460	13.917	0.1791
5	0.0315	5	0.122	1.596	0	2.5	23.9316	87%		3.334	19.007	0.1504
6	0.0315	5	0.122	1.596	10	1	33.9316	98%		1.695	13.073	0.1294
7	0.0315	5	0.122	1.596	10	1.5	33.9316	98%		2.069	16.130	0.1287
8	0.0315	5	0.122	1.596	10	2	33.9316	98%		2.422	19.364	0.1270
9	0.0315	5	0.122	1.596	10	2.5	33.9316	98%		2.701	22.621	0.1241
10	0.0315	5	0.122	1.596	18			106%	x			
11	0.0315	5	0.122	1.596	18			106%	x			
12	0.0315	5	0.122	1.596	18			106%	x			
13	0.0315	5	0.122	1.596	18			106%	x			
14	0.0315	4	0.122	1.360	0	0.5	23.9316	101%				
15	0.0315	4	0.122	1.360	0	0.75	23.9316	101%				
16	0.0315	4	0.122	1.360	0	1	23.9316	101%				
17	0.0315	4	0.122	1.360	0	1.5	23.9316	101%				
18	0.063	5	0.122	1.596	0	nc	18.5316	83%		0.584	6.696	0.1061
19	0.063	5	0.122	1.596	0	0.5	18.5316	83%		1.005	12.914	0.1002
20	0.063	5	0.122	1.596	0	1	18.5316	83%		1.312	16.528	0.1012
21	0.063	5	0.122	1.596	0	1.5	18.5316	83%		1.492	21.669	0.0942
22	0.063	5	0.122	1.596	0	2	18.5316	83%		1.712	26.246	0.0918
23	0.063	5	0.122	1.596	0	2'	18.5316	83%		1.811	46.101	0.0712
24	0.063	5	0.122	1.596	0	2.5'	18.5316	83%		1.900	59.413	0.0642
25	0.063	5	0.122	1.596	0	3'	18.5316	83%		2.123	86.207	0.0564
26	0.063	5	0.122	1.596	0	3' bis	18.5316	83%		2.042	93.890	0.0530
27	0.063	5	0.122	1.596	6	0.5	24.5316	90%		1.693	7.893	0.1664
28	0.063	5	0.122	1.596	6	1	24.5316	90%		1.993	11.128	0.1520
29	0.063	5	0.122	1.596	6	1.5	24.5316	90%		2.179	14.941	0.1372
30	0.063	5	0.122	1.596	6	2	24.5316	90%		2.845	16.074	0.1511
31	0.063	5	0.122	1.596	6	2'	24.5316	90%		2.456	35.291	0.0948
32	0.063	5	0.122	1.596	6	2'	24.5316	90%		2.480	34.963	0.0957
33	0.063	5	0.122	1.596	6	2.5'	24.5316	90%		2.886	51.691	0.0849
34	0.063	5	0.122	1.596	6	2.5'bis	24.5316	90%		2.731	57.132	0.0785
35	0.063	5	0.122	1.596	6	3'	24.5316	90%		2.693	70.589	0.0702
36	0.063	5	0.122	1.596	6	3' bis	24.5316	90%		2.717	74.161	0.0688
37	0.063	5	0.122	1.596	12	0.5	30.5316	96%		1.893	7.052	0.1861
38	0.063	5	0.122	1.596	12	1	30.5316	96%		2.356	9.484	0.1790
39	0.063	5	0.122	1.596	12	1.5	30.5316	96%		2.904	11.345	0.1817
40	0.063	5	0.122	1.596	12	2	30.5316	96%		3.440	13.386	0.1821
41	0.063	5	0.122	1.596	12	2'	30.5316	96%		3.289	26.596	0.1263
42	0.063	5	0.122	1.596	12	2.5'	30.5316	96%		3.366	35.736	0.1103
43	0.063	5	0.122	1.596	12	3'	30.5316	96%		3.157	65.207	0.0790
44	0.063	5	0.122	1.596	15	0.5	33.5316	100%		1.697	7.706	0.1686
45	0.063	5	0.122	1.596	15	1	33.5316	100%		2.167	10.155	0.1659
46	0.063	5	0.122	1.596	15	1.5	33.5316	100%		2.619	12.670	0.1633
47	0.063	5	0.122	1.596	15	2	33.5316	100%		3.060	15.219	0.1611
48	0.063	5	0.122	1.596	15	2'	33.5316	100%		3.567	24.049	0.1383
49	0.063	5	0.122	1.596	15	2.5'	33.5316	100%		3.759	31.249	0.1246
50	0.063	5	0.122	1.596	15	3'	33.5316	100%		3.328	62.279	0.0830

#	Diepg. cil stuk		golfnr.	H [m]	T [s]	Mse [kg]	d [kg]	m <sub>sup</sub> [kg]	ω/ω <sub>n</sub> [-]	P <sub>abs</sub> [W]	b <sub>ext</sub> [kg/s]	z <sub>A</sub> [m]
	[m]	[m]										
51	0.063	6	0.163	1.747	0	0.5	18.5316	76%	1.200	11.274	0.1283	
52	0.063	6	0.163	1.747	0	1	18.5316	76%	1.556	14.828	0.1274	
53	0.063	6	0.163	1.747	0	1.5	18.5316	76%	1.931	18.114	0.1284	
54	0.063	6	0.163	1.747	0	2	18.5316	76%	2.281	21.600	0.1278	
55	0.063	6	0.163	1.747	0	2'	18.5316	76%	2.685	31.535	0.1147	
56	0.063	6	0.163	1.747	0	2.5'	18.5316	76%	3.108	37.913	0.1126	
57	0.063	6	0.163	1.747	5	0.5	23.5316	81%	1.723	7.970	0.1828	
58	0.063	6	0.163	1.747	5	1	23.5316	81%	2.213	10.594	0.1797	
59	0.063	6	0.163	1.747	5	1.5	23.5316	81%	2.634	13.628	0.1729	
60	0.063	6	0.163	1.747	5	2	23.5316	81%	3.165	16.129	0.1742	
61	0.063	6	0.163	1.747	5	2'	23.5316	81%	4.117	25.534	0.1579	
62	0.063	6	0.163	1.747	5	2.5'	23.5316	81%	4.281	33.917	0.1397	
63	0.063	6	0.163	1.747	10	0.5		86% x				
64	0.063	6	0.163	1.747	10	1		86% x				
65	0.063	6	0.163	1.747	10	1.5		86% x				
66	0.063	6	0.163	1.747	10	2		86% x				
67	0.063	6	0.163	1.747	10	2	28.5316	86%	4.548	11.075	0.2520	
68	0.063	6	0.163	1.747	10	2'	28.5316	86%	6.221	16.929	0.2382	
69	0.063	6	0.163	1.747	10	2.5'	28.5316	86%	6.419	22.160	0.2116	
70	0.063	4	0.122	1.360	0	nc	18.5316	96%	1.187	3.311	0.1833	
71	0.063	4	0.122	1.360	0	0.5	18.5316	96%	2.182	6.349	0.1795	
72	0.063	4	0.122	1.360	0	1	18.5316	96%	2.816	8.550	0.1757	
73	0.063	4	0.122	1.360	0	1.5	18.5316	96%	3.304	11.005	0.1677	
74	0.063	4	0.122	1.360	0	2	18.5316	96%	3.567	14.048	0.1542	
75	0.126	5	0.122	1.596	0	nc	9.5316	76%	0.429	9.091	0.0780	
76	0.126	5	0.122	1.596	0	0.5	9.5316	76%	0.748	17.515	0.0742	
77	0.126	5	0.122	1.596	0	0.75	9.5316	76%	0.867	20.845	0.0733	
78	0.126	5	0.122	1.596	0	1	9.5316	76%	0.966	23.379	0.0730	
79	0.126	5	0.122	1.596	0	1.25	9.5316	76%	1.036	26.617	0.0709	
80	0.126	5	0.122	1.596	10	0.5	19.5316	89%	1.437	9.991	0.1362	
81	0.126	5	0.122	1.596	10	0.75	19.5316	89%	1.583	11.797	0.1316	
82	0.126	5	0.122	1.596	10	1	19.5316	89%	1.722	13.452	0.1285	
83	0.126	5	0.122	1.596	10	1.25	19.5316	89%	1.857	15.388	0.1248	



#### 4. KEGEL ONREGELMATIGE GOLVEN

#	Diepg. cil stuk [m]	golfnr.	Hs [m]	Tp [s]	Mse [kg]	d [kg]	m <sub>sup</sub> [kg]	ω/ω <sub>n</sub> [-]	P <sub>abs</sub> [W]
1	0.063	16	0.079	1.55	0	nc	18.532	85%	0.278
2	0.063	16	0.079	1.55	0	0.5	18.532	85%	0.385
3	0.063	16	0.079	1.55	0	0.75	18.532	85%	0.387
4	0.063	16	0.079	1.55	0	1	18.532	85%	0.398
5	0.063	16	0.079	1.55	0	1.25	18.532	85%	0.417
6	0.063	16	0.079	1.55	0	1.5	18.532	85%	0.385
7	0.063	16	0.079	1.55	4	0.5	22.532	90%	0.416
8	0.063	16	0.079	1.55	4	0.75	22.532	90%	0.432
9	0.063	16	0.079	1.55	4	1	22.532	90%	0.512
10	0.063	16	0.079	1.55	4	1.25	22.532	90%	0.512
11	0.063	16	0.079	1.55	8	0.5	26.532	95%	0.493
12	0.063	16	0.079	1.55	8	0.75	26.532	95%	0.517
13	0.063	16	0.079	1.55	8	1	26.532	95%	0.591
14	0.063	16	0.079	1.55	8	1.25	26.532	95%	0.536
15	0.063	16	0.079	1.55	12	0.5	30.532	99%	0.476
16	0.063	16	0.079	1.55	12	0.75	30.532	99%	0.501
17	0.063	16	0.079	1.55	12	1	30.532	99%	0.487
18	0.063	16	0.079	1.55	12	1.25	30.532	99%	0.534
19	0.063	16	0.079	1.55	16	0.5		x	
20	0.063	16	0.079	1.55	16	0.75		x	
21	0.063	16	0.079	1.55	16	1		x	
22	0.063	16	0.079	1.55	16	1.25		x	
23	0.0315	16	0.079	1.55	8	0.5	31.932	98%	0.574
24	0.0315	16	0.079	1.55	8	0.75	31.932	98%	0.597
25	0.0315	16	0.079	1.55	8	1	31.932	98%	0.605
26	0.0315	16	0.079	1.55	8	1.25	31.932	98%	0.609
27	0.0315	17	0.11	1.713	0	nc		81%	x
28	0.0315	17	0.11	1.713	0	0.5	23.932	81%	0.825
29	0.0315	17	0.11	1.713	0	1	23.932	81%	1.024
30	0.0315	17	0.11	1.713	0	1.5	23.932	81%	1.132
31	0.0315	17	0.11	1.713	0	2	23.932	81%	1.219
32	0.0315	17	0.11	1.713	8	0.5	31.932	89%	x
33	0.0315	17	0.11	1.713	8	1	31.932	89%	1.238
34	0.0315	17	0.11	1.713	8	1.5	31.932	89%	1.34
35	0.0315	17	0.11	1.713	8	1'	31.932	89%	1.818
36	0.0315	17	0.11	1.713	8	1'bis	31.932	89%	1.883
37	0.0315	17	0.11	1.713	8	2.5	31.932	89%	1.46
38	0.126	16	0.079	1.55	8	0.5			x
39	0.126	16	0.079	1.55	8	0.75			x
40	0.126	16	0.079	1.55	8	1			x
41	0.126	16	0.079	1.55	8	1.25			x

# Bibliografie

- [1] Limpet wave energy convertor. "[http://www.wavegen.co.uk/what\\_we\\_offer\\_limpet\\_islay.htm](http://www.wavegen.co.uk/what_we_offer_limpet_islay.htm)".
- [2] Pelamis wave energy convertor. "<http://www.pelamiswave.com>".
- [3] Wave dragon wave energy convertor. "<http://www.wavedragon.net/index.php>".
- [4] K. Budal and J. Falnes. Interacting point absorbers with controlled motion. In *Power from sea waves*, pages 381–399, London, 1980. Academic Press.
- [5] K. Budal, J. Falnes, T. Hals, L.C. Iversen, and T. Onshus. Model experiment with a phase controlled point absorber. In *Proceedings of Second International Symposium on Wave and Tidal Energy*, pages 191–206, Cambridge, UK, September 1981.
- [6] G. De Backer. Fitting van gedempte trilling aan experimentele data.
- [7] G. De Backer, M. Vantorre, R. Banasiak, C. Beels, and J. De Rouck. Numerical modelling of wave energy absorption by a floating point absorber system. In *Proceedings of the seventeenth International Offshore and Polar engineering conference*, pages 374–379, Lisbon, Portugal, July 2007. ISOPE.
- [8] Z. Demirbilek and V. Linwood. *Coastal Engineering Manual*, chapter 1 Water wave mechanics, pages II–1–13. -, 2002.
- [9] D.V. Evans. A theory for wave power absorption by oscillating bodies. In *11th symposium on naval hydrodynamics*, volume 5, pages 15–27, London, 1976.
- [10] J. Falnes. Principles for capture of energy from ocean waves: phase control and optimum oscillation. "<http://folk.ntnu.no/falnes/index-e.html>".

- [11] J. Falnes. Optimum control of oscillation of wave-energy converters. Published in Annex Report B1 to the main report "Wave Energy Converters: Generic Technical Evaluation Study", August 1993.
- [12] J. Falnes. *Ocean waves and oscillating systems, linear interactions including wave-energy extraction*. Cambridge University Press, 2002. ISBN 0-521-78211-2.
- [13] J. Falnes. Ocean wave energy: introductory lectures, October 2003.
- [14] J. Falnes. A review of wave-energy extraction. *Marine structures*, 20:185–201, 2007.
- [15] V. Ferdinande. On power absorption by floating devices in waves. In *Int. shipbuild progr.*, volume 32 of 373, pages 204–209, 1985.
- [16] Y. Goda. *Random seas and design of maritime structures*. World scientific, -.
- [17] A. Leirbukt and P. Tubaas. A wave of renewable energy, there's no such thing as bad weather. "<http://www02.abb.com/global/gad/gad02077.nsf/lupLongContent/D74F5739AAE738F6C12571D800305007>", March 2006.
- [18] M. Loccufer. *Dynamica van constructies*. Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen, 2006-2007.
- [19] G.A. Nolan, J.V. Ringwood, W.E. Leithead, and S. Butler. Optimal damping profiles for a heaving buoy wave energy converter. In *15th Offshore and Polar Engineering Conference*, 2005.
- [20] Centre of Renewable Energy Resources. Wave energy utilization in Europe: current status and perspectives. "<http://www.wave-energy-centre.org/pages/WaveEnergyBrochure.pdf>", 2002. ISBN 960-86907-1-4.
- [21] NN. Panicker. Power resource potential of ocean surface waves. In *Proceedings of the wave an salinity gradient workshop*, pages J1–J48, 1976.
- [22] P. Ricci, M. Alves, A. Falcão, and A. Sarmento. Optimisation of the geometry of wave energy converters. International Ocean Energy Conference, 2006.
- [23] SEEWEC. "<http://www.seewec.org/index.html>".
- [24] M. Vantorre. *Golfkrachten op drijvende en vaste constructies*. Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen, 1997-1998.

- [25] M. Vantorre, R. Banasiak, and R. Verhoeven. Extraction of sea wave energy: a mathematical evaluation of a point absorber in heave. *Advances in fluid mechanics IV*, pages 193–204, May 2002.
- [26] M. Vantorre, R. Banasiak, and R. Verhoeven. Modelling of hydraulic performance and wave energy extraction by a point absorber in heave. *Applied Ocean Research*, 26:61–72, 2004.
- [27] M. Vantorre, R. Verhoeven, J. Melkebeek, and R. Banasiak. Experimental testing of an absorber in heave, February 2002.
- [28] Y. Willems. Onderzoek naar snelheidsafhankelijke demping bij point absorbers aan de hand van numerieke en fysische modellering. Afstudeerwerk, Universiteit Gent, 2008.

# Lijst van figuren

2.1	Definitieschets variabelen in de Airy golftheorie, [8]	4
2.2	Verheffingen onregelmatige golf	6
2.3	Jonswap spectra	9
3.1	Schema omzetting energie	10
3.2	Schema overtopping	11
3.3	Limpet OWC, [1]	12
3.4	Pelamis golfenergieconverter, [2]	14
3.5	Prototype Wave Dragon © Earth-vision.biz., [3]	15
4.1	Buldra: 1/3 schaalmodel van de FO <sup>3</sup> , [17]	17
4.2	Massa-veer-demper systeem	23
4.3	Exponentieel uitstervende trilling	24
4.4	Bodediagram voor verschillende waarden van $\zeta$	25
4.5	Golfabsorptie, [10]	26
4.6	Maximaal geabsorbeerd vermogen, [14]	29
4.7	Effect van het mistunen op de efficiëntie, [26]	30
4.8	Fasecontrole door latching, [10]	31
4.9	Fasecontrole door latching bij onregelmatige golven, [10]	33
4.10	Verschillende dempingsprofielen, [19]	34
5.1	Oude proefopstelling	37
5.2	Geleidingsstaven Minitec	38
5.3	Nieuwe opstelling gepositioneerd op de golfgoot	39
5.4	Verschillende geteste vlotters	40
5.5	Schematisch overzicht opstelling	41
5.6	De encoder meet de verplaatsing	41

5.7	Kalibratie van de optische encoder . . . . .	42
5.8	Kalibratie van de koppelmeter . . . . .	43
5.9	Detail van de krachtsensor (blauw met omgekeerd cijfer 3 erop) . . . . .	44
5.10	Trillingen in de krachtsensor verstoren de theoretische blokgolf . . . . .	45
5.11	Het pvcstukje glijdt tegen de verticale plaat waardoor extra wrijving ontstaat	45
5.12	Resultaat fitting bij een decaytest [6] . . . . .	48
5.13	Vergelijking van numerieke en via decaytesten berekende waarde van de toegevoegde massa . . . . .	49
5.14	Schematisch overzicht wrijvingsproef, [27] . . . . .	51
5.15	Resultaten wrijvingstesten . . . . .	51
5.16	Schematische werking van de demper . . . . .	53
5.17	Detail van demper . . . . .	53
5.18	Opgemeten excitatiekracht (zonder inwendige wrijving) voor de kegelvormi- ge vlotter met diepgang d3,15 (schaalmodel) . . . . .	54
5.19	Numerieke en experimentele amplitude van de excitatiekracht per meter golfamplitude voor de bolvormige vlotter . . . . .	56
5.20	Numerieke en experimentele amplitude van de excitatiekracht per meter golfamplitude voor de kegelvormige vlotter . . . . .	56
5.21	Golfschot in de golfgoet van het WL . . . . .	57
5.22	Positie golfhoogtemeters in het golfkanaal . . . . .	58
5.23	Opgemeten signaal van de verheffingen ( $H_s$ input = 7,9 cm, $T_p$ = 1,55 s) .	60
6.1	Dempingskracht in functie van gewicht op demper . . . . .	65
6.2	De gereflecteerde golf stelt zich samen met de invallende golf waardoor er (plaatselijk) een daling in de golfhoogte ontstaat . . . . .	69
6.3	Fitting van de verplaatsing en snelheid. Regelmatige golf $H = 10,2$ cm, $T$ $= 1,596$ s. Diepgang kegel = 0,284 m . . . . .	70
6.4	De dempingskracht is een blokgolf en verloopt in fase met de verticale vlot- tersnelheid. Regelmatige golf $H = 10,2$ cm, $T = 1,596$ s. Diepgang kegel = 0,284 m . . . . .	71
6.5	Ogenblikkelijk en gemiddeld geabsorbeerd vermogen in regelmatige golf met $H = 10,2$ cm, $T = 1,596$ s. Diepgang kegel = 0,284 m. $m_{sup} = 19,532$ kg en $F_{demp} = 1,90$ N. . . . .	72
6.6	Golfverheffingen en vlotterverplaatsing in regelmatige golf: $H = 10,2$ cm, $T$ $= 1,596$ s. Diepgang kegel = 0,284 m. $m_{sup} = 19,532$ kg en $F_{demp} = 1,90$ N.	73

6.7	Geabsorbeerd vermogen in functie van de dempingskracht. $H = 14,4$ cm, $T = 1,747$ s. Diepgang bol = $0,221$ m. . . . .	74
6.8	Geabsorbeerd vermogen in functie van de supplementaire massa. $H = 10,2$ cm, $T = 1,596$ s. Diepgang bol = $0,221$ m. . . . .	75
6.9	Efficiëntie in functie van dempingskracht en supplementaire massa. $H = 10,2$ cm, $T = 1,596$ s. Diepgang bol = $0,221$ m. $m_{\text{sup}} = \{8,14,20,23\}$ kg .	76
6.10	Dimensieloze bewegingsamplitude. $H = 10,2$ cm, $T = 1,596$ s. Diepgang bol = $0,221$ m. $m_{\text{sup}} = \{8,14,20,23\}$ kg . . . . .	77
6.11	Invloed van de diepgang op de efficiëntie. $H = 10,2$ cm, $T = 1,596$ s. Diepgang bol = $\{0,189;0,221;0,284\}$ m . . . . .	77
6.12	Invloed van de diepgang op de (dimensieloze) bewegingsamplitude. $H = 10,2$ cm, $T = 1,596$ s. Diepgang bol = $\{0,189;0,221;0,284\}$ m . . . . .	79
6.13	Invloed van de golfperiode op de efficiëntie . . . . .	79
6.14	Geabsorbeerd vermogen in functie van de dempingskracht. $H = 14,4$ cm, $T = 1,747$ s. Diepgang kegel = $0,221$ m. . . . .	80
6.15	Geabsorbeerd vermogen in functie van de supplementaire massa. $H = 12,2$ cm, $T = 1,36$ s. Diepgang kegel = $0,221$ m. . . . .	82
6.16	Efficiëntie in functie van dempingskracht en supplementaire massa. $H = 10,2$ cm, $T = 1,596$ s. Diepgang kegel = $0,221$ m. $m_{\text{sup}} = \{18,5;24,5;30,5;33,5\}$ kg	82
6.17	Relatieve bewegingsamplitude. $H = 10,2$ cm, $T = 1,596$ s. Diepgang kegel = $0,221$ m. $m_{\text{sup}} = \{18,5;24,5;30,5;33,5\}$ kg . . . . .	83
6.18	Invloed van de diepgang op de efficiëntie. $H = 10,2$ cm, $T = 1,596$ s. Diepgang kegel = $\{0,189;0,221;0,284\}$ m . . . . .	83
6.19	Invloed van de golfperiode op de efficiëntie . . . . .	84
6.20	Vergelijking efficiëntie bij bol- en kegelvormige vlotter. $H = 10,2$ cm, $T = 1,596$ s. Diepgang vlotter = $0,221$ m . . . . .	85
6.21	Start van het tijdsframe ligt bij een eerste piek in de verheffingen op $615$ s	86
6.22	Opmeting van de dompverplaatsing, -snelheid en dempingskracht. Onregelmatige golf $H_s = 7,3$ cm, $T_p = 1,463$ s. Diepgang kegel = $0,221$ m. . . . .	88
6.23	Het geabsorbeerd vermogen in functie van de tijd. Onregelmatige golf $H_s = 7,3$ cm, $T_p = 1,463$ s. Diepgang kegel = $0,221$ m. . . . .	88
6.24	Verheffingen van het wateroppervlak ter plekke van de vlotter samen met de vlotterverplaatsing. Onregelmatige golf $H_s = 7,3$ cm, $T_p = 1,463$ s. Diepgang kegel = $0,221$ m. . . . .	89

6.25	Geabsorbeerd vermogen in functie van dempingskracht. Onregelmatige golf Hs = 1,16 m, Tp = 5,83 s (ware schaal). Diepgang bol = 3,5 m. . . . .	90
6.26	Efficiëntie in functie van dempingskracht voor 2 verschillende diepgangen. Onregelmatige golf Hs = 7,3 cm, Tp = 1,463 s. Diepgang bol = {0,189;0,221}m	91
6.27	Efficiëntie in functie van dempingskracht voor 2 waarden van m <sub>sup</sub> . Onre- gelmatige golf Hs = 10,7 cm, Tp = 1,707 s. Diepgang bol = 0,189 m . . .	92
6.28	Verheffingen en vlotterverplaatsingen voor twee waarden van de dempings- kracht. Ogenblikkelijk geabsorbeerd vermogen voor twee waarden van de dempingskracht. Onregelmatige golf Hs = 7,3 cm, Tp = 1,463 s. Diepgang bol = 0,221 m. . . . .	93
6.29	Geabsorbeerd vermogen in functie van dempingskracht. Onregelmatige golf Hs = 1,16 m, Tp = 5,83 s (ware schaal). Diepgang kegel = 3,5 m. . . . .	94
6.30	Efficiëntie in functie van dempingskracht voor 2 verschillende diepgangen. Onregelmatige golf Hs = 7,3 cm, Tp = 1,463 s. Diepgang kegel = {0,189;0,221}m	95
6.31	Efficiëntie in functie van dempingskracht voor 2 waarden van m <sub>sup</sub> . Onre- gelmatige golf Hs = 10,7 cm, Tp = 1,707 s. Diepgang kegel = 0,189 m . .	96
6.32	Verheffingen en vlotterverplaatsingen voor twee waarden van de dempings- kracht. Ogenblikkelijk geabsorbeerd vermogen voor twee waarden van de dempingskracht. Onregelmatige golf Hs = 7,3 cm, Tp = 1,463 s. Diepgang kegel = 0,221 m. . . . .	97
7.1	Efficiëntie in functie van de dempingskracht. Regelmatige golf H = 10,2 cm, T = 1,596 s. Diepgang bol = 0,221 m. m <sub>sup</sub> = {8,14,20,31,41} kg . . . . .	101
7.2	Bewegingsamplitude in functie van de dempingskracht. Regelmatige golf H = 10,2 cm, T = 1,596 s. Diepgang bol = 0,221 m. m <sub>sup</sub> = {8,14,20,31,41} kg	101
7.3	Geabsorbeerd vermogen op ware schaal. Regelmatige golf H = 1,62 m, T = 6,36 s. . . . .	102
7.4	Efficiëntie in functie van de dempingskracht. Regelmatige golf H = 10,2 cm, T = 1,596 s. Diepgang kegel = 0,221 m. m <sub>sup</sub> = {19,25,31} kg . . . . .	103
7.5	Geabsorbeerd vermogen op ware schaal. Regelmatige golf H = 1,62 m, T = 6,36 s. . . . .	104
7.6	Geabsorbeerd vermogen in functie van dempingskracht. Onregelmatige golf Hs = 7,3 cm, Tp = 1,463 s. Diepgang kegel = 0,221 m. . . . .	106
7.7	Geabsorbeerd vermogen in functie van supplementaire massa. Onregelma- tige golf Hs = 7,3 cm, Tp = 1,463 s. Diepgang kegel = 0,221 m. . . . .	106



- 7.8 Geabsorbeerd vermogen in functie van supplementaire massa. Onregelmatige golf  $H_s = 7,3$  cm,  $T_p = 1,463$  s. Diepgang bol = 0,221 m. . . . . 107
- 7.9 Geabsorbeerd vermogen in functie van de frequentieverhouding  $\omega_p/\omega_n$ . Onregelmatige golf  $H_s = 7,3$  cm,  $T_p = 1,463$  s. Diepgang vlotter = 0,221 m. . . . . 109
- 7.10 Dompbeweging vlotter en ogenblikkelijk geabsorbeerd vermogen. Onregelmatige golf  $H_s = 7,3$  cm,  $T_p = 1,463$  s. Diepgang kegel = 0,221 m.  $m_{sup} = 18,5$  kg. Geen externe dempingskracht. . . . . 110
- 7.11 Dompbeweging vlotter en ogenblikkelijk geabsorbeerd vermogen. Onregelmatige golf  $H_s = 7,3$  cm,  $T_p = 1,463$  s. Diepgang kegel = 0,221 m.  $m_{sup} = 18,5$  kg.  $F_{demp} = 3$  N. . . . . 111

# Lijst van tabellen

5.1	Froude schaalfactoren . . . . .	36
5.2	Vergelijking types staaf . . . . .	38
5.3	Bepaling waarden m . . . . .	46
5.4	Resultaten decay proeven . . . . .	48
5.5	Vergelijking van de numeriek en experimenteel bepaalde waarden voor de hydrodynamische dempingscoëfficiënt bij de bolvormige vlotter . . . . .	50
5.6	Reflectieanalyse op enkele golven . . . . .	59
5.7	Hs stijgt naarmate tijd toeneemt . . . . .	59
6.1	Bepaling supplementaire massa van het systeem $M_{ss}$ . . . . .	64
6.2	Bepaling supplementaire massa op ware schaal . . . . .	64
6.3	Geselecteerde golftreinen . . . . .	67
6.4	Berekening van het golfvermogen uit de opmeting van de verheffingen van twee onregelmatige golven . . . . .	90
7.1	Vergelijking van het invallend golfvermogen berekend over de diameter van een vlotter . . . . .	105

