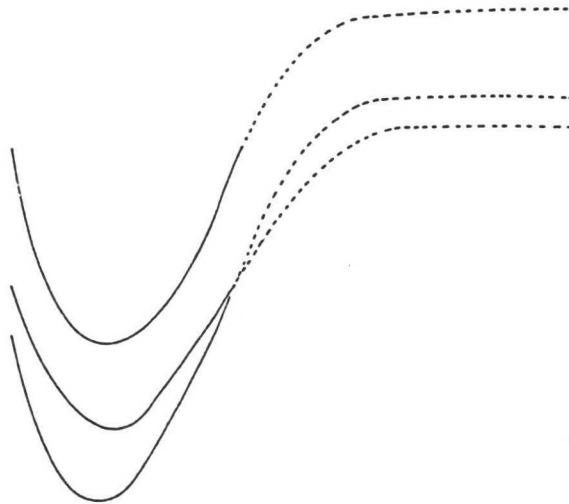


Experimenteel onderzoek naar golfkrachten in de brandingszone, veroorzaakt door onregelmatige, brekende golven

Deel 1
Afstudeerverslag:

Juli 1988

B.A.N. Koehorst en P.A. van der Klis



Experimenteel onderzoek naar golfkrachten in de brandingszone,
veroorzaakt door onregelmatige, brekende golven.

deel 1 Afstudeerrapport

afstudeerverslag van B.A.N. Koehorst en
P.A. van der Klis

afstudeerhoogleraar: Prof.dr ir J.A. Battjes
afstudeerbegeleider: ir M.W.J.W. Dijkman

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord

Samenvatting

Hoofdstuk 1	Inleiding.....	1
Hoofdstuk 2	Doelen.....	2
Hoofdstuk 3	Samenvatting van eerder onderzoek.....	3
	3.1 Inleiding.....	3
	3.2 Van Kouwenhoven (1986).....	4
	3.3 Apelt en Piorewicz (1986).....	5
	3.4 Wang (1987).....	7
Hoofdstuk 4	Meetcilinder.....	9
	4.1 Beschrijving van de meetcilinder.....	9
	4.2 IJking.....	11
	4.2.1 Inleiding.....	11
	4.2.2 Meetprogramma.....	12
	4.2.3 Meetopstelling.....	12
	4.2.4 Bespreking van de resultaten.....	13
	4.3 Dynamisch gedrag van de meetring.....	14
	4.3.1 Inleiding.....	14
	4.3.2 Schematisatie van de meetring.....	14
	4.3.3 Meetprogramma.....	17
	4.3.4 Meetopstelling.....	18
	4.3.5 Uitwerking metingen.....	18
	4.3.6 Bespreking van de resultaten.....	19
	4.4 Controlemeting in de golfgoot.....	20
	4.4.1 Inleiding.....	20
	4.4.2 Meetopstelling.....	21
	4.4.3 Meetprogramma.....	22

	4.4.4	Uitwerking metingen.....	22
	4.4.5	Bespreking van de resultaten.....	24
	4.5	Conclusies ijking en controlemeting.....	26
Hoofdstuk 5		Meetopstelling.....	27
	5.1	Golfgoot en golfschotbesturing.....	27
	5.2	Talud.....	28
	5.3	Opstelling van de meetcilinder.....	29
	5.4	Opstelling van de golfhoogtemeter.....	29
Hoofdstuk 6		Verwerking van het meetsignaal.....	31
	6.1	Filterfrequentie.....	31
	6.2	Bemonsteringsfrequentie.....	34
	6.3	Meetduur van een experiment.....	34
	6.4	Statistische bewerkingen.....	35
	6.4.1	Definitie golfkrachtmaximum.....	35
	6.4.2	Cumulatieve kansverdelingsfunctie.....	36
Hoofdstuk 7		Meetprogramma.....	40
Hoofdstuk 8		Bespreking van de resultaten.....	41
	8.1	Cumulatieve kansverdelingsfunctie.....	41
	8.2	Het verloop van de dimensieloze golfkracht.....	42
	8.3	De golfkracht in ondiep water versus de golfkracht in diep water.....	44
Hoofdstuk 9		Vergelijking met Wang en Van Kouwenhoven.....	45
Hoofdstuk 10		Conclusies.....	47
Appendix 1		Parameterlijst.....	48
Appendix 2		Literatuurlijst.....	50

VOORWOORD

Hierbij willen wij graag de volgende mensen bedanken:

- Prof. dr ir J.A. Battjes voor het kritisch doorlezen van het rapport en de algehele begeleiding van het project.
- ir M.W.J.W. Dijkman voor de uitstekende dagelijkse begeleiding.
- De medewerkers van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de TU Delft die ons hebben geholpen bij het uitvoeren van de experimenten in de golfgoot, in het bijzonder ing. J. van Bergen en ir H. Klaasman.
- Levien Calle, systeembeheerder van de COSE.

B.A.N. Koehorst

P.A. van der Klis

juli 1988

SAMENVATTING

In dit rapport wordt een experimenteel onderzoek naar golfkrachten op een verticaal geplaatste meetcilinder beschreven. De golfkrachten werden veroorzaakt door onregelmatige, brekende golven.

De meetcilinder is speciaal voor dit doel ontworpen en werd geleend van het Norwegian Marine Technology Research Institute A/S uit Trondheim. De meetcilinder bestaat uit een meetring die verbonden is met een buigstaafje, waaraan rekstrookjes zijn bevestigd, en die vrij kan bewegen t.o.v. de cilinder in het horizontale vlak. Het probleem van de meetcilinder is dat door de spleten tussen de meetring en de cilinder water achter de meetring kan stromen en zo het meten van de golfkrachten nadelig kan beïnvloeden. Hiervoor zal een oplossing worden aangedragen.

Het onderzoek bestaat uit twee delen:

- Het waterdicht afsluiten van de meetring en het ijken en testen van de meetcilinder.
- Het meten van de hydrodynamische krachten en de statistische verwerking daarvan.

Bij dit laatste onderdeel behoort het vinden van een cumulatieve kansverdelingsfunctie van de golfkrachtmaxima. De maxima worden eerst met speciaal voor dit doel geschreven computerprogramma's uit het gemeten golfkrachtsignaal gedestilleerd met behulp van het golfhoogtesignaal. Vervolgens worden de waarschijnlijkheidspercentages berekend en kan het type kansverdelingsfunctie worden vastgesteld.

Ook zal het verloop van de dimensieloze gemiddelde golfkracht langs het talud worden bekeken evenals de verhouding tussen de maximale in een experiment geregistreerde golfkracht in ondiep water en de maximale, geregistreerde golfkracht in diep water.

HOOFDSTUK 1 INLEIDING

In de afgelopen jaren werden offshore constructies vooral buiten de brandingszone geplaatst. Bij het ontwerpen maakte men gebruik van de resultaten van studies die betrekking hebben op golfkrachten veroorzaakt door (on)regelmatige, niet-brekende golven. Op dit gebied is in de afgelopen tijd zeer veel kennis vergaard.

Behalve in diep water worden er ook constructies in de brandingszone gebouwd. Bij het dimensioneren van deze constructies moeten nu golfkrachten, veroorzaakt door onregelmatige, brekende golven, in de berekening worden betrokken. Echter van dit type golfkrachten was nog zeer weinig bekend. Twee jaar geleden zette de Technische Universiteit Delft dan ook een onderzoekprogramma op om dit gat op te vullen.

In 1986 is Van Kouwenhoven begonnen met metingen naar golfkrachten in de brandingszone veroorzaakt door onregelmatige, brekende golven. De experimenten werden uitgevoerd met een JONSWAP-spectrum. Echter tijdens de metingen bleek dat het gebruikte meetelement niet geschikt was voor dit doel.

In 1987 startte Wang dan ook een onderzoek met een nieuwe meetcilinder, die speciaal voor het meten van golfkrachten in de brandingszone was ontwikkeld. In dit onderzoek werd de meetcilinder getest en werden golfkrachten, veroorzaakt door regelmatige, brekende golven, gemeten in de brandingszone.

De studie die in dit rapport wordt beschreven, is een vervolgstudie op deze twee onderzoeken. Er zal worden gemeten in de brandingszone bij onregelmatige (JONSWAP-spectrum), brekende golven. De meetpunten liggen vooral rond stilwaterniveau, om de metingen, verricht door Van Kouwenhoven, aan te vullen.

HOOFDSTUK 2 DOELEN

De doelen zijn drievoudig:

- Het bepalen van eigenschappen van de meetcilinder; de beoogde subdoelen hierbij zijn:
 - het statisch ijken van de meetcilinder,
 - het onderzoeken van het dynamisch gedrag van de meetcilinder,
 - de invloed van water achter de meetring te onderzoeken, en bij een aanzienlijke invloed
 - een oplossing vinden voor het waterdicht afsluiten van de meetring met behoud van de goede eigenschappen van de meetcilinder.
- Het meten van de hydrodynamische krachten op een verticaal geplaatste cilinder bij een onregelmatig golfveld, op verschillende plaatsen op de helling. De krachten moeten zowel in het brandingsgebied als in diep water, aan de bodem en rond stilwaterniveau worden gemeten.
- Het statistisch verwerken van de meetgegevens, om inzicht te krijgen in de vorm van de cumulatieve kansverdelingsfunctie van de optredende krachtpieken in brekende golven en in de verhouding van de krachten tot die in diep water, waar de golven niet breken.

HOOFDSTUK 3 SAMENVATTING VAN EERDER ONDERZOEK

3.1 Inleiding

In het verleden zijn diverse onderzoeken verricht naar het karakter van brekende golven en de krachten die door deze golven worden uitgeoefend op constructies. Vanwege het gebrek aan goede theoretische modellen en hun complexiteit is hoofdzakelijk experimenteel onderzoek verricht. Deze onderzoeken zijn onder te verdelen in:

- 1- Het uitvoeren van onderzoeken waarbij men hoofdzakelijk geïnteresseerd is in de grootte van de krachtpieken ten gevolge van brekende golven, in zowel diepwater- als ondiepwatersituaties. Metingen zijn verricht in regelmatige en onregelmatige golfvelden.

Voorbeelden:

Honda / Mitsuyasu (1974), Apelt / Baddiley (1981) en Wang (1985) hebben onderzoek gedaan naar krachten in brekende golven in ondiep water bij een regelmatig golfveld.

Kjeldsen / Akre (1985) en Easson / Greated (1985) hebben gemeten in diep water in regelmatige en onregelmatige, brekende golven.

Van Kouwenhoven (1986) heeft in ondiep water met onregelmatige, brekende golven gemeten. Het meest recente onderzoek is afkomstig van Subrata K. Chakrabarti (mei 1988).

- 2- Het uitvoeren van statistisch onderzoek waarbij is gekeken naar de statistische verdelingen van golfkrachten in onregelmatige, brekende golven.

Voorbeelden:

Ochi en Tsai (1983) hebben de kansdichtheidsfunctie van schokdrukgolven ten gevolge van brekende golven afgeleid.

Verbeek en Brouwers (1985) hebben theoretisch de verdeling van Morison-krachten afgeleid uit de verdeling van individuele golfhoogten en deze getoetst aan waarnemingen van krachten tegen een off shore platform in de Noordzee.

Van Kouwenhoven (1986) heeft een laboratoriumonderzoek gedaan naar de kansverdeling van golfkrachten in de brandingszone.

3.2 Van Kouwenhoven (1986)

De afstudeerder Van Kouwenhoven heeft een experimenteel onderzoek verricht naar golfkrachten in de brandingszone bij een onregelmatig golfveld. Bij de metingen is evenwijdig aan de taludbodem gemeten. De helling van het talud was 1:15 en de waterdiepte was 0,4 m. Het onderzoek valt uiteen in twee onderdelen:

- De bepaling van de vorm van de cumulatieve kansverdelingsfunctie van de golfkrachten en de verandering van deze kansverdeling als functie van de waterdiepte.
- Het onderzoeken of de modellering van de golfkrachten volgens de Morison-vergelijking in de brandingszone bruikbaar is en, indien dit het geval is, het schatten van de waarden van de coëfficiënten in deze vergelijking.

Conclusies:

- De verdeling van de krachtpieken in een onregelmatig golfveld met brekende golven kan in diep water ($H_{sig}/d=0.18$) goed worden benaderd met de Weibull-verdeling:

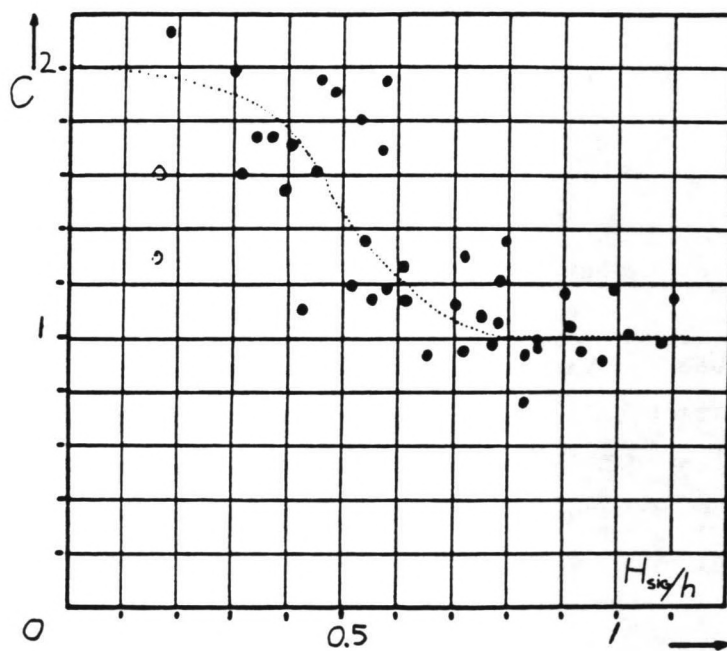


fig. 3.1

$$\Pr[\underline{x} < x] = 1 - \exp\left(-\left[\frac{x-A}{B}\right]^C\right)$$

A - drempelwaarde

B - schaalparameter

C - vormparameter

De vormparameter C, een maat voor de spreiding van x, blijkt een functie van de relatieve waterdiepte H_{sig}/d te zijn (fig. 3.1). Rond stilwatervniveau kan de de Weibull-verdeling niet meer toegepast worden, omdat de meetwaarden duidelijk een hyperbool vormen op het Weibull-papier. De oorzaak van deze afwijking kan liggen aan de geringe resonantiefrequentie van het meetelement. Bij een lage resonantiefrequentie is het meetelement de belemmerende factor bij het registreren van krachtpieken.

- De metingen zijn uitgevoerd in een gebied waar de volgende condities heersten:

$$0,45 < H_{sig}/d < 0,80$$

$$0,34 < d/h < 0,54$$

De modellering van de golfkrachten met de Morison-vergelijking voldoen in dit gebied, de traagheidskracht overheerst de sleepkracht sterk. De coëfficiënt C_d is geschat op 2 à 2,5, hetgeen volgens de verwachting is.

3.3 Apelt en Piorewicz (1986)

Deze onderzoekers hebben een groot aantal experimenten uitgevoerd, om een beter inzicht te krijgen in de grootte en de spreiding van de krachten veroorzaakt door brekende golven. In drie verschillende golfgoten werden regelmatige golven opgewekt, waarbij de diepteparameter d/H in het volgende gebied lag:

$$0,5 < d/H < 2,5$$

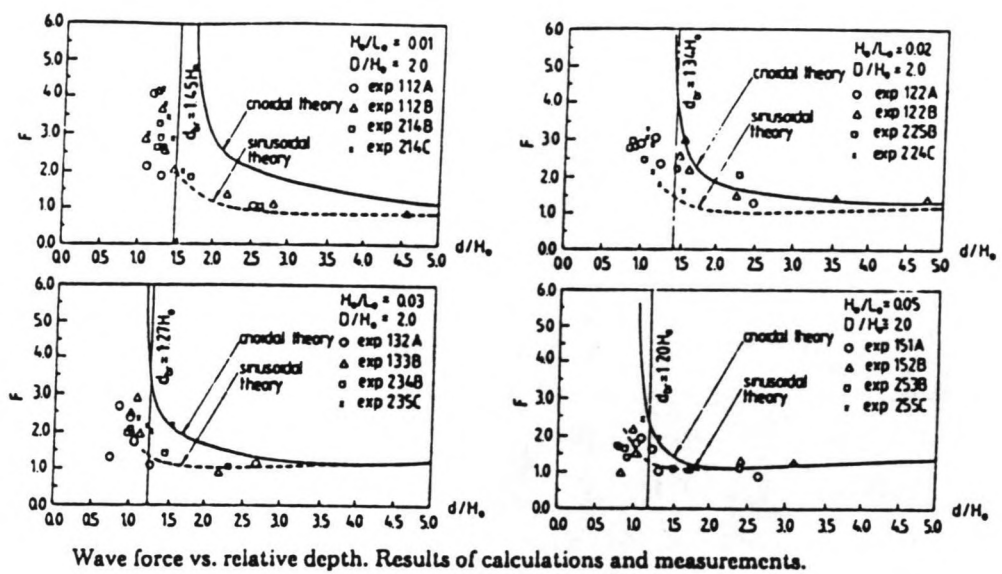


fig. 3.2

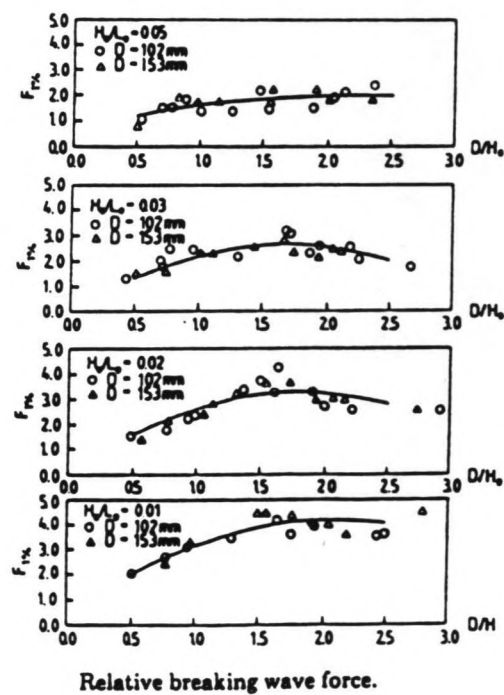


fig. 3.3

met d - waterdiepte

H - gemiddelde golfhoogte in diep water

De doelstellingen van de metingen zijn hieronder samengevat:

- Het meten van de maximaal optredende krachten en momenten die de golven op de cylinders uitoefenen en het vergelijken van de resultaten met theoretische benaderingen.
- De invloed van omringende cylinders, op de grootte van de gemeten waarden, vast te stellen.
- De amplituden van de gemeten krachten en momenten weer te geven als functie van een viertal parameters:

$$F = f(d/L, H/L, D/H, Re)$$

$$M = f(d/L, H/L, D/H, Re)$$

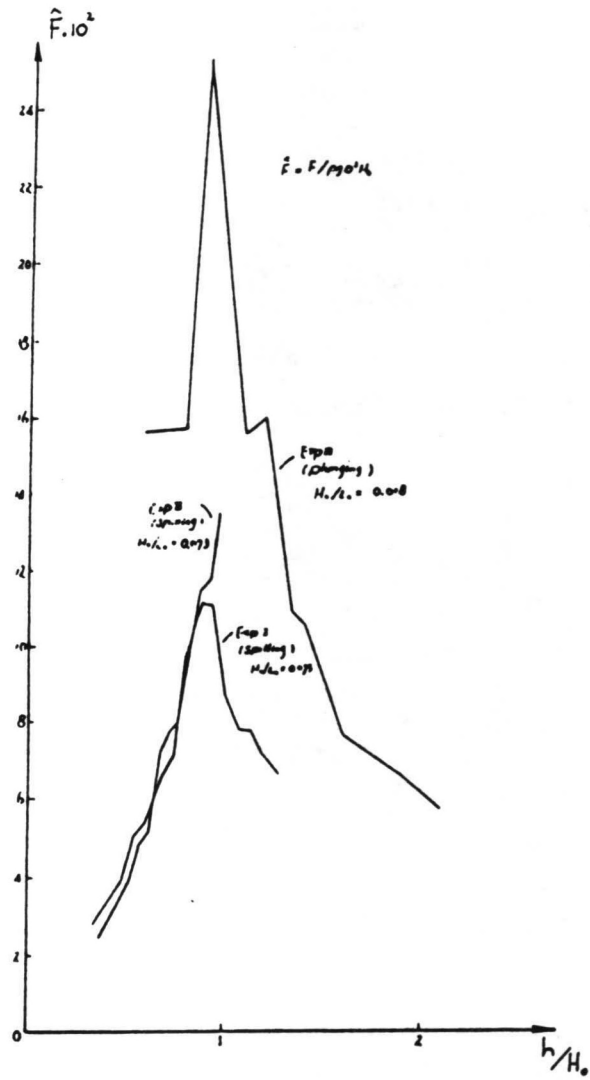
met L - golflengte in diep water

D - diameter van de meetcylinder

Re - Reynolds getal

Conclusies:

- Voor de brandingszone bleken de geregistreeerde krachten onderschat te worden bij gebruik van de sinusoidale theorie en overschat te worden bij gebruik van de cnoïdale theorie (fig. 3.2).
- De amplitude van de krachten die op een rij cylinders, evenwijdig aan het golffront, werken is sterk afhankelijk van hun onderlinge afstand. Bij een rij cylinders loodrecht op het golffront hebben zowel de voorstaande als de achterstaande cylinders invloed op de metingen.
- Voor het beschrijven van de dimensieloze kracht en moment zijn de parameters D/H en H/L voldoende.
- De resultaten hebben een zeer beperkt toepassingsgebied, waarbij de helling 1:15 is, $Re < 2.7 \times 10^5$ en $D/H < 1.5$ (fig. 3.3).



Non-dimensionalized Force ($\hat{F} = F / \rho g D^2 H_0$)

fig. 3.4

3.4 Wang (1987)

Wang heeft onderzoek verricht naar de absolute waarden van de golfkrachten in en voor de brandingszone en de verhouding van de golfkrachten tot die in diep water bij regelmatige golven. De metingen hebben plaats gevonden in een klein gebied rond stilwaterniveau. Bij deze metingen is gebruik gemaakt van dezelfde meetcilinder als in hoofdstuk 4 wordt beschreven, echter tijdens de metingen is de meetcilinder niet afgesloten geweest en kon het water achter de meetring terecht komen.

In het onderzoek van Wang zijn de volgende vragen onderzocht:

- Wat is de invloed van de verschillende 'breaker'-typen op de grootte van de golfkrachten?
- Wat is de relatie tussen de plaats waar de golven breken en de plaats waar de golfkrachten hun maximale waarden bereiken?
- Hoe varieert de grootte van de golfkrachten als functie van de golfhoogten, bij gelijke 'breaker'-typen?

Bij zes verschillende golfperiodes en golfhoogten is op verschillende plaatsen in de golfgoot de gemiddelde golfkracht bepaald en dimensieloos gemaakt door te delen door:

$$\rho g D^2 H \quad \text{en} \quad \rho g D H^2$$

De resultaten staan in fig. 3.4

Conclusies:

- Het 'breaker'-type is van grote invloed op de grootte van de maximale golfkrachten. De 'plunging' breaker veroorzaakt de grootste krachten.
- De plaats waar de maximale golfkrachten optreden is niet noodzakelijk de plaats waar de golven breken, maar het is de plaats waar de meetring door de top van de overslaande golf wordt getroffen (fig. 3.5).

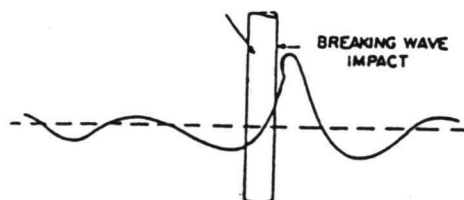


fig. 3.5

- De golfkrachten ten gevolge van gebroken golven zijn recht evenredig met $\rho g D^2 H$.

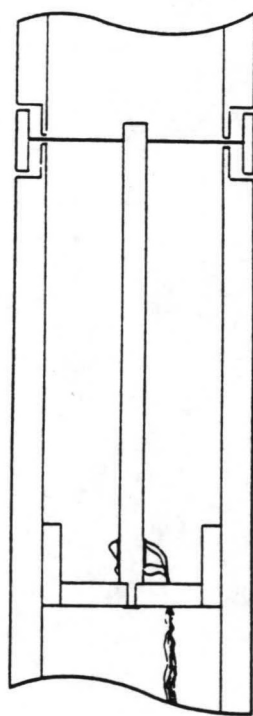


fig. 4.1

HOOFDSTUK 4 MEETCYLINDER

4.1 Beschrijving van de meetcilinder

Voor het meten van de golfkrachten is in dit onderzoek gebruik gemaakt van een meetcilinder van het Norwegian Marine Technology Research Institute A/S uit Trondheim.

De meetcilinder bestaat uit een aluminium koker met een diameter van 60 mm en een lengte van 400 mm, die aan de onderzijde open is en aan de bovenkant is afgesloten met een metalen plaatje. Halverwege is een sleuf uitgefreesd ter breedte van 18 mm, waarin de meetring is geplaatst, die door middel van een schroefverbinding is verbonden met een buigstaafje, dat verend is ingeklemd in een metalen blokje (fig. 4.1). Het metalen blokje is met schroefjes aan de wand van de cilinder bevestigd. De meetring met het buigstaafje en het blokje wordt de transducer genoemd en kan in zijn geheel uit de koker worden geschroefd. De meetring is uit twee halve ringen opgebouwd, die samen een cirkel vormen met een buitendiameter van 60 mm en een hoogte van 15 mm.

Bij de inklemming van het buigstaafje bevinden zich vier rekstrookjes, die als een brug van Wheatstone zijn geschakeld (fig. 4.2) en de verplaatsingen van de meetring registreren in twee loodrecht op elkaar staande hoofdrichtingen.

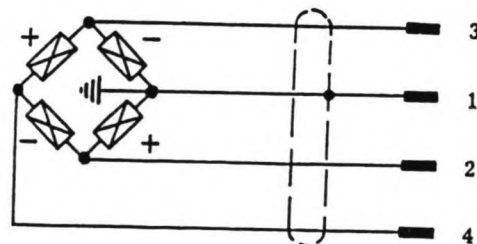


fig. 4.2

De rekstrookjes zijn zo geplaatst, dat voor elke hoofdrichting van twee rekstrookjes gebruik wordt gemaakt, die tegenover elkaar liggen. Dit is gedaan om temperatuurseffecten te elimineren.

Wanneer de meetring verplaatst, buigt het buigstaafje. De rekstrookjes die op het staafje zijn bevestigd zullen nu enigszins vervormen, waardoor hun elektrische weerstand verandert. Het potentiaalverschil dat over de brug van Wheatstone staat, verandert nu ook. Dit is een maat voor de kracht die op de meetring werkt. Het verband dat tussen de spanning en de kracht bestaat, zal in een ijkgrafiek worden vastgelegd. Zo kan de afgelezen spanning in een kracht worden omgerekend.

Het probleem van deze meetpaal is dat door de 1.5 mm brede spleten, aan de onder- en bovenkant van de meetring, water achter de meetring kan komen. Wanneer er water achter de meetring zit en er komt een golf tegen aan, wordt er achter de meetring een druk opgebouwd (fig. 4.3), die tegen de verplaatsing inwerkt. Het gevolg is dat het water tussen de spleten naar buiten zal komen, de theoretische vertaling van deze drukopbouw is een verhoging van de massa van de meetring met een zgn. toegevoegde massa. M.a.w. de massatraagheid van de meetring wordt groter en omdat de bewegingen van de meetring snel variëren, speelt de massatraagheid van de meetring een belangrijke rol.

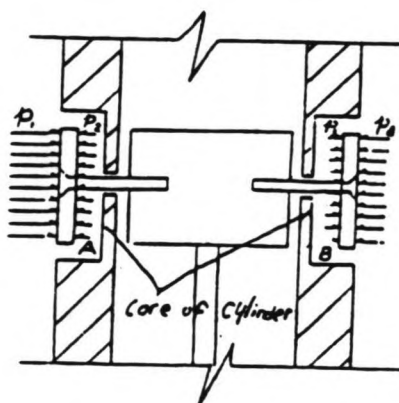


fig. 4.3

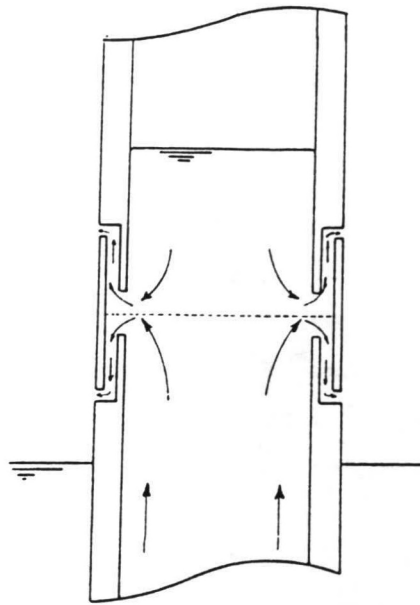


fig. 4.5

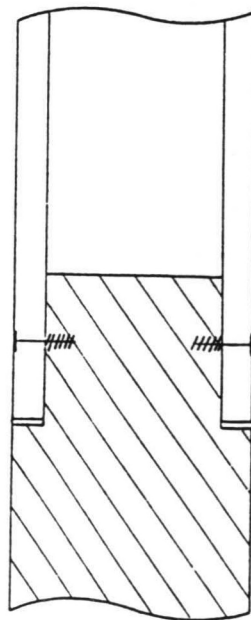


fig. 4.6

Een tweede weg waarlangs water achter de meetring kan komen, is via de open onderkant van de koker. Het water kan dan via het inwendige van de koker door de schroefgaten achter de meetring terecht komen (fig. 4.5).

De invloed van deze effecten is tijdens het onderzoek naar het dynamische gedrag onderzocht en geconcludeerd kan worden (zie paragrafen 4.3.6 en 4.4.5) dat de meetpaal waterdicht moet worden gemaakt. Daartoe moeten beide wegen waarlangs het water achter de meetring kan komen, worden afgesloten. Dit is op twee manieren gebeurd:

- Om de meetpaal is een rubber vlies (condoom) geschoven, dat ervoor zorgt dat het water niet door de spleten achter de meetring kan komen. Tussen het vlies en de meetcilinder wordt vacuümvet gesmeerd, zodat het water er niet tussendoor kan sijpelen.
- De onderkant van de meetpaal is afgesloten door een pvc-verlengstuk met bouten aan de meetpaal te bevestigen (fig 4.6). Tussen het verlengstuk en de koker is een rand siliconenkit gelegd om de waterdichtheid te verzekeren. Ook alle schroefverbindingen zijn met siliconenkit waterdicht gemaakt.

De invloed van het vlies zal worden onderzocht tijdens de ijkingen.

4.2 IJking

4.2.1 Inleiding

Bij de statische ijking wordt een verband gezocht tussen een statische belasting en de daarbij behorende spanning. In onderstaande paragrafen zal de ijking uitvoerig worden besproken.

Een dynamische ijking is niet uitgevoerd, daar de hiervoor benodigde apparatuur niet beschikbaar was.

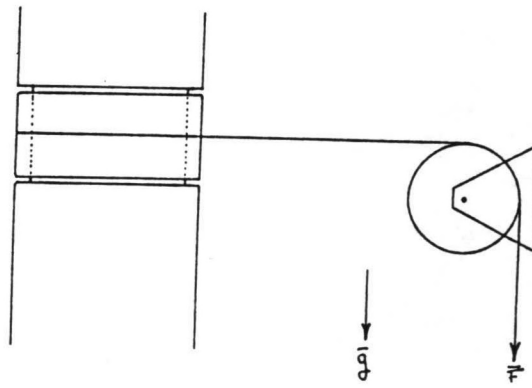


fig. 4.7

4.2.2 Meetprogramma

Het meetprogramma heeft tot doel het vinden van de ijkgrafiek, die het verband weergeeft tussen elektrische spanning en belasting. Bij het ijken is tevens gelet op de volgende vier punten:

- De mate van lineariteit tussen spanning en kracht; een maat hiervoor is de steekproefcorrelatiecoëfficiënt. De ijkgrafiek wordt bepaald tot een kracht van 3N, omdat grotere krachten bij de feitelijke metingen niet zullen voorkomen. Met regressie-analyse wordt de bij het diagram behorende ijkvergelijking bepaald.
- De richtingsafhankelijkheid van de meetring bij een bepaalde belasting. In de hoofdrichtingen is door achtereenvolgens de meetring op trek en druk te belasten de ijkgrafiek bepaald.
- De aanwezigheid van een hystereselus in het spanning-kracht diagram die zich openbaart bij het belasten en ontlasten van de meetring.
- De invloed van het rubber vlies om de meetring op de veerconstante van het systeem meetring-buigstaafje.
- De reproduceerbaarheid van de ijkgrafiek.

4.2.3 Meetopstelling

De meetcilinder wordt verticaal opgesteld en met gewichtjes, waarvan de massa bekend is, via een wrijvingsloos te beschouwen katrol horizontaal belast (fig. 4.7). Op deze manier wordt de onbekende kracht die meetring en torsiestaaaf, ten gevolge van het eigen gewicht, bij een horizontale opstelling leveren niet geïntroduceerd, zodat het werkelijke verband tussen spanning en kracht wordt weergegeven.

Op de meetversterker, die aan de meetcilinder is gekoppeld, kan de bij de kracht opgetreden spanning worden afgelezen (fig. 4.8). Door nu verschillende krachten op de meetring uit te oefenen, kan de ijkgrafiek worden bepaald.

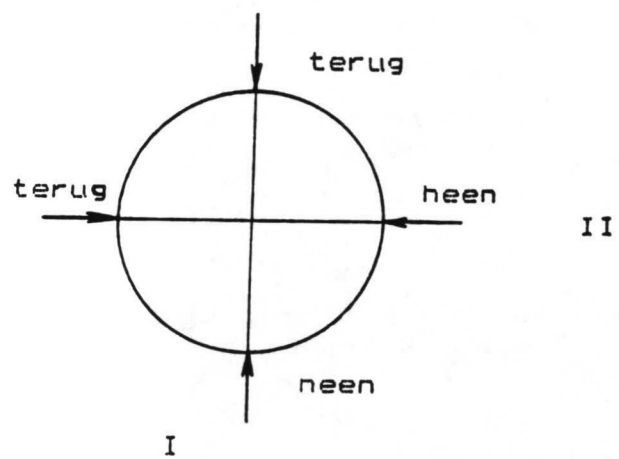


fig. 4.9



fig. 4.8

De meetring kan in alle richtingen worden belast en om bij de metingen de verschillende richtingen te onderscheiden, wordt het begrip hoofdrichting ingevoerd. Een hoofdrichting is de richting waarin twee rekstrookjes tegenover elkaar liggen, voor de definitie van de richtingen zie fig.4.9.

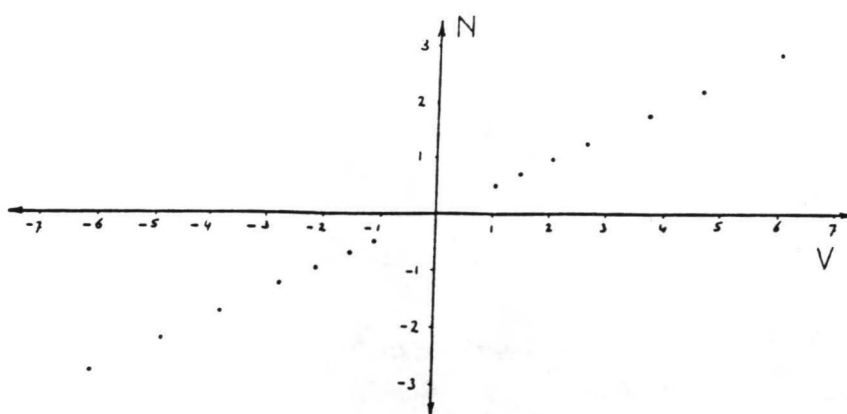
4.2.4 Bespreking van de resultaten

- De steekproefcorrelatiecoëfficiënt is nagenoeg gelijk aan 1, dat wil zeggen dat het verband tussen de opgelegde kracht en de afgelezen spanning als lineair kan worden beschouwd (tabel 4.10). In de beschouwing zijn zeven punten betrokken.

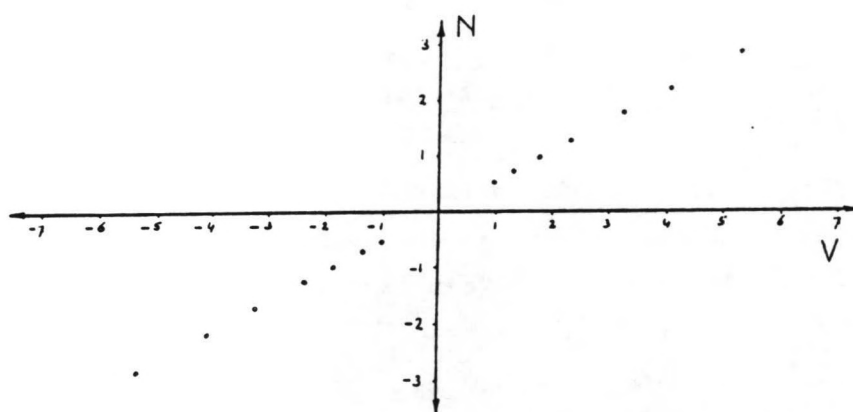
	I	II
zonder vlies	0,999	1,000
met vlies	0,999	0,999

tabel 4.10

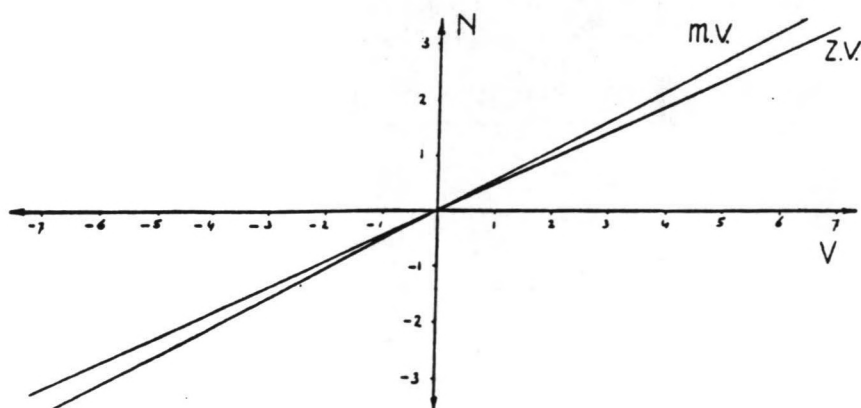
- Beide hoofdrichtingen hebben niet dezelfde ijkvergelijking, zodat er op gelet moet worden in welke richting wordt gemeten. Om deze reden is een merkteken op de meetcilinder aangebracht.
- Na herhaald uitvoeren van de proef kon in geen van de vier richtingen een hystereselus worden aangetoond. Er moeten hier wel een drietal opmerkingen bij worden gemaakt:



zonder vlies om de meetring



met vlies om de meetring



richting II

fig. 4.11

- door de proeven snel uit te voeren is geen hystereselus waargenomen en aangezien de golfbelasting snel wisselt, levert dit bij de feitelijke metingen geen problemen op,
- de nulstand van de brug van Wheatstone verloopt bij een onbelaste meetring,
- bij een constante belasting vertoont de meetring een kruipverschijnsel.
- De verwachting was dat de veerconstante van de meetring zou toenemen door het strak gespannen vlies. In richting I werd een stijging van de veerconstante van ongeveer 5% geconstateerd en in richting II ongeveer 10% (fig. 4.11). Omdat de stijfheidsveranderingen in de ijkvergelijkingen verdisconteerd zijn, levert dit geen problemen op.
- De ijkings hebben bij herhaling nagenoeg gelijke vergelijkingen opgeleverd (1% verschil).

4.3 Dynamisch gedrag van de meetring

4.3.1 Inleiding

Om een indruk van het dynamisch gedrag van de meetring te krijgen zijn proeven uitgevoerd waarbij resonantiefrequentie en de demping van het massa-veer systeem meetring-staafje (in het vervolg slechts met meetring aangeduid), in zowel lucht als water, zijn bepaald. Als controle op de resultaten is ook nog een meting in de golfgoot uitgevoerd, waarbij de meetring wordt belast door een regelmatige, sinusvormige golf.

Beide onderdelen zijn uitgevoerd met en zonder vlies om de meetring.

4.3.2 Schematisatie van de meetring

Het doel van het bepalen van de resonantiefrequentie en de demping is te weten te komen hoe het verloop van de overdrachtsfunctie van de meetring eruit ziet en tot welke frequentie het verschil tussen werkelijk optredende

en door de meetring geregistreeerde kracht acceptabel is. Als grens wordt een verschil van enkele procenten geaccepteerd. Het verloop van de overdrachtsfunctie ligt theoretisch vast als de meetring geschematiseerd wordt als een gedempt massa-veer systeem (fig. 4.12). Dit wordt later aan de hand van de metingen gecontroleerd.

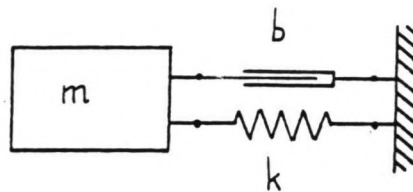


fig. 4.12

Voor het massa-veer systeem kan de volgende differentiaalvergelijking worden opgesteld:

$$m\ddot{F} + b\dot{F} + F = 0$$

m - massa

c - compliantie

b - wrijving

Om de harmonische responsie van het massa-veer systeem op de gedwongen belasting te onderzoeken, wordt het onderworpen aan een enkelvoudige sinusvormige belasting:

$$F(t) = \hat{F}\cos(\omega t)$$

De op te lossen differentiaalvergelijking wordt nu:

$$m\ddot{F} + b\dot{F} + F = \hat{F}\cos(\omega t) \quad \text{en } c = 1/k$$

k - veerconstante

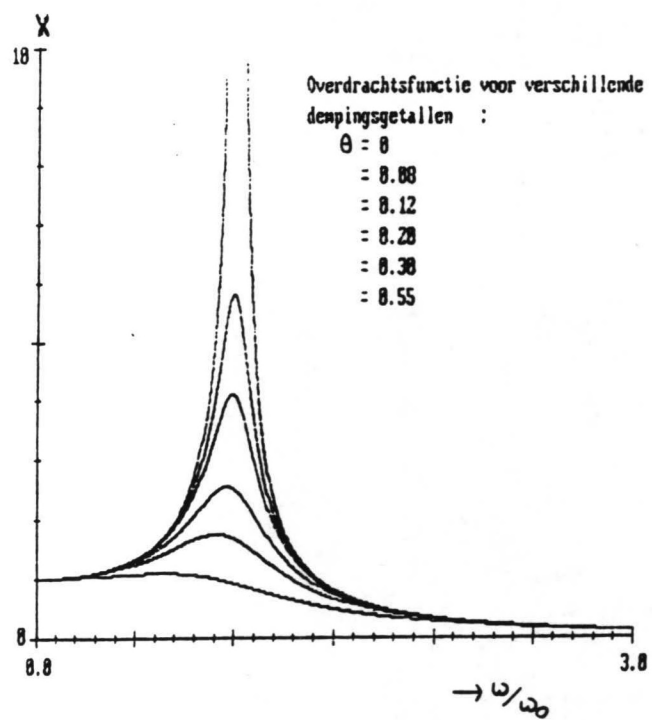


fig. 4.13

Als we een eventueel eigenproces buiten beschouwing laten, dan wordt de responsie slechts bepaald door de particuliere oplossing van de differentiaalvergelijking, welke van de volgende vorm is:

$$F(t) = \hat{\chi} F \cos(\omega t + \phi)$$

waarbij: χ - overdrachtsfactor
 ϕ - faseverschuiving

Substitutie van de particuliere oplossing in de differentiaalvergelijking leidt tot uitdrukkingen voor de overdrachtsfactor en de faseverschuiving. Zoals bij verder uitwerken zal blijken, zijn overdrachtsfactor en faseverschuiving afhankelijk van de frequentie van de excitatie (fig. 4.13).

$$\chi(\omega) = \sqrt{[(1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2)^2 + (2\theta \frac{\omega}{\omega_0})^2]^{-1}}$$

waarbij: θ - dempingsgetal = $\frac{b}{2m\omega_0}$

$$\omega_0 = \text{resonantiefrequentie} = \sqrt{\frac{1}{m c}}$$

Hiermee ligt de overdrachtsfunctie vast en zijn de enige onbekende parameters de resonantiefrequentie ω_0 en het dempingsgetal θ . Uit de proeven zullen echter ω_e en θ worden bepaald. Daar ω_e bij een licht gedempt systeem ongeveer gelijk is aan ω_0 , kan ω_e gelijk aan ω_0 worden gesteld. De proeven bestaan uit het bepalen van de responsie van de meetring op een pulsvormige belasting. De responsie van de meetring is een eigenproces en kan gevonden worden als oplossing van de homogene vergelijking:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + \frac{1}{c}x = 0$$

Het eigenproces luidt: $x(t) = C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t}$

$$\text{met } p_{1,2} = -\beta_e \pm i\omega_e \quad \omega_e = \sqrt{\left[\frac{1}{m c} + \frac{b^2}{4 m^2} \right]}$$

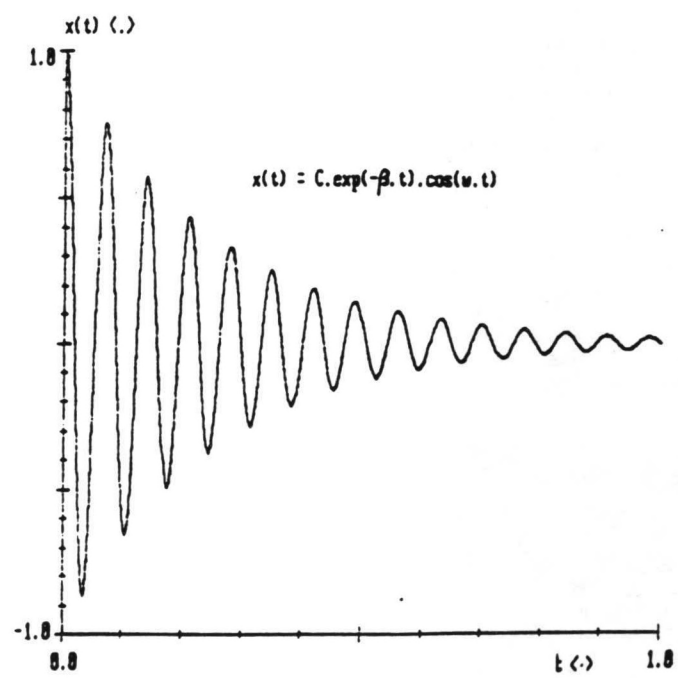


fig. 4.14

$$\beta_e = \frac{b}{2m}$$

Bij de meetring hebben we te maken met een ondergedempt systeem, zodat:

$$x(t) = C_x e^{-\beta_e t} \cos(\omega_e t + \phi)$$

De uitwijking geeft het verloop te zien van een e-macht gedempte sinus (fig. 4.14).

Het is van belang de overdrachtsfunctie te kennen, omdat de meetring tijdens de experimenten aan brekende golven wordt blootgesteld. De 'plunging' breakers (fig. 4.15) veroorzaken kortdurende krachtpieken, die zijn

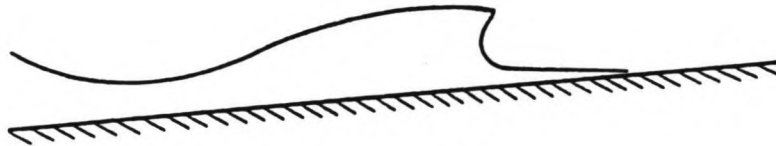


fig. 4.15

opgebouwd uit hoge frequenties, die in de buurt van de eigenfrequentie van de meetring kunnen liggen. Omdat de overdrachtsfactor dan groter is dan één, worden de gemeten krachtpieken versterkt weergegeven. Om dit enigszins te kwantificeren is de overdrachtsfunctie essentieel.

4.3.3 Meetprogramma

Het eerste doel van deze proevenserie is de resonantiefrequentie en het dempingsgetal van de meetring te bepalen. De proeven zullen zowel in lucht als in water worden uitgevoerd.

Het tweede doel van de proeven is een indruk te krijgen van het effect van het vlies om de meetring op de resonantiefrequentie en het dempingsgetal van de meetring. Daartoe zijn de proeven zowel met als zonder vlies uitge-

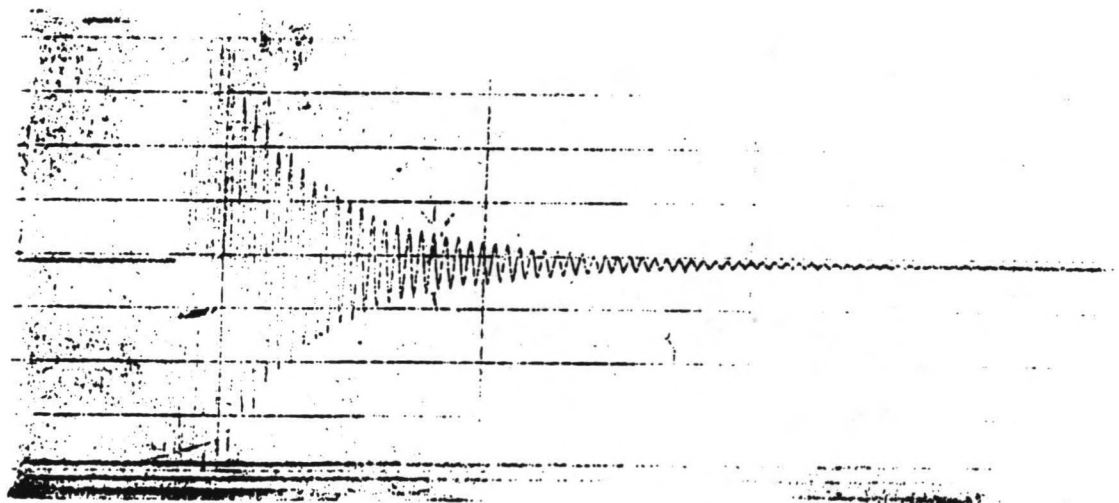


fig. 4.17

voerd. Ook is het effect van water achter de meetring bekeken op beide grootheden wanneer de meetring in lucht of onder water wordt aangeslagen.

4.3.4 Meetopstelling

Om de resonantiefrequentie en het dempingsgetal van de meetring te bepalen, wordt de meetpaal aangesloten op een meetversterker, die met een UV-recorder is verbonden (fig. 4.16). De papiersnelheid van de UV-recorder was ingesteld op 50 cm/s.

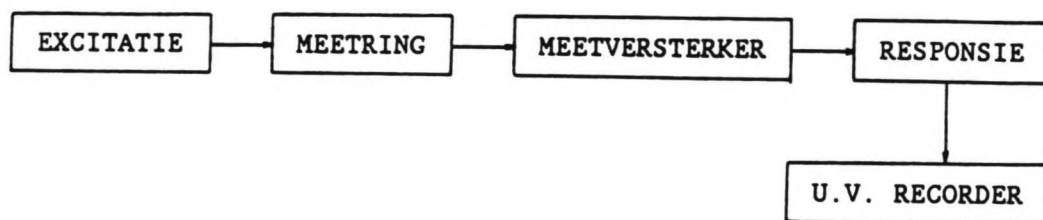


fig. 4.16

Het eigenproces van de meetring wordt geïnitieerd door met een staaf een tik op de meetring te geven. Door nu tegelijkertijd het UV-papier te laten lopen en het door de meetring afgegeven signaal te registreren, wordt nevenstaande grafiek door de lichtbron op het UV-papier vastgelegd (fig. 4.17).

4.3.5 Uitwerking metingen

De metingen leveren voor alle gevallen een e-macht gedempte sinus op (fig. 4.17). Om te controleren of de figuur ook daadwerkelijk een e-macht gedempt is, is bij eenzelfde figuur de waarde voor θ in twee gebieden bepaald. Indien de waarden voor θ aan elkaar gelijk zijn, dan kan deze figuur als e-macht gedempt worden beschouwd. Uit de grafieken kan de resonantiefrequentie worden bepaald; immers de papiersnelheid is bekend. Het dempingsgetal

Resonantiefrequentie [Hz]:

		zonder vlies		met vlies	
onder water	water achter ring	I 154	II 132	I 162	II 112
	lucht achter ring	n.v.t.		I 174	II 191
in lucht		I 198	II 191	I 209	II 215

tabel 4.18

		zonder vlies		met vlies	
onder water	water achter ring	I 0,017	II 0,019	I 0,019	II 0,027
	lucht achter ring	n.v.t.		I 0,015	II 0,018
in lucht		I 0,007	II 0,008	I 0,017	II 0,016

tabel 4.19

kan met onderstaande formule worden berekend. Om enige nauwkeurigheid te bereiken is gemeten over 10 cycli.

$$\theta = - \left(\frac{1}{20\pi} \right) \cdot \ln \left(\frac{x(t+10T)}{x(t)} \right)$$

4.3.6 Bespreking van de resultaten

In nevenstaande tabellen (tabel 4.18 en 4.19) zijn de resultaten van de verschillende metingen verzameld. De voor de waarden vermelde I en II geven de onderzochte richting aan. Deze richtingen zijn in paragraaf 4.2.3 gedefinieerd.

Geconcludeerd kan worden dat het vlies de resonantiefrequentie doet toenemen. Het duidelijkst is dit waar te nemen wanneer de meetring onder water wordt aangeslagen. Door het vlies neemt de resonantiefrequentie in richting I met 13% en in richting II met 45% toe. Opgemerkt dient te worden dat bij het bepalen van de resonantiefrequentie in richting I de gemeten waarden bij herhaling van het experiment niet stabiel waren en dat de grafieken niet een duidelijke e-macht gedempte sinus opleverden. Een hoge resonantiefrequentie is gunstig met het oog op de versterkte weergave van de krachtpieken. Immers hoe hoger de resonantiefrequentie des te lager is de versterking van de gemeten krachtpieken.

Ook blijkt uit tabel 4.18 dat water achter en om de meetring een ongunstige invloed op het dynamisch gedrag van de meetring heeft, gezien de daling van de resonantiefrequentie. Wanneer de meetring beweegt, zal het water achter de ring deze beweging willen volgen. De massa van de meetring neemt als het ware toe met de zogenaamde hydrodynamische massa. De resonantiefrequentie van de meetring wordt dus verlaagd.

Uit de gevonden waarden voor het dempingsgetal (tabel 4.19) blijkt dat het systeem zeer licht gedempt is. Dit heeft tot gevolg dat de overdrachtsfactor in de buurt van de resonantiefrequentie van de meetring zeer hoge

waarden kan bereiken (fig. 4.13). Het krachtensignaal zal daarom moeten worden gefilterd.

4.4 Controlemeting in de golfgoot

4.4.1 Inleiding

Er wordt in de golfgoot een controlemeting uitgevoerd, waarbij een bij benadering sinusvormige diepwatergolf wordt opgewekt en de meetring zich onder water bevindt. In deze situatie kan de Morison-vergelijking worden toegepast. Er zullen een aantal punten worden onderzocht:

- Voor de meetring met vlies, en lucht achter de meetring, wordt nagegaan of de ijkgrafiek, verkregen uit de statische ijking, inderdaad toegepast kan worden bij het bepalen van de golfkrachten. De verwachting is dat de ijkgrafiek gebruikt kan worden, omdat er geen drukopbouw achter de meetring plaats kan vinden en de frequentie van de gedwongen belasting veel lager is dan de resonantiefrequentie.
- Voor de meetring zonder vlies wordt nagegaan of de gemeten krachten lager zijn dan de gemeten krachten bij een proef met vlies om de meetring.
- De meetring kan in verschillende richtingen worden belast en er wordt bekeken of er een richting is, waarbij het verschil tussen gemeten en berekende kracht minimaal is.

Om na te gaan of de geregistreeerde kracht de juiste kracht is, zal de werkelijke waarde worden benaderd met behulp van de Morison-formule. Hierbij dient de snelheid van het water, ter hoogte van de meetring, bekend te zijn.

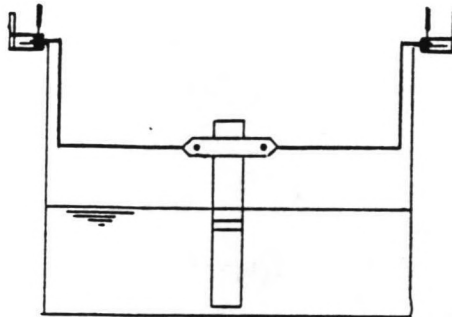


fig. 4.20

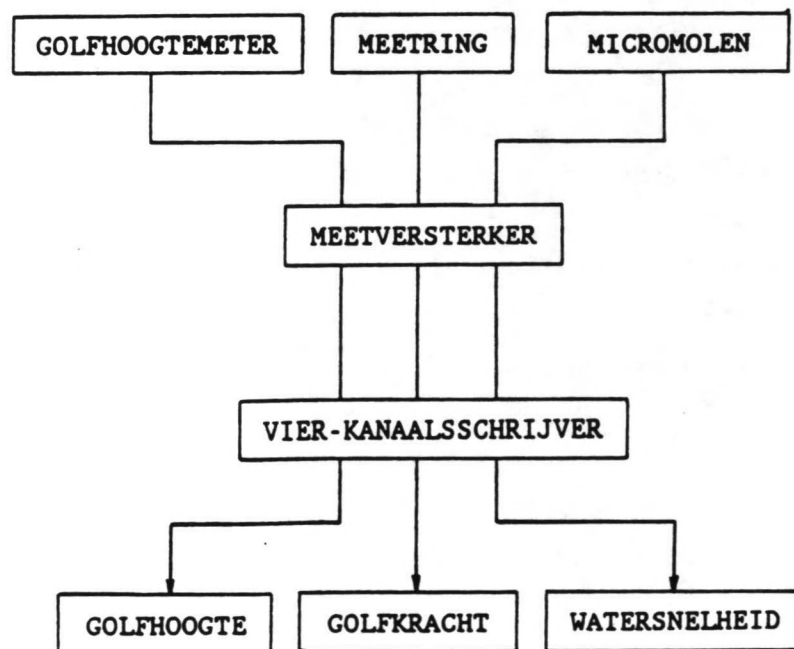


fig. 4.21

4.4.2 Meetopstelling

De boven beschreven proeven werden in de lange speurwerk goot in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de T.U. Delft uitgevoerd. De speurwerkgoet is 38 m lang, 1,3 m hoog en 0,8 m breed. De golven worden opgewekt door een golfschot met electronische besturingseenheid. Hiermee kunnen de golfhoogte en golfperiode worden ingesteld. Om regelmatige, sinusvormige golven op te kunnen wekken is een sinusgenerator aangesloten. De meetcylinder is halverwege de goot met behulp van een beugelconstructie in de goot gehangen; de meetring bevond zich op 5 cm beneden het stilwaterniveau (fig. 4.20).

Aan de meetcylinder werd een meetversterker aangesloten om de golfkrachten te kunnen meten. De golfhoogtemeter werd naast de meetcylinder geplaatst, zodat de locale golfhoogte bekend was. Aan de andere kant van de meetcylinder werd een micromolen gehangen op de hoogte van de meetring. Om de drie grootheden golfkracht, golfhoogte en watersnelheid te kunnen registreren, is gebruik gemaakt van een vierkanaalsschrijver (fig. 4.21). De waarden worden gelijktijdig geregistreerd en kunnen gemakkelijk worden afgelezen (fig. 4.22).

De gebruikte opstelling was voor beide proeven hetzelfde.

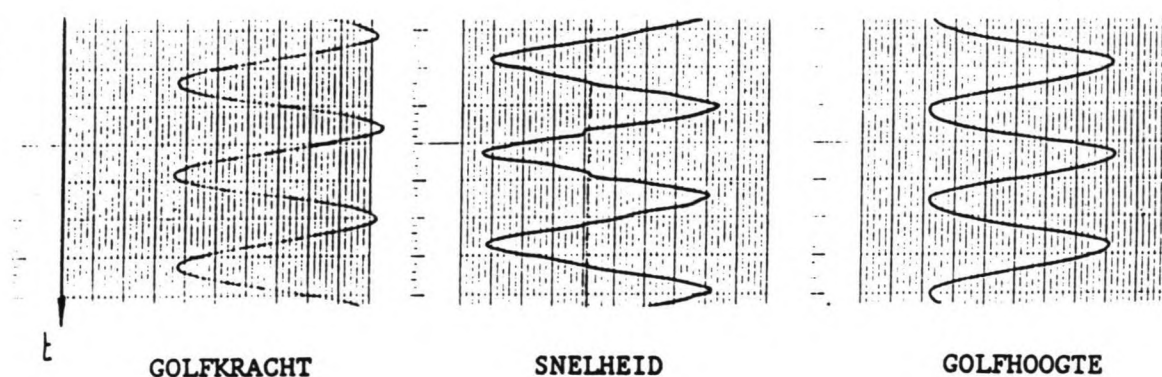


fig.4.22

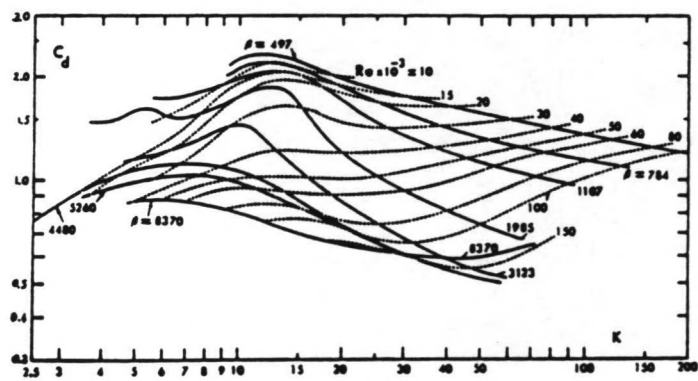
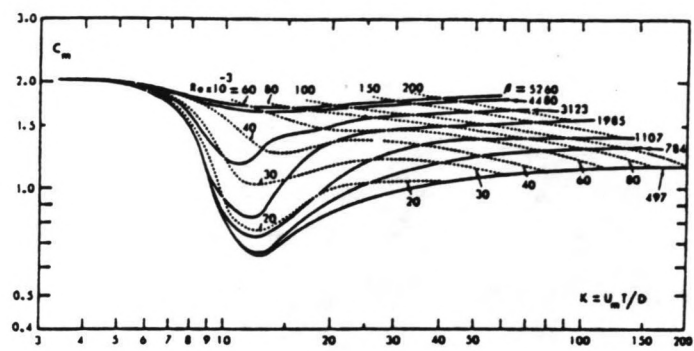


fig. 4.23

4.4.3 Meetprogramma

De meetserie wordt uitgevoerd voor vier verschillende golfperioden ($T = 1,85 \text{ s}$, $1,27 \text{ s}$, $1,03 \text{ s}$ en $0,96 \text{ s}$) en twee verschillende golfhoogten ($H = 6 \text{ cm}$ en 9 cm). Om de invloed van het rubber vlies op de gemeten golfkrachten te kunnen bekijken wordt de meetserie zowel met als zonder vlies om de meetring uitgevoerd.

De meetcilinder kan in vier verschillende richtingen worden belast (fig. 4.9). Om nu te kijken in welke richting de fout in de gemeten kracht het laagst is, is de meetcilinder bij een vaste golfperiode ($T = 1,21 \text{ s}$) en bij twee verschillende golfhoogten ($H = 6 \text{ cm}$ en 9 cm) in de vier verschillende richtingen belast.

De metingen zijn uitgevoerd bij een constante waterdiepte van 40 cm .

4.4.4 Uitwerking metingen

Om de theoretische golfkrachten te kunnen berekenen is gebruik gemaakt van de Morison-vergelijking:

$$F_{\text{mor}} = C_d \rho \frac{D}{2} u |u| + C_m \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{\delta u}{\delta t}$$

De coëfficiënten C_d en C_m kunnen met behulp van fig. 4.23 worden bepaald, als het Keulegan-Carpenter getal ($K = UT/D$) en de frequentieparameter β bekend zijn. Deze kunnen uit de metingen worden bepaald. De meetomstandigheden zijn zo gekozen dat de sleepkracht zo klein mogelijk wordt. Om dit te illustreren is hieronder de verhouding tussen de sleepkracht en de traagheidsterm gegeven, als de snelheid van de waterbeweging een sinusvormig verloop heeft van de vorm:

$$u(t) = \hat{U} \cos(\omega t)$$

T<s>	H<cm>	U* <m/s>	U<m/s>	fout<%>
1,85	6,6	0,1374	0,1310	+ 4,9
	9,8	0,2030	0,1860	+ 9,1
1,83	6,6	0,1376	0,1380	- 0,3
	10,3	0,2148	0,2032	+ 5,7
1,25	6,9	0,1503	0,1449	+ 3,7
	9,8	0,2135	0,2072	+ 3,0
1,04	6,0	0,1348	0,1538	-12,4
	9,6	0,2156	0,1958	+10,1
0,95	6,2	0,1418	0,1430	- 0,8
	9,1	0,2081	0,2060	+ 1,0

U - gemeten snelheid

U* - met behulp van de kortegolftheorie berekende snelheid

tabel 4.24

$$\frac{\text{sleepkracht}}{\text{traagheid}} = \frac{2C_d \hat{U} \cos(\omega t) |\cos(\omega t)|}{C_m \pi D \omega \sin(\omega t)}$$

We zijn slechts geïnteresseerd in de maximale waarden van beide termen, zodat:

$$\frac{\text{sleepkracht}}{\text{traagheid}} = \frac{C_d \hat{U}}{C_m \pi^2 D f} = \frac{1,68 C_d \hat{U}}{C_m f}$$

Met de resultaten uit tabel 4.24 is het Keulegan-Carpenter getal K te bepalen en er blijkt:

$$2,2 < K < 6,5$$

zodat $C_d \approx 1,0$ en $C_m \approx 2,0$ (fig. 4.23) mag worden genomen. Tevens kan uit tabel 4.24 de maximale waarde van U/f worden bepaald en wordt de verhouding tussen massatraagheid en wrijving:

$$\frac{\text{sleepkracht}}{\text{traagheid}} = 0,84 \cdot \hat{U} \cdot T \quad \max \approx 0,31$$

De sleepkracht is maximaal 31% van de traagheidsterm, zodat de Morison-kracht berekend kan worden met:

$$\bar{F}_{\text{mor}} = \bar{F}_i + \bar{F}_d \quad [N]$$

en de kracht op de 1,5 cm hoge meetring wordt nu:

$$F_i = 0,533 \cdot \hat{U} \cdot f \quad \text{en} \quad F_d = 0,45 \cdot \hat{U} \cdot |\hat{U}| \quad [N]$$

Met deze vorm van de Morison-vergelijking kan de werkelijk optredende kracht worden benaderd, als de stroomsnelheid en de golffrequentie voldoende nauwkeurig worden bepaald.

F - gemeten kracht

F* - berekende kracht met behulp van de berekende snelheid

meetpaal waterdicht afgesloten:

T<s>	H<cm>	F<mN>	F _i *<mN>	F _d *<mN>	F _{tot} *<mN>	fout<%>
1,85	6,5	49,7	37,5	7,7	38,3	-22,9
	9,8	69,0	53,4	15,6	55,6	-19,4
1,83	6,6	52,8	40,9	8,6	41,8	-20,8
	10,3	66,8	59,2	18,6	62,1	- 7,5
1,25	6,9	67,7	61,8	9,5	62,5	- 7,7
	9,8	95,6	88,3	19,3	90,4	- 5,4
1,04	6,0	86,2	78,8	10,6	79,5	- 7,8
	9,6	114,9	100,3	17,3	101,8	-11,4
0,95	6,0	86,9	80,2	9,2	80,7	- 7,1
	9,0	126,7	115,3	19,1	116,9	- 7,7

meetpaal niet afgesloten:

T<s>	H<cm>	F<mN>	F _i *<mN>	F _d *<mN>	F _{tot} *<mN>	fout<%>
1,85	5,9	31,1	40,9	9,1	41,9	+34,7
	9,0	41,4	51,6	14,4	53,6	+29,5
1,28	7,4	49,3	72,1	13,5	73,4	+48,9
	9,3	55,4	80,4	16,8	82,1	+48,1
1,27	6,5	44,5	65,6	11,0	66,5	+49,4
	9,0	58,3	84,8	18,4	86,8	+48,9
1,03	5,7	48,1	81,5	11,2	82,3	+71,1
	8,8	72,3	110,1	20,4	112,0	+54,9
0,96	6,0	47,3	80,0	9,3	80,5	+70,2
	9,0	70,7	116,0	19,7	117,7	+66,5

fig. 4.25

De gemeten kracht kan nu met de berekende kracht worden vergeleken. De fout tussen de gemeten en de berekende kracht wordt als volgt gedefinieerd:

$$\text{fout} = \frac{\text{berekende kracht} - \text{gemeten kracht}}{\text{gemeten kracht}}$$

Om er zeker van te zijn dat de micromolen de juiste watersnelheden aangaf, zijn de meetwaarden met de theoretisch berekende waarden vergeleken (lineaire korte-golf theorie). De waarden zijn in tabel 4.24 verzameld. De fout is gedefinieerd volgens de vergelijking:

$$\text{fout} = \frac{\text{berekende snelheid} - \text{gemeten snelheid}}{\text{gemeten snelheid}}$$

4.4.5 Bespreking van de resultaten

Uit tabel 4.24 blijkt dat de meeste gemeten snelheden goed met de berekende waarden overeenkomen. De gemeten snelheden komen om een aantal redenen niet overeen met de berekende snelheden:

- het niet zuiver sinusvormig zijn van de golf door de ondiep-water situatie,
- omdat de richting van de snelheid steeds verandert, moet het micromolentje deze verandering steeds volgen; bij de snelle wisselingen gaat de traagheid van het molentje een rol spelen.

De resultaten die uit de experimenten met en zonder vlies om de meetring zijn gevonden, zijn in nevenstaande tabellen (tabel 4.25) op een rij gezet. Er kan worden geconcludeerd dat het water achter de meetring een significante invloed heeft op de gemeten golfkracht. De fout in de gemeten kracht varieert tussen de 25 en 70%. Ook blijkt dat bij kortere golven de fout aanzienlijk toeneemt.

Uit de tabel met de resultaten van het experiment met vlies is af te leiden dat de fout in het algemeen ca 10% is. Alleen bij de relatief lange golven ($T = 1,85 \text{ s}$) is de fout groter dan 20%. Dit is te wijten aan het niet meer

sinusvormig zijn van de golf. De golf heeft nu de cnoidale vorm: een lang golfdal en korte golftop (fig. 4.26), met als gevolg dat de lineaire kortegolftheorie niet meer toegepast mag worden.



fig. 4.26

Wanneer alleen de andere golflengten worden beschouwd, verdient het aanbeveling om in het vervolg te meten met een vlies om de meetring.

Tot slot volgt hieronder de tabel met de resultaten van de richtingsafhankelijkheidstest (tabel 4.27). Het blijkt dat bij de laatst genoemde richting de fout het kleinst is. Omdat richting I problemen gaf bij het meten van de resonantiefrequentie (paragraaf 4.3.6), is voor richting II gekozen. In deze richting zit weliswaar een groot verschil in de fout tussen heen- en terugrichting, echter dit is van minder daar de golfkrachten maar in één richting worden gemeten.

In het vervolg zal de meetring in richting II-terug worden belast.

richting	H<cm>	F* <mN>	F<mN>	fout<%>
I heen	5,9	61,0	59,0	- 3,3
	8,6	84,8	80,4	- 5,2
I terug	6,1	60,3	59,0	- 2,1
	9,4	87,8	83,9	- 4,4
II heen	6,6	72,9	62,3	-14,6
	8,6	87,5	76,7	-12,3
II terug	6,0	57,4	57,7	+ 0,5
	9,3	75,9	76,9	+ 1,2

tabel 4.27 (meetpaal afgesloten)

4.5 Conclusies ijking en controlemeting

- Het systeem meetring-buigstaaf kan als een licht gedempt massa-veer systeem worden beschouwd.
- De ijkgrafiek laat een lineair spanning-kracht diagram zien, dat goed reproduceerbaar is.
- Er treedt geen hysteresis op, mits de meetring snel belast en ontlast wordt.
- De eigenfrequentie van de meetring ligt rond de 190 Hz.
- Het water achter de meetring heeft een ongunstige invloed op de gemeten krachten. Om deze reden wordt de meetring gedurende de metingen waterdicht afgesloten met een rubber vlies.
- De meetring zal in de voorkeursrichting worden belast (richting II-terug).

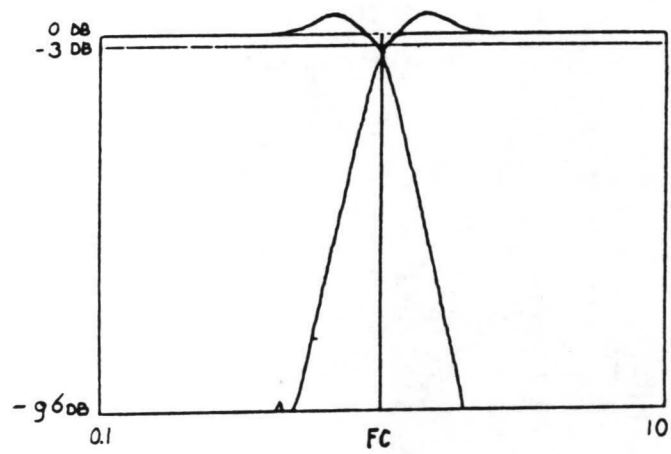


fig. 5.1

HOOFDSTUK 5 MEETOPSTELLING

5.1 Golfgoot en golfschotbesturing

De experimenten zijn in de lange speurwerkgoet van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica aan de T.U. Delft uitgevoerd.

Aan het begin van de golfgoot staat het golfschot dat middels een electro-nisch besturingssysteem wordt aangestuurd. Elk willekeurig spectrum kan door het instellen van de filters worden verkregen. Het besturingssysteem bestaat uit vier tweede-orde filters; twee laag-doorlaatfilters en twee hoog-doorlaatfilters, die alle in serie zijn geschakeld. Van elk filter kan de kantelfrequentie en de damping worden ingesteld.

Een laag-doorlaatfilter is een filter dat de lage frequenties doorlaat en de hoge frequenties uitfiltert. In een diagram ziet dit er als volgt uit (fig. 5.1). De steilheid van de lijn waar de hoge frequenties worden uitgefilterd, is een maat voor de orde van het filter. In dit geval is het een vierde orde filter. De bult die in de grafiek optreedt, kan worden versterkt of verzwakt door de damping te veranderen. Een hoog-doorlaatfilter is een filter dat de hoge frequenties doorlaat en de lage frequenties uitfiltert (fig. 5.1). Het punt waar de frequenties worden afgevlakt wordt, zowel bij het laag- als het hoog-doorlaatfilter, de kantelfrequentie genoemd.

Bij de experimenten is met een JONSWAP-spectrum met een significante golfhoogte van 6,5 cm gemeten. Bij dit spectrum hoorde de volgende filterinstelling:

ld-filter 095	damping 030
ld-filter 095	damping 030
hd-filter 140	damping 240
hd-filter 170	damping 240

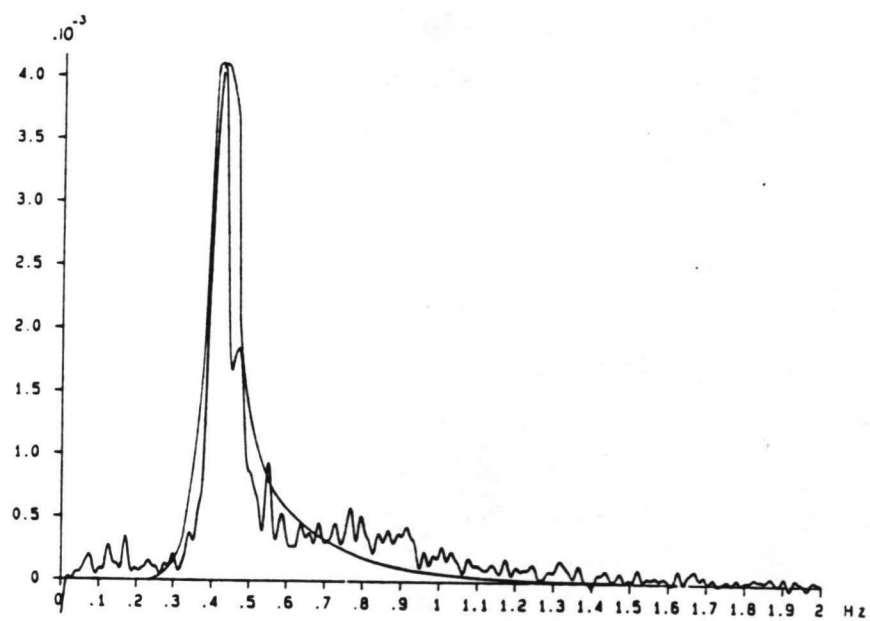


fig. 5.2

Ook Van Kouwenhoven heeft met een dergelijk spectrum gemeten. In fig. 5.2 is het theoretische JONSWAP-spectrum getekend samen met het spectrum zoals dat gedurende de metingen is opgetreden. Met de versterkingsfactor kan de amplitude van de golven worden vergroot of verlaagd. Bij deze metingen bedroeg de stand 045. De instelling van het besturingssysteem is gedurende de proevenserie constant gebleven.

Tijdens de metingen is het spectrum bij elk nieuw experiment gecontroleerd. Dit kon op eenvoudige wijze geschieden door gebruik te maken van speciaal voor dit doel ontwikkelde hard- en software. Op diep water is de golfhoogte met een golfhoogte gemeten. Het elektrische signaal van de golfhoogtemeter is bemonsterd met een A/D converter; de digitale gegevens zijn in een Apple II computer opgeslagen. Uit de opgeslagen gegevens kan met een correlator en een computerprogramma het spectrum worden berekend. Op een monitor kan het spectrum zichtbaar worden gemaakt, waarna het met een plot-opdracht kan worden afgedrukt. Een en ander is samengevat in onderstaand stroomschema (fig. 5.3).

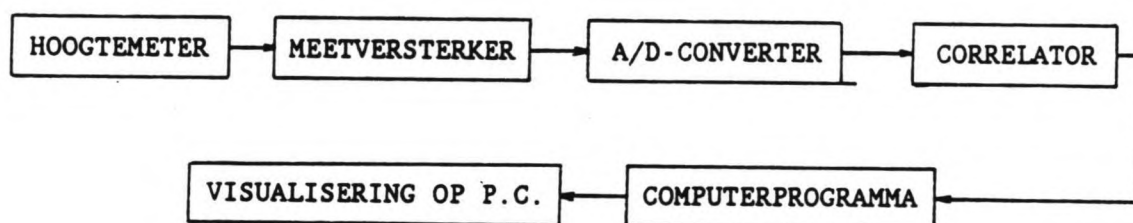


fig. 5.3

5.2 Talud

Om bij eerder onderzoek aan te sluiten is voor de helling van een talud van 1:15 gekozen. De helling bestaat uit zand met daaroverheen een dunne cementen bovenlaag om uitspoelen van het zand te voorkomen. In het gebied waar wordt gemeten, ligt een stalen frame, waarop een plank met verwisselbare elementjes van 15*13 cm ligt. De plank en de elementjes zijn van Trovidur

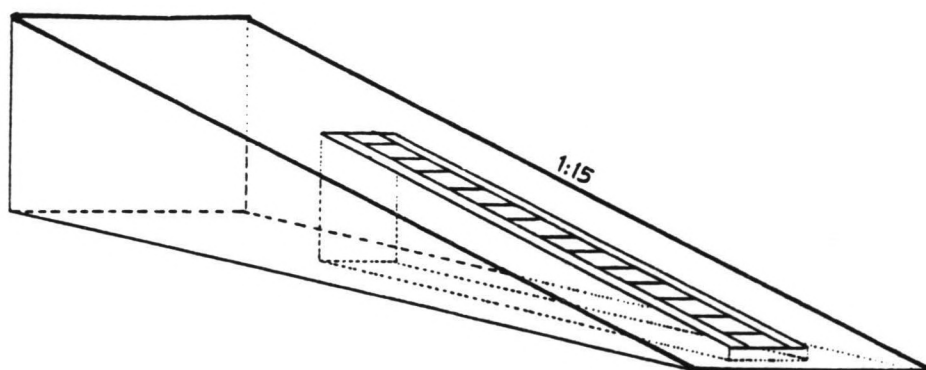


fig. 5.4

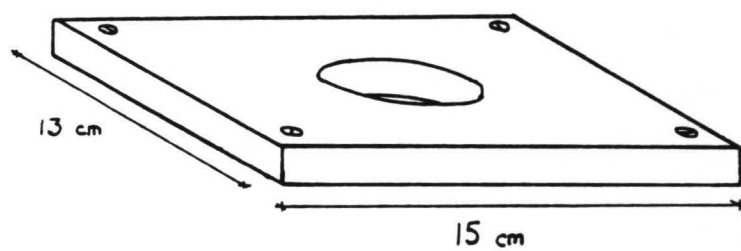


fig. 5.5

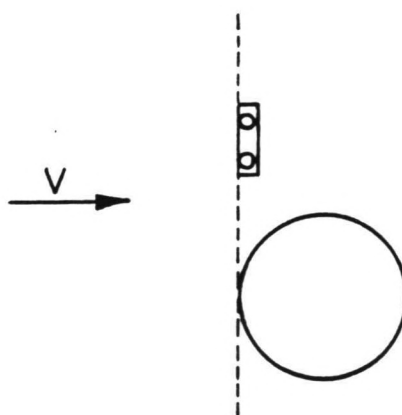


fig. 5.6

gemaakt. Het geheel ligt verzonken in de helling (fig. 5.4). In één elementje is een gat gemaakt met een diameter van 60 mm (fig. 5.5), waarin de meetcilinder komt te staan. Op deze wijze wordt ervoor gezorgd, dat de meetcilinder aan de onderzijde stevig is ingeklemd. De elementjes zitten elk met vier schroeven op de plank bevestigd en zijn onderling eenvoudig te verwisselen; er kan dus op elk gewenst punt langs de helling worden gemeten.

5.3 De opstelling van de meetcilinder

Door de dynamische belasting van de golven moet de meetcilinder zowel aan de boven- als onderzijde worden ingeklemd, daar anders door het heen en weer bewegen van de cylinder krachten worden gemeten, die niet van de golven afkomstig zijn.

De inklemming aan de bovenzijde wordt verwezenlijkt door de cylinder in een speciaal geconstrueerde beugel te klemmen. De beugel wordt met behulp van lijmklemmen aan de rand van de golfgoot bevestigd. Zo wordt een stijve constructie verkregen, waarin de cylinder niet kan bewegen.

De inklemming aan de onderzijde is in bovenstaande paragraaf beschreven.

5.4 De opstelling van de golfhoogtemeter

De meetcilinder is vijf centimeter naast de golfhoogtemeter geplaatst. Deze staat op één lijn met de voorkant van de meetcilinder (fig. 5.6). Het is van essentieel belang om de golfhoogtemeter zo dicht mogelijk naast de meetcilinder te plaatsen om de volgende reden.

Tijdens de metingen bleek dat het kan voorkomen dat de golfkam een hoek anders dan 90 graden met de lengte-as van de golfgoot maakt. De hoogtemeter meet dan te vroeg of te laat het tijdstip, waarop de waterstand het niveau

van de meetring passeert. Dit heeft te maken met de verwerking van de geme-
ten data. Voor details wordt verwezen naar de bijlagen.

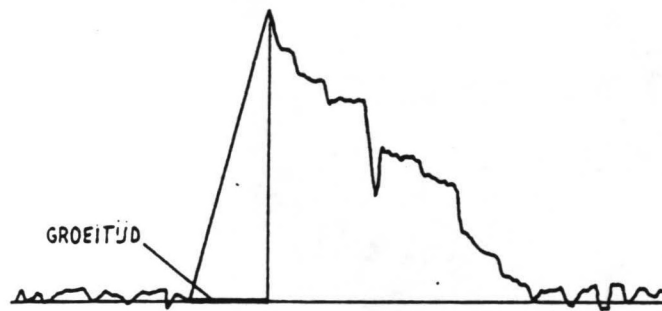


fig. 6.1

HOOFDSTUK 6 VERWERKING VAN HET MEETSIGNAAL

6.1 Filterfrequentie

De gemeten golfklap kan te groot zijn in vergelijking tot de werkelijk optredende kracht. Dit komt doordat de hoge frequenties waaruit de golfklap mede is opgebouwd, worden versterkt. De versterking is het gevolg van de overdrachtsfactor, die in de buurt van de eigenfrequentie van 190 Hz groter is dan één.

Uit eerder onderzoek is bekend, dat de groeitijd van een golfklap 8 tot 12 milliseconden bedraagt. De groeitijd is hier gedefinieerd als de tijd die verstrijkt van het tijdstip waar de golfkracht de waarde nul heeft tot het tijdstip waar de golfkracht zijn maximum bereikt (fig. 6.1). De waarden zijn met de onderstaande berekening gecontroleerd. Er is van de gedachte uitgegaan dat de kracht, ontstaan door een golfklap, zich ontwikkelt in een tijdsinterval gelijk aan de halve diameter van de meetcilinder gedeeld door de voortplantingssnelheid c van de golf. In formulevorm ziet dit er als volgt uit:

$$r = 0.5 \cdot D / c$$

$$r = 0.5 \cdot 0.06 / 2 = 15 \text{ ms}$$

De gevonden waarde is van dezelfde orde als de waarden bekend uit de literatuur.

De grondfrequentie van zo'n golfklap bedraagt dus maximaal 31 Hz. Immers de groeitijd komt overeen met een kwart trilling. Hieruit volgt dat een hele trilling overeen komt met een trillingstijd van 32 ms (=31 Hz). Een vuistregel uit de Fourier-analyse zegt, dat frequenties tot vijf maal de grondfrequentie nog energie aan het energiedichtheidspectrum leveren. Een eerste benadering is dus dat met frequenties tot circa 150 Hz nog rekening moet worden gehouden. Het krachtensignaal zal dus moeten worden gefilterd om de versterking enigszins ongedaan te maken.

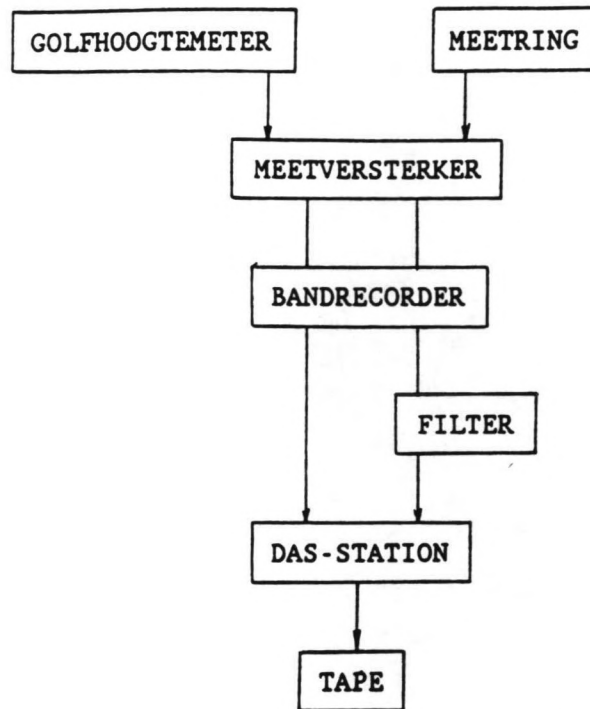


fig. 6.2

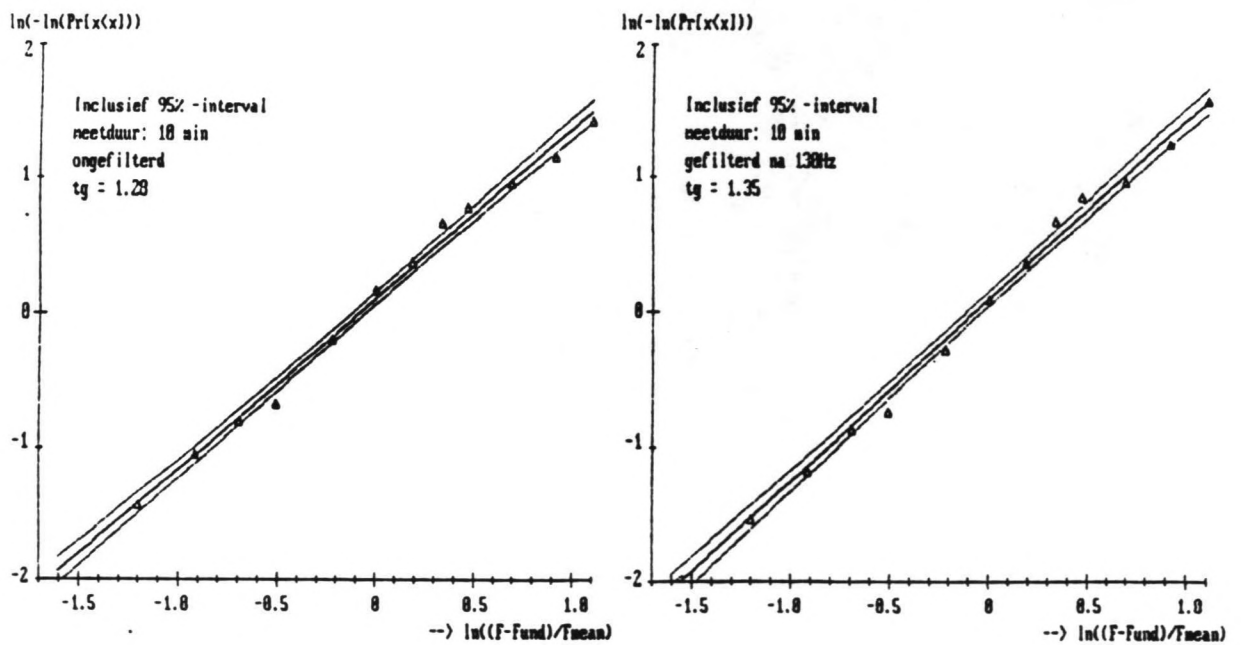


fig. 6.3

Daar de frequenties, waaruit het signaal van een golfklap is opgebouwd, onbekend zijn, is de keuze van de filterfrequentie op experimentele wijze geschied. Er is daartoe een proef uitgevoerd, waarbij het hoogtesignaal en het ongefilterde krachtsignaal eerst met behulp van een bandrecorder op magneetband zijn vastgelegd. De meetopstelling is in fig. 6.2 geschematiseerd weergegeven. Door de band bij verschillende filterfrequenties af te spelen, kan een indruk worden verkregen van de invloed van de verschillende filterfrequenties op het krachtsignaal.

Het voordeel van het gebruik van de bandrecorder is, dat resultaten en analyses van dezelfde golfklap bij verschillende filterfrequenties met elkaar kunnen worden vergeleken. Op deze wijze is de invloed van de verschillende filterfrequenties op een verantwoorde wijze vast te stellen.

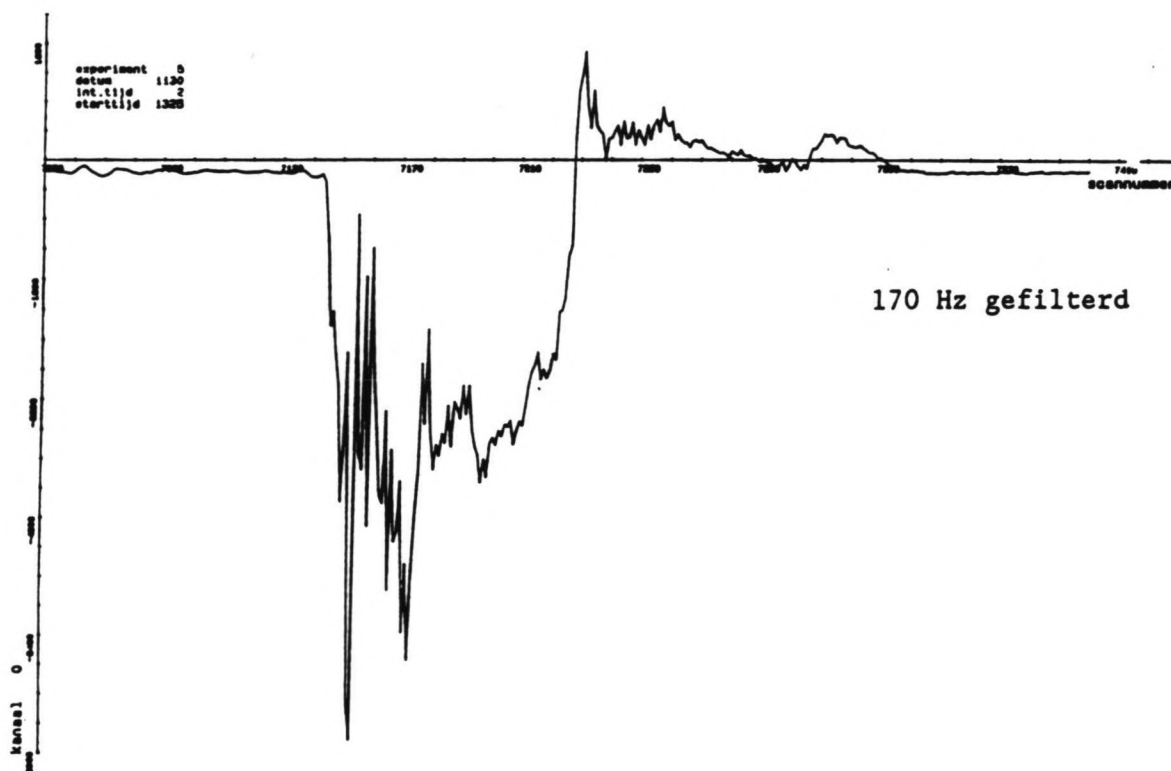
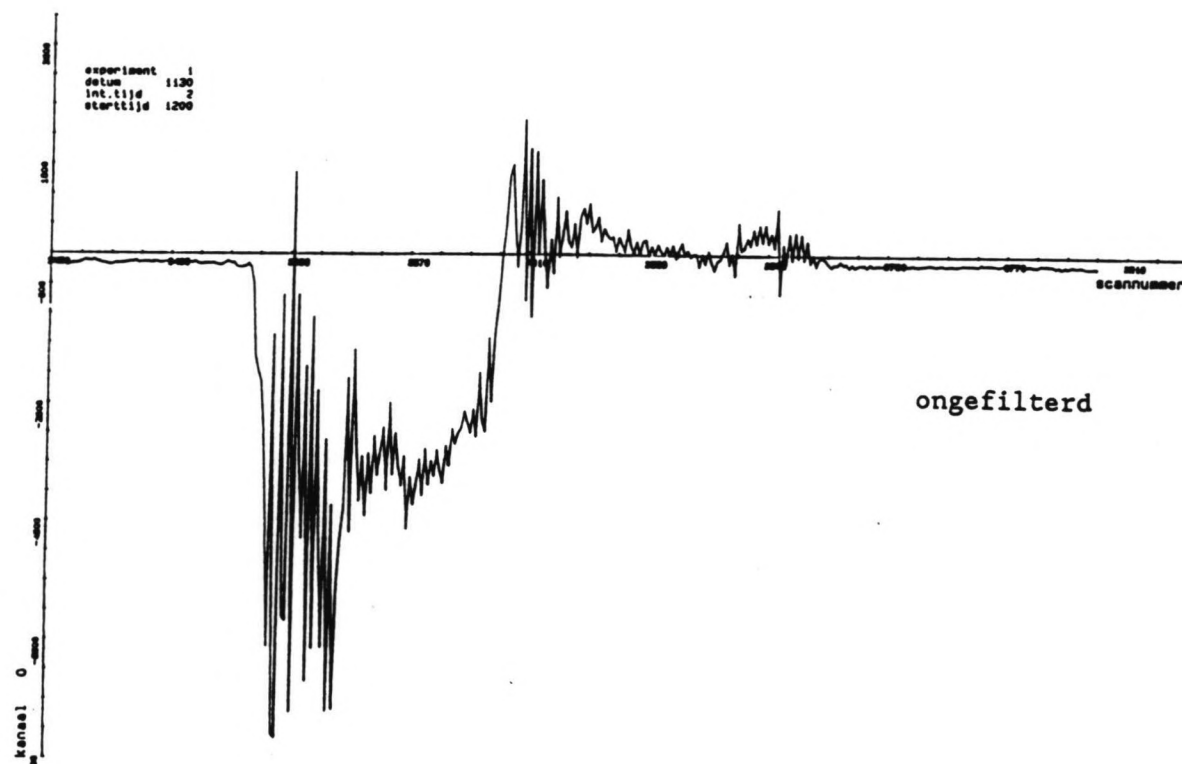
De invloed van de filterfrequenties is op twee manieren bekeken:

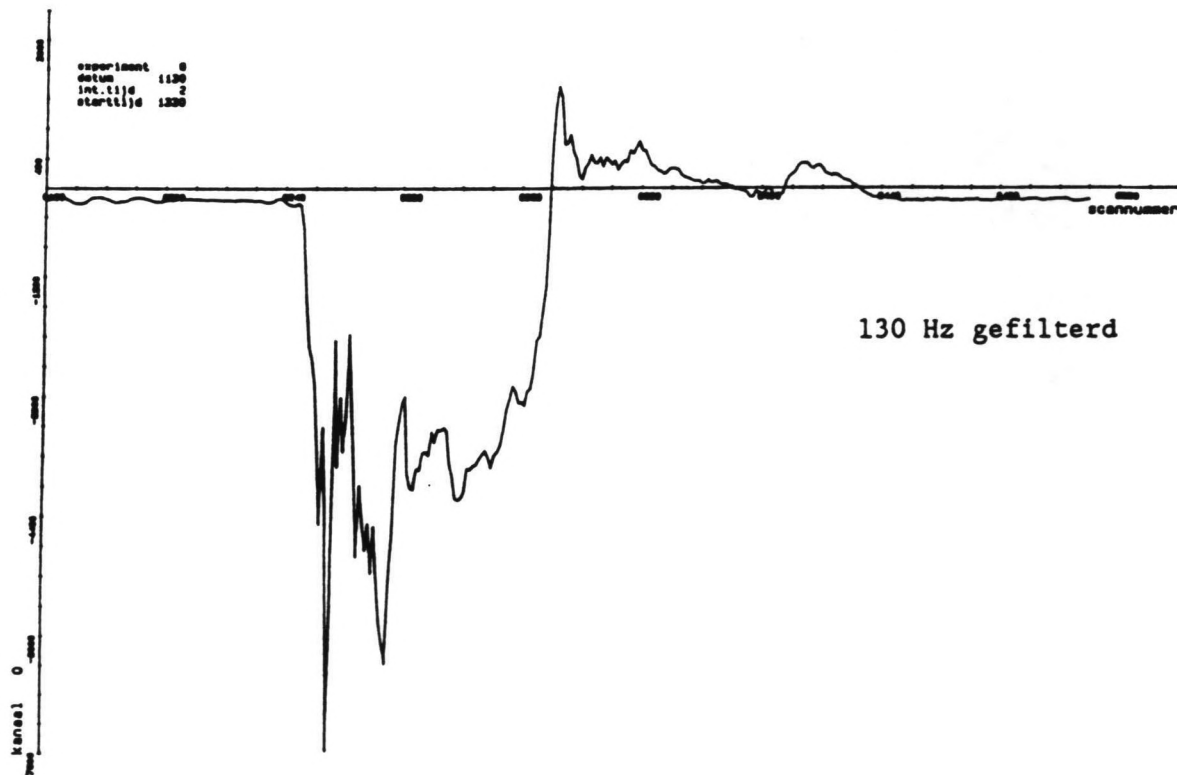
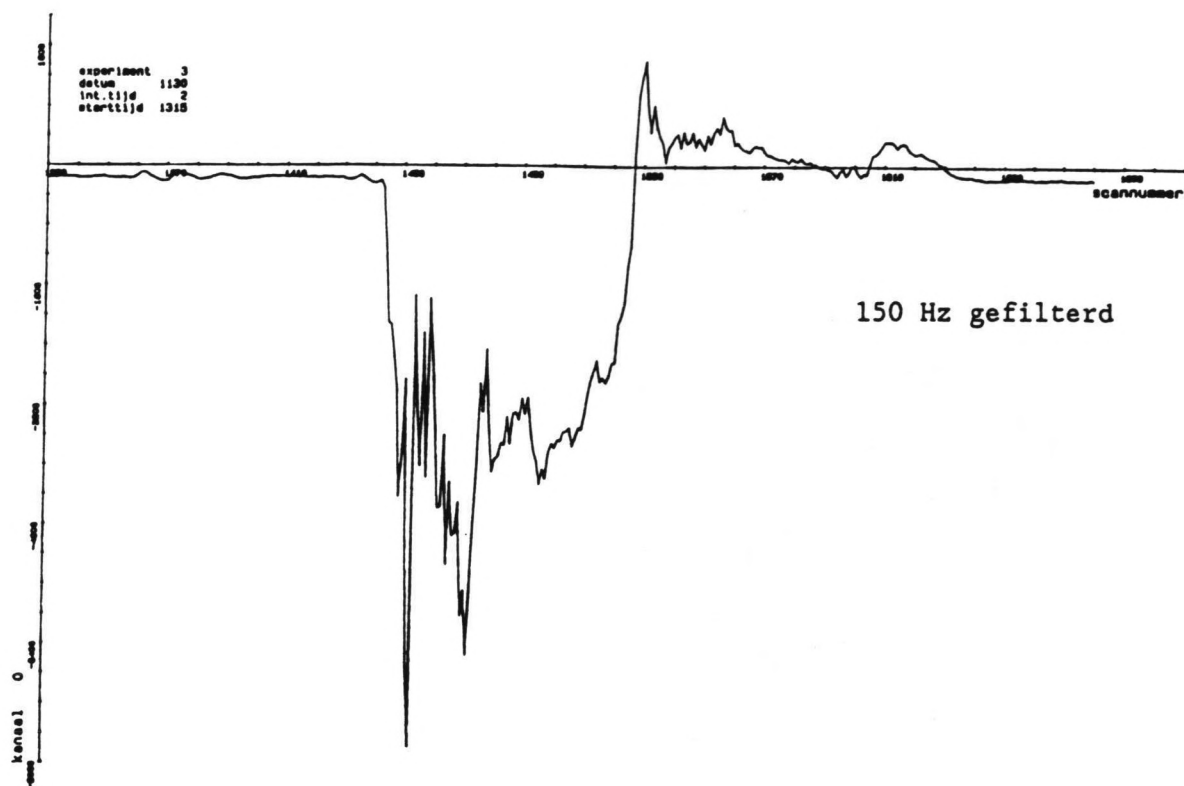
- Het beschouwen van de verschillen in kansverdelingen van de hoogte van de krachtpieken bij de diverse filterfrequenties (fig. 6.3). Voor uitleg van het begrip kansverdeling en de bijbehorende grafiek wordt naar paragraaf 6.4.2 verwezen.
- Het beschouwen van de verschillen tussen de hoogte van een krachtpiek van eenzelfde golfklap bij de diverse filterfrequenties (fig. 6.4).

Het signaal is gefilterd bij 100 Hz, 130 Hz, 150 Hz en 170 Hz. Uit fig. 6.3 blijkt dat het filteren enige invloed heeft op de cumulatieve kansverdelingen. Immers de helling van de lijnen neemt toe naarmate de filterfrequentie toeneemt. De C-waarde stijgt van 1.28 in de ongefilterde situatie tot 1.35 bij een filterfrequentie van 130 Hz.

Uit fig. 6.4 blijkt duidelijk dat voor de individuele golfklappen de versterking aanzienlijk is en dus filteren van het krachtsignaal onontbeerlijk is. Bij de keuze van de filterfrequentie is gelet op de aanwezigheid van de resonantiefrequentie in het signaal en op de mate waarin, door het filteren, het golfkrachtmaximum wordt gedempt in vergelijking met het ongefilterde signaal. De resonantiefrequentie moet zo min mogelijk in het sig-

naal te zien zijn, terwijl het golfkrachtmaximum niet te veel mag worden gedempt. Uiteindelijk is voor een filterfrequentie van 130 Hz gekozen.





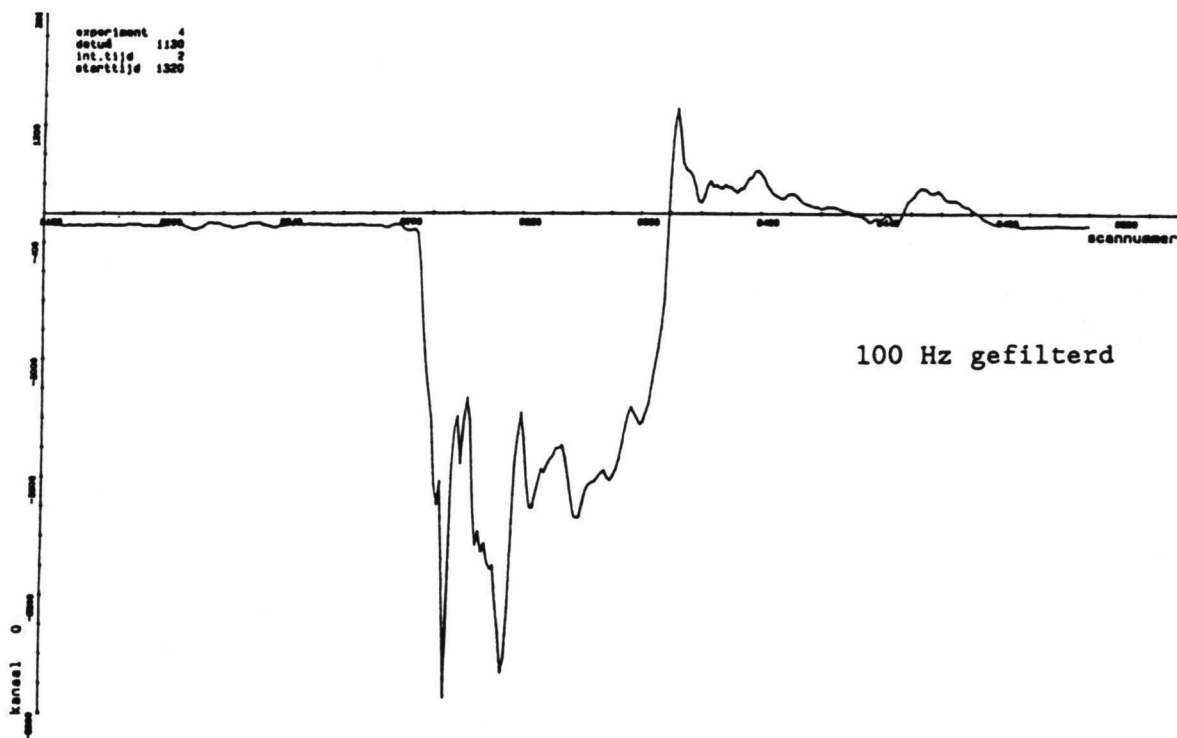


fig. 6.4

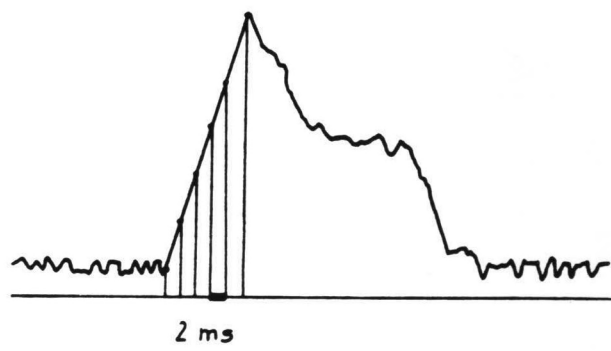


fig. 6.5

6.2 Bemonsteringstijd

Omdat het signaal digitaal wordt verwerkt, moet het worden bemonsterd. Om een geschikte keuze van het bemonsteringsinterval te maken, is van de volgende redenering uitgegaan.

De golfklappen, die optreden wanneer een golf juist tegen de meetring breekt, zijn maatgevend voor de keuze van het bemonsteringsinterval. De groeitijd bedraagt ongeveer 10 ms. Om zo'n golfklap te kunnen reproduceren, zijn minimaal 5 monsters nodig, daar bij een lager aantal monsters de kans te groot is, dat een maximum wordt gemist (fig. 6.5). Immers het zal maar zelden voorkomen, dat wanneer de maximale waarde van de golfklap optreedt, juist een monster zal worden genomen als het bemonsteringsinterval groter is dan 2 ms. Wanneer nu een hoge bemonsteringsfrequentie zal worden gekozen, zal het verschil tussen de optredende maximale waarde en de waarde van het monster minimaal worden.

Echter de bemonsteringsfrequentie kan niet ongelimiteerd worden verhoogd, omdat er dan praktische problemen gaan optreden. Wanneer de bemonsteringstijd met een factor twee wordt verkleind, krijgt men twee maal zoveel data, die allemaal in het buffer van de laboratoriumcomputer moeten worden opgeslagen. Het buffer raakt dan te snel vol, zodat het buffer vaker moet worden geleegd. Dit levert dus een beperking voor het bemonsteringsinterval op.

Uiteindelijk is gekozen voor een bemonsteringsfrequentie van 500 Hz. Er wordt dus om de 2 ms een monster genomen.

6.3 De meetduur van een experiment

Om een redelijke statistische betrouwbaarheid van de verdelingen te krijgen, is gekozen voor een meetduur van 10 minuten. Er worden dan ongeveer 400 krachten geregistreerd, wat een redelijk aantal is om een betrouwbare

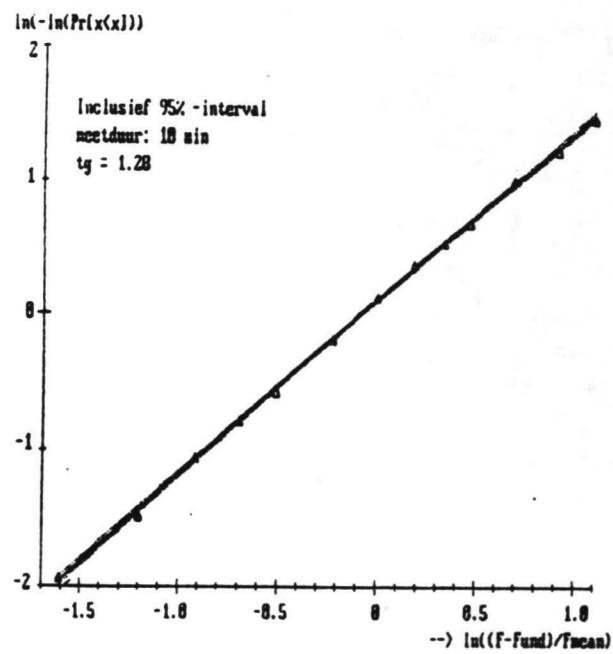
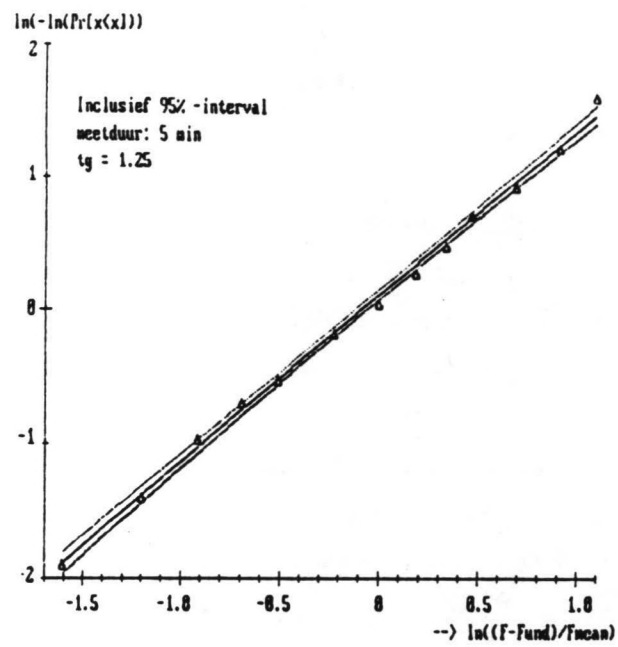


fig. 6.6

verdeling te kunnen maken. Om één en ander aannemelijk te maken is het volgende experiment uitgevoerd.

Bij eenzelfde signaal is gekeken naar het verschil in de spreiding van de meetwaarden bij een meetduur van 5 en 10 minuten (fig. 6.6). Geconcludeerd kan worden dat de spreiding bij een experiment met een meetduur van 10 minuten aanzienlijk kleiner is dan de spreiding bij een experiment met een meetduur van 5 minuten.

Bij een bemonsteringsfrequentie van 500 Hz kunnen twee metingen van ieder 10 minuten worden uitgevoerd alvorens het buffer van de laboratoriumcomputer moet worden geleegd.

6.4 Statistische bewerkingen

6.4.1 Definitie golfkrachtmaximum

Het verwerken van de meetgegevens gebeurt met in FORTRAN-77 geschreven computerprogramma's. Het doel van de programma's is het destilleren van maxima uit het krachtensignaal en het berekenen van onderschrijdingspercentages behorend bij een willekeurig in te voeren kracht.

Er zijn drie programma's geschreven, te weten:

- BWAVES: voor het analyseren van metingen op stilwaterniveau (MWL) en daarboven (+2,5 cm en +1,5 cm),
- OWAVES: voor het analyseren van metingen onder stilwaterniveau (-2,5 cm en -1,5 cm),
- BODEM: voor het analyseren van metingen 2,5 cm boven het talud.

Het programma BWAVES is gebaseerd op het principe dat wanneer de meetring zich onderwater bevindt, er krachten op de meetring worden uitgeoefend. Door de positie van de meetring t.o.v. stilwaterniveau te bepalen en in het programma in te voeren, kunnen de tijdsintervallen worden bepaald, waarin er krachten door een passerende golf op de meetring worden uitgeoefend. Het

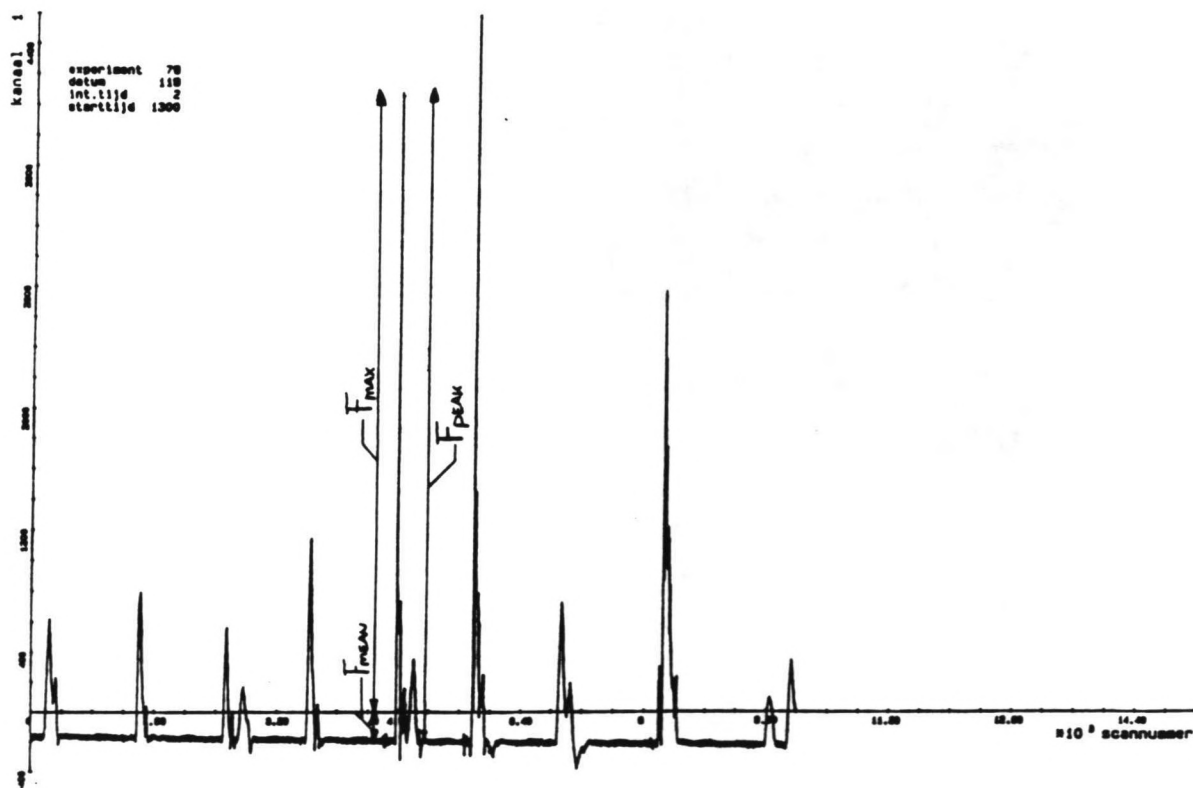
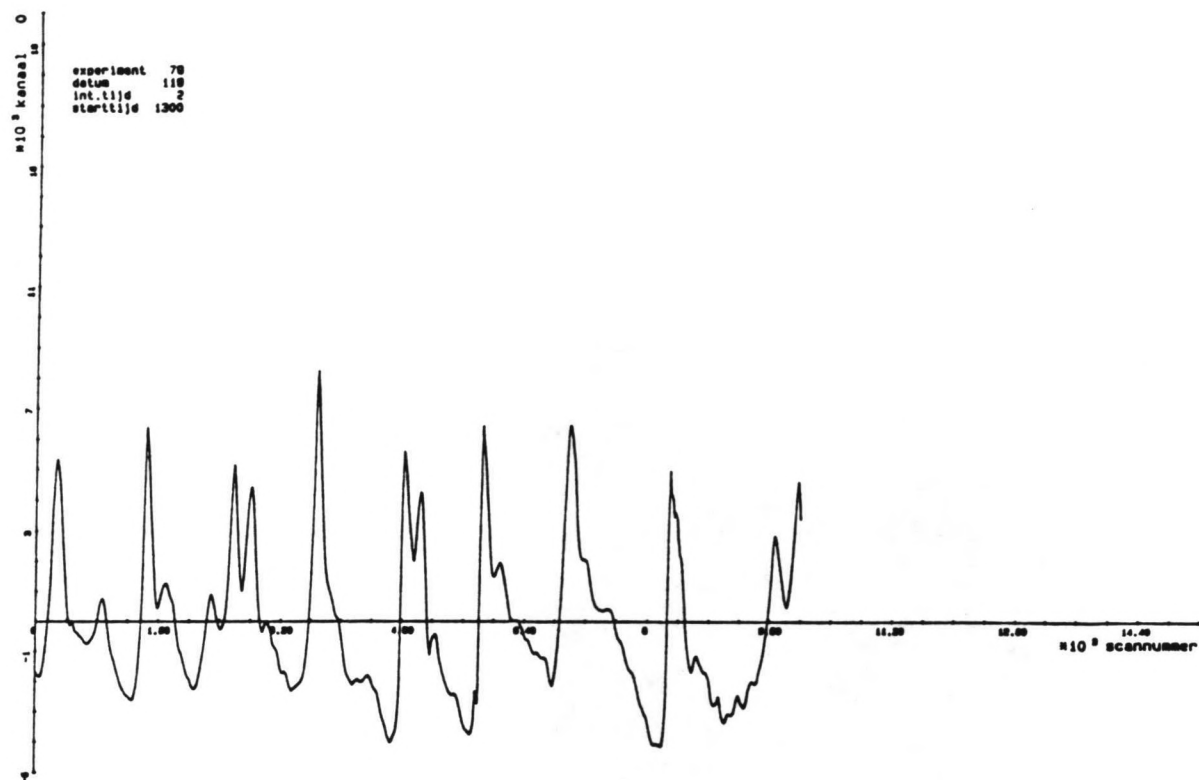


fig. 6.7

bepalen van de tijdsintervallen geschiedt m.b.v. het golfhoogtesignaal. In ieder interval wordt vervolgens de maximale golfkracht opgezocht en onthouden in een array. Daarna wordt de array gereduceerd door maxima kleiner dan een vooraf in te voeren ondergrens uit de array te verwijderen. Ook worden de maxima (FMAX) gecorrigeerd met de offset van het krachtensignaal, in de grafiek aangeduid met FMEAN. Na correctie zijn de nu verkregen maxima (FPEAK) gedefinieerd als de golfkrachtmaxima. De laatste fase is het berekenen van de onderschrijdingspercentages en enkele statistische parameters zoals de gemiddelde en significante golfkracht. In figuur 6.7 staan een simultaan gemeten golfhoogte- en golfkrachtssignaal afgebeeld.

De programma's OWAVES en BODEM maken van een ander principe gebruik. Deze programma's destilleren uit het golfhoogtesignaal m.b.v. de 'zero-up-crossing' methode eerst het tijdstip waarop de minimale waarde van een golfdal optreedt en vervolgens het tijdstip waarop de maximale waarde van de daaropvolgende golftop optreedt. In dit tijdsinterval wordt de maximale golfkracht gezocht en in een array onthouden. Het vervolg van de programma's is in grote lijnen identiek aan het programma BWAVES.

Voor source-listingen en een detailistische bespreking van de programma's wordt verwezen naar de bijlagen.

Tot slot nog een laatste opmerking. Van bovenstaande principes kan gebruik worden gemaakt, omdat de golfhoogtemeter op één lijn staat met de meetcylinder. Het golfhoogtesignaal wordt dus gelijktijdig met het golfkrachtssignaal gemeten.

6.4.2 De cumulatieve kansverdelingsfunctie

Een cumulatieve kansverdelingsfunctie van een stochastische variabele is een functie, die de kans weergeeft dat de stochastische variabele een bepaalde waarde onderschrijft.

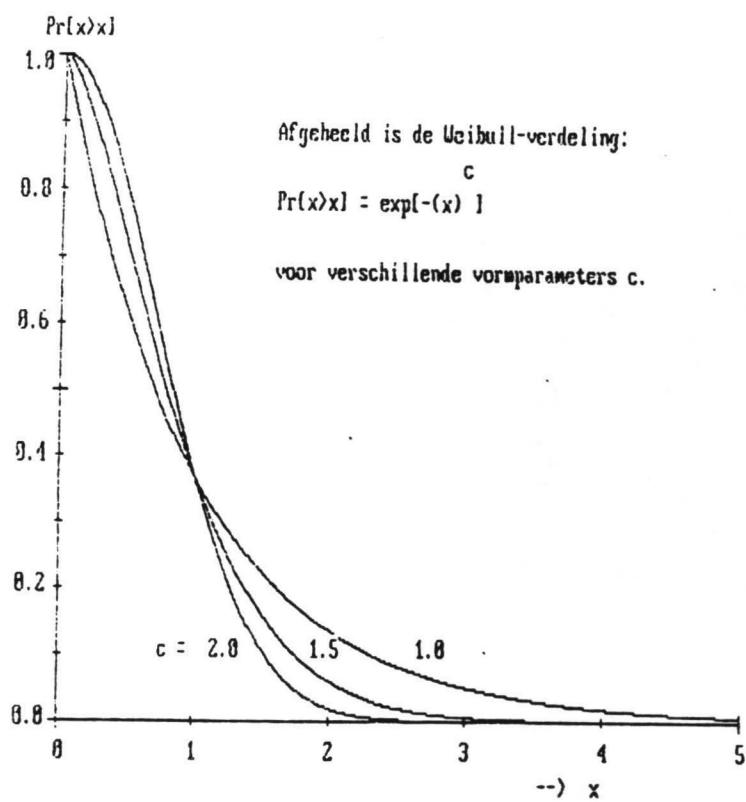


fig. 6.8

In dit onderzoek wordt de kansverdelingsfunctie van de in de paragraaf 6.4.1 gedefinieerde maxima van de optredende golfkrachten gezocht. Omdat het hier gaat om maxima van golfkrachten, is de kansverdelingsfunctie een zogenaamde extreme-waarden-verdeling.

Uit de theorie is bekend dat er maar drie verschillende extreme-waarden-verdelingen mogelijk zijn: de Gumbel-verdeling, de Frechet-verdeling en de Weibull-verdeling. Het belangrijkste verschil tussen de drie typen verdelingen zit in het gebied waarop de verdelingen zijn gedefinieerd. Het eerste type is van $-\infty$ tot $+\infty$ gedefinieerd, het tweede type van $-\infty$ tot nul en heeft dus een bovengrens en het derde type tenslotte is van nul tot $+\infty$ gedefinieerd en heeft een ondergrens.

Het ligt voor de hand dat in dit onderzoek het derde type, de Weibull-verdeling, het best bij de maxima van de golfkrachten past, omdat de fysische betekenis van de ondergrens bij het proces evident is. De golfkrachten kunnen namelijk per definitie niet kleiner dan nul worden. Vandaar dat de Weibull-verdeling eerst aan de gemeten waarden is getoetst.

De algemene vergelijking van de Weibull-verdeling ziet er als volgt uit:

$$\Pr[X \leq x] = 1 - \exp\left(-\left[\frac{x-A}{B}\right]^C\right)$$

met A - drempelparameter

B - schaalparameter

C - vormparameter

x - stochastische variabele

In figuur 6.8 is de invloed van de vormparameter op de Weibull-verdeling weergegeven. Als $C=2$ hebben we te maken met een Rayleigh-verdeling en als $C=1$ hebben we te maken met een exponentiële verdeling.

Om een Weibull-verdeling als een rechte uit te kunnen zetten, moeten de assen als volgt worden gedefinieerd:

$$\Pr[\underline{x} > x] = 1 - \Pr[\underline{x} \leq x]$$

$$\ln(\Pr[\underline{x} > x]) = - \left[\frac{x-A}{B} \right]^C$$

$$\ln(-\ln(\Pr[\underline{x} > x])) = C \cdot \ln \left[\frac{x-A}{B} \right]$$

hierbij wordt nu gekozen: x-as : $\ln \left[\frac{x-A}{B} \right]$

y-as : $\ln(-\ln(\Pr[\underline{x} > x]))$

De Weibull-verdeling verschijnt nu als een rechte op papier en heeft de volgende vorm:

$$y = C \cdot \frac{x-A}{B}$$

De vormparameter C geeft dus de richtingscoëfficiënt van de lijn aan en kan eenvoudig uit de grafiek worden afgelezen.

De drempelwaarde A ligt niet eenduidig vast. Hiervoor is in eerste instantie 0,05 N gekozen, wat een redelijke schatting bleek. Bij de meeste experimenten lagen de berekende onderschrijdingspercentages, uitgezet op Weibull-papier, redelijk op een rechte lijn. Het kwam echter wel eens voor dat de verdeling aan de onderzijde een sterke kromming vertoonde. Door nu de drempelwaarde enigszins aan te passen, verdween de kromming grotendeels en werd toch een rechte lijn verkregen. Uiteindelijk lag de drempelwaarde A in het interval 0,04-0,06 N (15-20% van het gemiddelde van de golfkrachtmaxima). Voor de experimenten aan de bodem is de drempelwaarde gelijk aan nul gesteld.

Het verschil in keuze tussen de drempelwaarde bij de experimenten rond stilwaterniveau en die bij de bodem is als volgt aannemelijk te maken.

Bij de proeven rond stilwaterniveau zijn vijf tot tien procent van alle krachten kleiner dan de drempelwaarde. Dit komt, omdat bij een kleine schommeling van het wateroppervlak rond de meetring ook een golfkracht wordt geregistreerd, terwijl deze schommeling niet als een golf wordt aangemerkt. Vandaar dat de golfkrachtenmaxima lager dan de drempelwaarde niet in de beschouwing worden opgenomen. Bij de proeven nabij de taludbodem is de drempelwaarde A gelijk aan nul gesteld.

Voor de schaalparameter B is het gemiddelde van de geregistreeerde krachtpieken, F_{mean} , genomen. Dit is in overeenstemming met het werk van Van Koushoven.

Voor elk experiment zijn met de programma's BWAVES, OWAVES en BODEM (par. 6.4.1 en de bijlagen) voor verschillende waarden van de krachtparameter $(F-Fund)/F_{mean}$ met

F - willekeurig in het programma in te voeren kracht

F_{fund} - ondergrens van de krachtmaxima

F_{mean} - gemiddelde van alle geregistreeerde krachtmaxima

de bijbehorende onderschrijdingspercentages berekend. Met het programma RRGRAPH zijn de coördinatenparen geplot, waarna met regressie-analyse door de punten een rechte is berekend. Tevens is een 95%-betrouwbaarheidsinterval berekend en in de grafiek geplot. Al deze bewerkingen zijn met het programma RRGRAPH uitgevoerd.

Het 95%-betrouwbaarheidsinterval geeft het interval weer waarin de regressie-lijn met een betrouwbaarheid van 95% ligt. Hoe smaller het interval des te beter de lijn het verloop van de coördinatenparen benaderd.

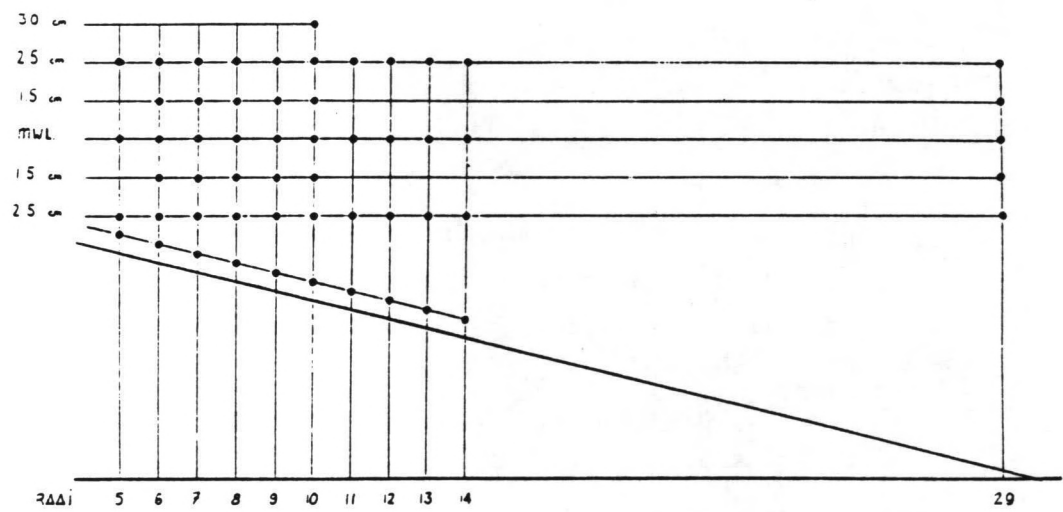


fig. 7.1

HOOFDSTUK 7 MEETPROGRAMMA

Het doel van dit onderzoek is de golfkrachten vooral rond stilwaterniveau in de brandingszone te meten. Ook is in een raai in diep water gemeten om één en ander met elkaar te kunnen vergelijken.

In figuur 7.1 is een overzicht gegeven van de meetpunten. Hieronder volgt een toelichting op de figuur.

In het gebied waar de meeste golven breken en de grootste golfklappen te verwachten zijn, raainummer 6 ($d/H=3,88$) tot en met 10 ($d/H=5,03$), is op vijf verschillende niveaus gemeten: -2,5 cm MWL, -1,5 cm MWL, MWL, +1,5 cm MWL en +2,5 cm MWL. Ook op diep water is op deze niveaus gemeten om een goede vergelijking mogelijk te maken. In de overige raaien is op drie niveaus gemeten: +2,5 cm MWL, MWL en +2,5 cm MWL.

Om bij eerder onderzoek aan te sluiten, is ook nog op ongeveer 2,5 cm boven het talud gemeten met uitzondering van raai 29 in diep water.

Verder dan raai 5 kon niet worden gemeten, daar anders de golfhoogtemeter niet diep genoeg onder water stak. De golfhoogtemeter moet namelijk onder alle omstandigheden minimaal 4 à 5 cm onderwater blijven in verband met de nauwkeurigheid waarmee de golfhoogte wordt geregistreerd.

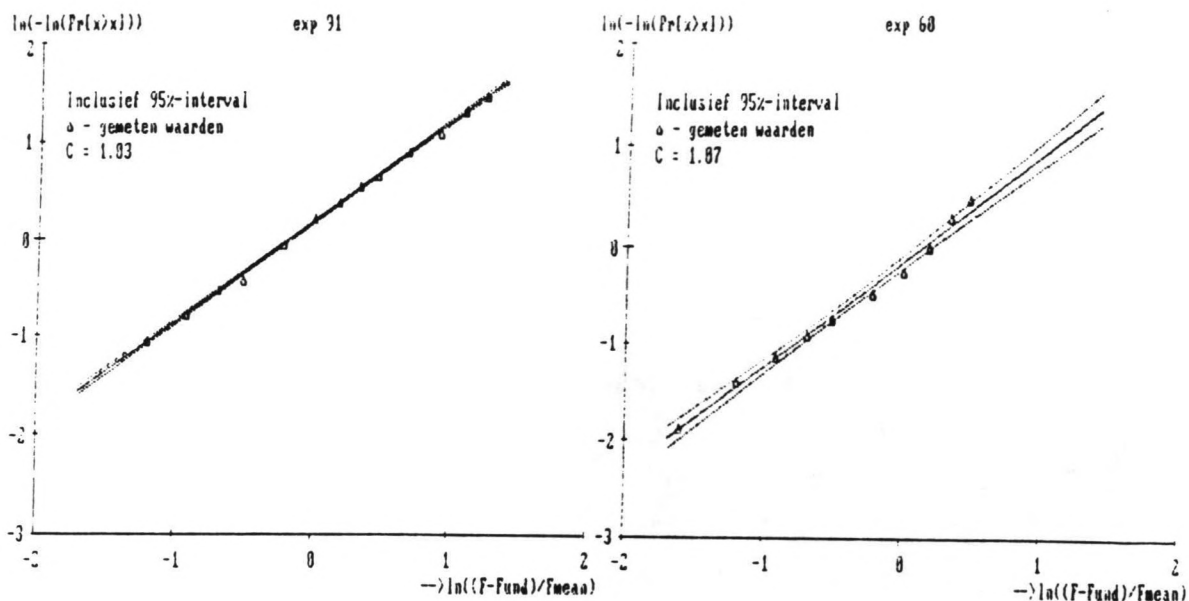


fig. 8.1

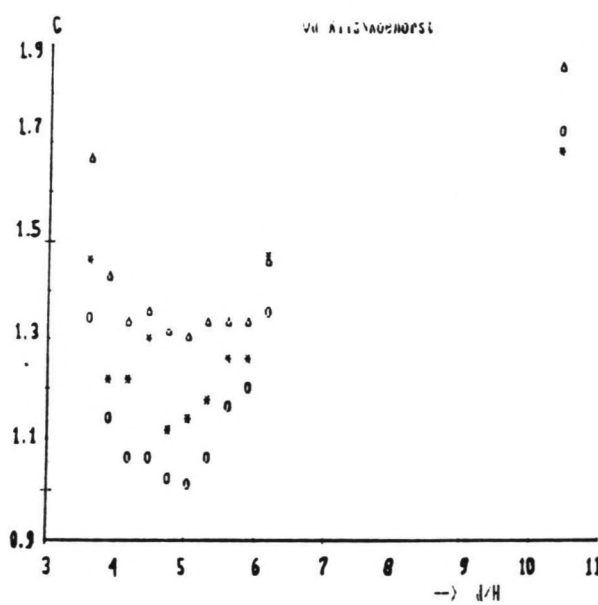


fig. 8.3

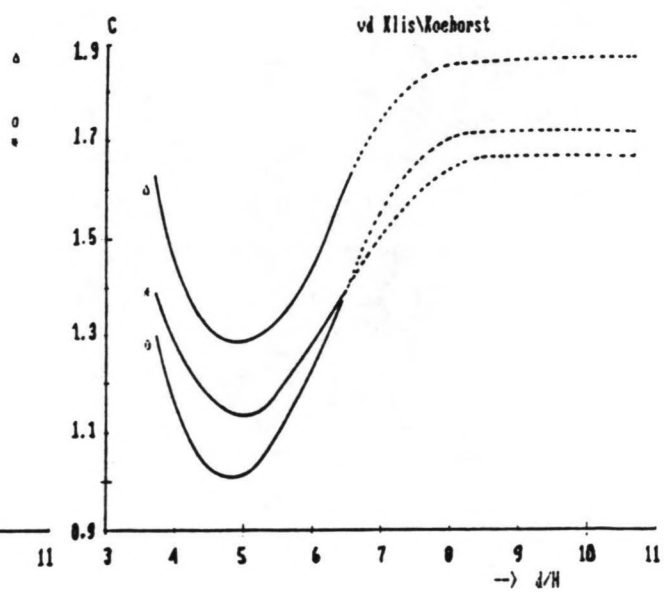


fig. 8.4

HOOFDSTUK 8 BESPREKING VAN DE RESULTATEN

8.1 Cumulatieve kansverdelingsfunctie

In figuur 8.1 zijn twee Weibull-verdelingen afgebeeld: in het linker diagram staat de verdeling met het smalste 95%-betrouwbaarheidsinterval en in de rechter grafiek de verdeling met het breedste interval. Geconcludeerd kan worden dat de Weibull-verdeling redelijk goed het proces beschrijft.

[illegible]**tabel 8.2**

Voor elk experiment is met het programma RRGGRAPH de vormparameter C bepaald (tabel 8.2) en voor drie verschillende meetniveaus uitgezet als functie van de dimensieloze waterdiepte d/H (fig. 8.3) met

d - waterdiepte

H - gemiddelde golfhoogte op diep water.

De betekenis van de gebruikte symbolen is:

* - +2,5 cm MWL

Δ - MWL

o - -2,5 cm MWL

Ter ondersteuning is door de punten met behulp van regressie-analyse een vierde-graads-kromme berekend (fig. 8.4). Het blijkt dat voor elk niveau een

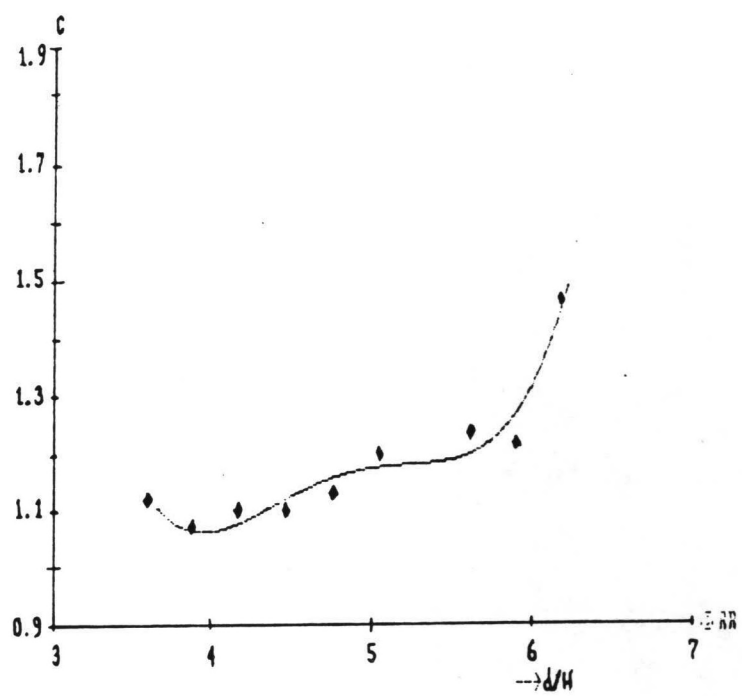


fig. 8.5

minimum optreedt op het punt waar de meeste golven breken (visueel bepaald). Omdat een lage vormparameter duidt op een grote spreiding, treedt in dit punt de grootste spreiding in golfkrachten op.

De grootste spreiding in golfkrachten in verticale zin treedt op bij het niveau 2,5 cm onder stilwaterniveau en de laagste spreiding 2,5 cm boven stilwaterniveau.

Ook de C-waarden die horen bij de krachten bij de bodem, vertonen een minimum, echter dit minimum ligt bij een lagere d/H-waarde (fig. 8.5).

8.2 Het verloop van de dimensieloze golfkracht

In de figuren 8.6 tot en met 8.9 is het verloop van de dimensieloze golfkracht langs het talud te zien. De golfkracht kan op verschillende manieren dimensieloos worden gemaakt. Eén manier is door de golfkracht te delen door $\rho g D H^2$. Een tweede manier is door te delen door $\rho g D^2 H$. Daar D en H van dezelfde orde van grootte zijn (6 cm), maakt het hier weinig verschil door welke van de twee termen wordt gedeeld; gekozen is voor de tweede manier, dus $\rho g D^2 H$.

In de eerste twee figuren is de dimensieloze golfkracht $F/\rho g D^2 H$ (in de grafieken aangeduid met F^*) tegen d/H uitgezet met:

- F - gemiddelde van de golfkrachtmaxima
- ρ - dichtheid van het water
- g - zwaartekrachtsversnelling
- D - diameter meetcilinder
- H - gemiddelde golfhoogte op diep water
- d - locale waterdiepte, gemeten t.o.v. stilwaterniveau

Ter ondersteuning van figuur 8.6 is in figuur 8.7 een vierde-graads-kromme door de punten getekend. Naarmate de waterdiepte afneemt, neemt de dimensieloze golfkracht F^* toe voor de drie getekende gevallen. Slechts in één

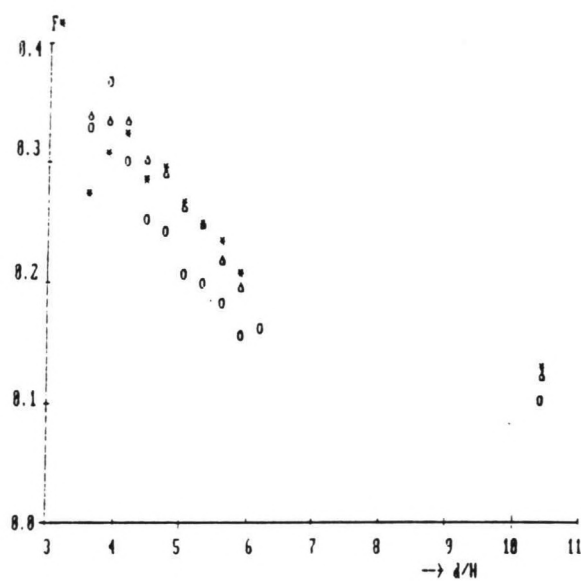


fig. 8.6

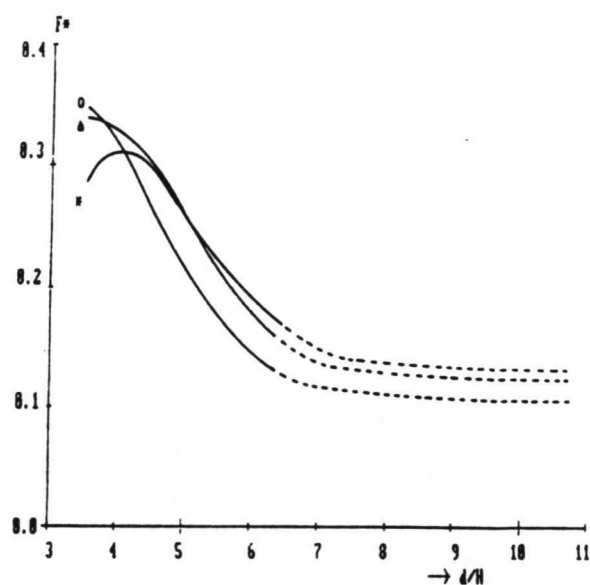


fig. 8.7

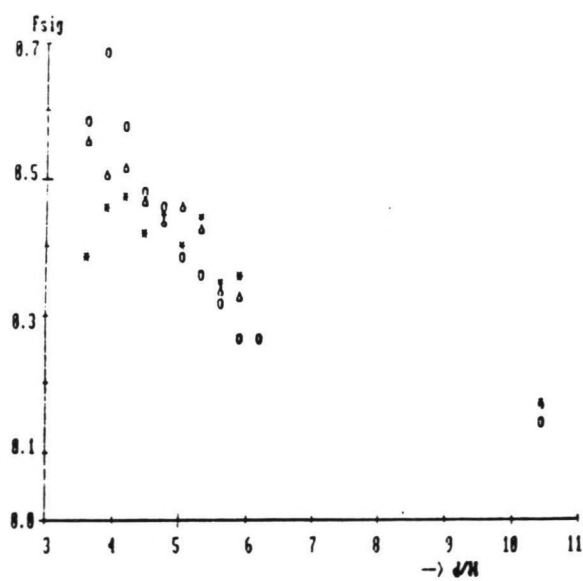


fig. 8.8

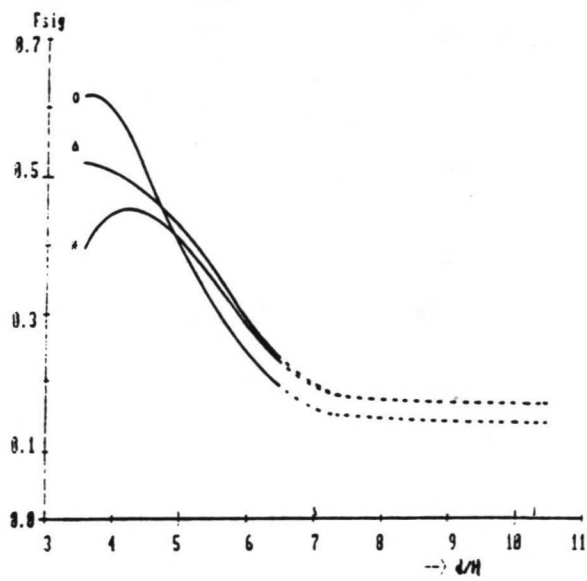


fig. 8.9

geval (2,5 cm boven stilwaterniveau) treedt een maximum in de grafiek op voor $d/H=4$. Voor waarden van d/H groter dan 7 zal de grafiek afvlakken naar de waarden voor de dimensieloze golfkracht op diep water.

Analoog aan de figuren 8.6 en 8.7 zijn voor de dimensieloze significante golfkracht $F_{sig}/\rho g D^2 H$ (in de grafieken aangeduid met F_{sig}) de figuren 8.8 en 8.9 gemaakt. Bij twee krommen (+2,5 cm en -2,5 cm) is een maximum voor de dimensieloze golfkracht waar te nemen, de bijbehorende d/H -waarden zijn respectievelijk 4,3 en 3,8.

Om het maximum van de grafieken, waar het maximum nog niet is af te lezen, te weten te komen, zou eigenlijk verder op het talud moeten worden gemeten. Dit leverde problemen op met de golfhoogtemeter, daar de golfhoogtemeter niet voldoende onder water stak. Om dit probleem te ondervangen zou in de helling een opening moeten worden gemaakt, waar doorheen de golfhoogtemeter kan steken.

Ook in het gebied tussen de brandingszone en diep water, $7 < d/H < 10$, zou een extra meting kunnen worden uitgevoerd, om het afvlakken van de grafiek duidelijker in beeld te kunnen brengen. In dit gebied zal de grafiek hoogstwaarschijnlijk zeer vlak lopen.

Door het maximum uit de figuren 8.7 en 8.9 af te lezen en te delen door de waarde van de dimensieloze golfkracht op diep water, wordt een verhoudingsgetal verkregen dat aangeeft op welke hoogte de versterking van de dimensieloze golfkracht t.o.v. diep water het grootst is. In onderstaande tabellen zijn de waarden verzameld.

niveau t.o.v. stilwater	$\frac{F_{max}}{F_{max, diep}}$
+ 2.5 cm	2.4
0 cm	2.8
- 2.5 cm	3.5

waarden bij fig. 8.7

niveau t.o.v. stilwater	$\frac{F_{max}}{F_{max, diep}}$
+ 2.5 cm	2.7
0 cm	3.3
- 2.5 cm	4.4

waarden bij fig. 8.9

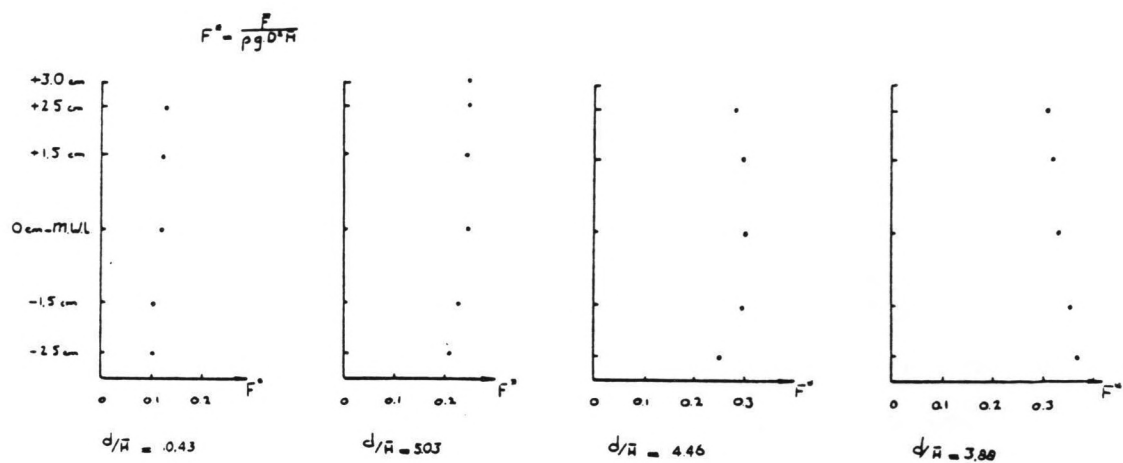


fig. 8.10

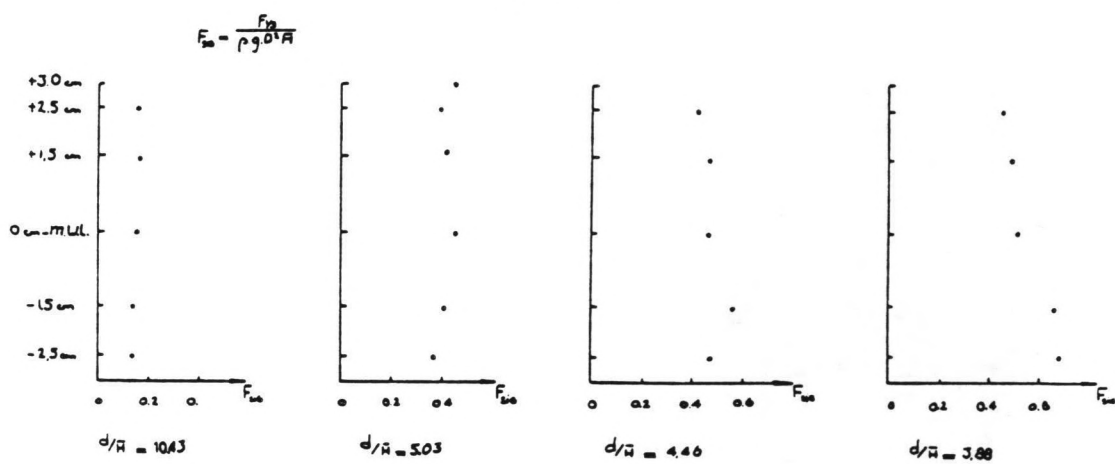


fig. 8.11

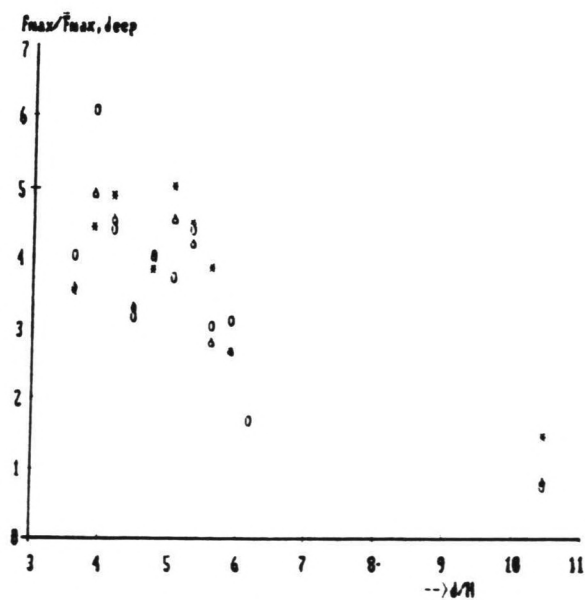


fig. 8.12

Bij deze tabel dient te worden opgemerkt dat sommige waarden vermeld in bovenstaande tabel enigszins kunnen veranderen, daar het maximum niet direct uit de grafiek kan worden afgelezen. Door de grafiek te extrapoleren kan het maximum worden geschat.

Het blijkt dat onderwater, op -2.5 cm, het verhoudingsgetal de grootste waarde bereikt. Blijkbaar is het zo dat niet het overslaande deel van de brekende golf de grootste kracht levert, maar dat deel van de golf dat de grootste massa heeft.

Tot slot zijn de dimensieloze golfkrachten uitgezet tegen de hoogte waarop gemeten is in een bepaalde raai (fig. 8.10). Uit deze figuur blijkt dat de golfkracht toeneemt gezien van diep naar ondiep water en dat de waarden van de gemeten golfkracht onder stilwaterniveau nu groter worden dan op de overige niveaus.

Eenzelfde figuur (fig. 8.11) is gemaakt voor de dimensieloze significante golfkracht i.p.v. de dimensieloze gemiddelde golfkracht. Het bovenbeschreven effect is nu duidelijker waar te nemen.

8.3 Golfkracht in ondiep water versus golfkracht in diep water

In deze paragraaf zijn de maximale golfkracht in een experiment in ondiep water (in figuur 8.12 aangeduid met $F_{\max}$) vergeleken met de maximale golfkracht uit een experiment in diep water ($F_{\max, \text{diep}}$). Uit figuur 8.12 blijkt dat de verhouding $F_{\max, \text{ondiep}} / F_{\max, \text{diep}}$ water tussen de 3 en 5 ligt. Wang heeft in eerder onderzoek (1987) met een regelmatig golfveld soortgelijke waarden gevonden.

In figuur 8.12 zijn alle verhoudingsgetallen verzameld.

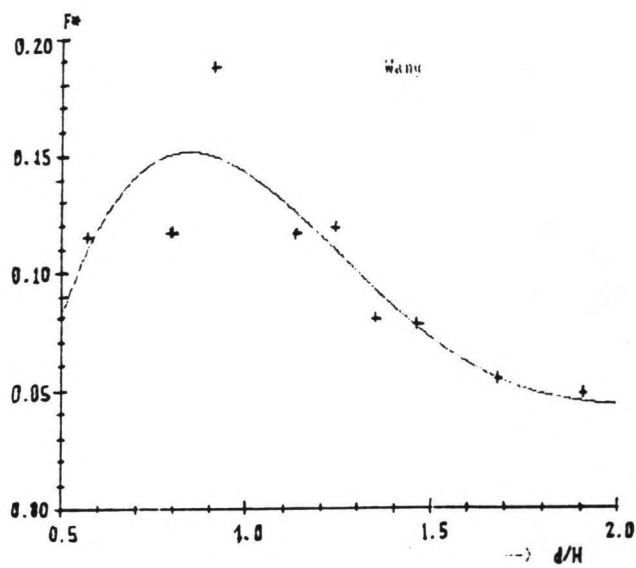


fig. 9.1

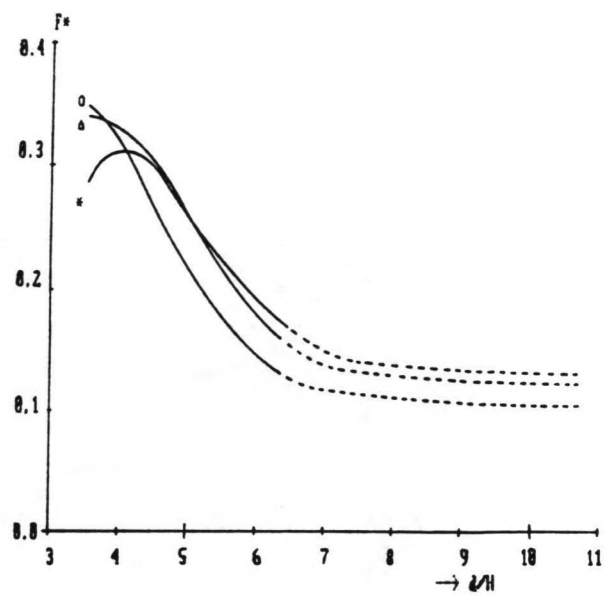


fig. 9.2

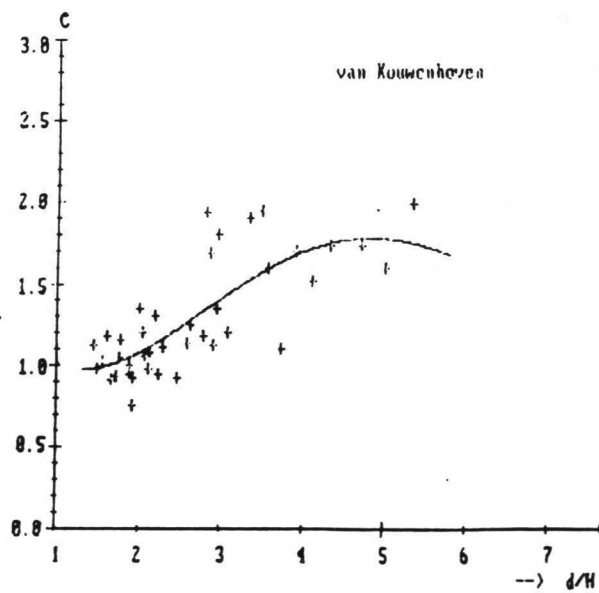


fig. 9.3

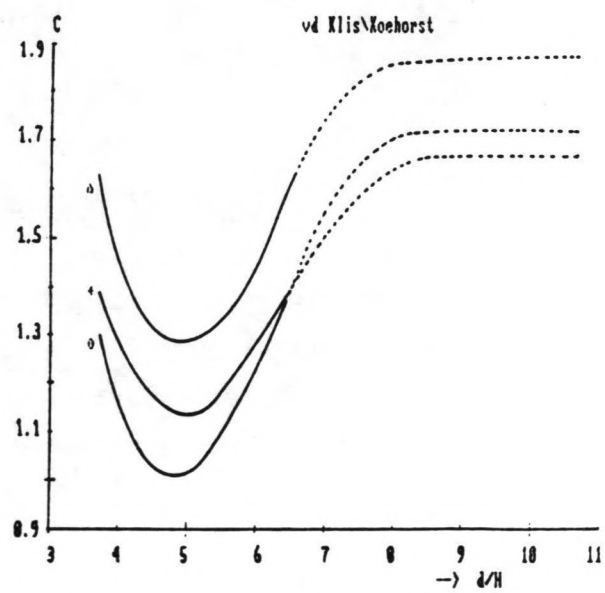


fig. 9.4

Hoofdstuk 9 Vergelijking met Wang en Van Kouwenhoven

Tot slot zullen de in dit onderzoek gevonden resultaten worden vergeleken met het onderzoek uitgevoerd door Wang (1987) en Van Kouwenhoven (1986).

In figuur 9.1 staat de dimensieloze golfkracht, $F/\rho g D^2 H$ (in de figuur aangeduid met F^*), tegen de dimensieloze waterdiepte uitgezet, zoals deze door Wang is gevonden. De grafiek vertoont hetzelfde gedrag als figuur 9.2., waarin de resultaten van figuur 8.7 nog eens zijn weergegeven. Duidelijk is waar te nemen dat de dimensieloze gemiddelde golfkracht bij regelmatige golven lager ligt dan bij onregelmatige golven (fig. 9.2). Verder is uit de grafieken af te lezen dat de maximale waarde van de gemiddelde golfkracht bij onregelmatige golven in relatief dieper water optreedt dan bij regelmatige golven.

Tot slot nog een laatste opmerking. Wang heeft met dezelfde meetcylinder, zoals beschreven in paragraaf 4.1, gemeten, echter met dit verschil dat de meetcylinder niet afdoende waterdicht was afgesloten. Dit zou één van de verklaringen kunnen zijn voor de lagere waarden van de dimensieloze golfkracht.

In figuur 9.3 staat de vormparameter C uitgezet tegen de dimensieloze waterdiepte, zoals deze door Van Kouwenhoven is gevonden. Wanneer deze grafiek met figuur 9.4 wordt vergeleken, dan blijkt dat de twee grafieken weinig gemeenschappelijk hebben. Dit is als volgt te verklaren:

- Bij het onderzoek, verricht door Van Kouwenhoven, is gemeten op hoogten evenwijdig aan het talud in de diverse raaien, terwijl in deze studie op hoogten evenwijdig aan het stilwaterniveau is gemeten.
- Van Kouwenhoven heeft geen onderscheid gemaakt, bij het in de grafiek plaatsen van de verschillende C -waarden, tussen de verschillende hoogten waarop is gemeten.
- De eigenfrequentie van het meetelement, gebruikt door Van Kouwenhoven, was vele malen lager dan de eigenfrequentie van de meetcylinder ge-

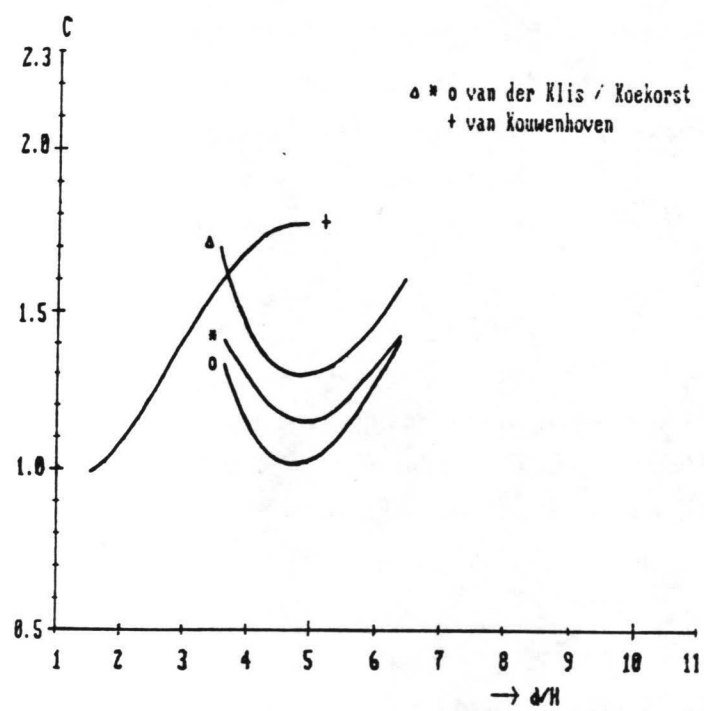


fig. 9.5

bruikt in dit onderzoek (50 Hz tegen 190 Hz), met als gevolg dat bij het onderzoek van Van Kouwenhoven de krachtpieken niet goed konden worden geregistreerd.

- De keuze van de bemonsteringsfrequentie was bij Van Kouwenhoven lager uitgevallen dan in dit onderzoek (50 Hz tegen 500 Hz); de kans dat een krachtpiek wordt gemist, is dan ook groot (zie verklaring 6.2).

Door de lage eigenfrequentie van het meetelement en de lage bemonsteringsfrequentie vond Van Kouwenhoven naarmate hij dichterbij stilwaterniveau mat, een verdeling die meer en meer afweek van de Weibull-verdeling. Op Weibull-papier zag dit eruit als een hyperbool. Het is dus onverantwoord om deze meetwaarden met een Weibull-verdeling te benaderen. De C-waarden die in het gebied rond stilwaterniveau zijn verkregen, zijn dus zeer onbetrouwbaar. Dit is de aanleiding geweest om een vervolgonderzoek met een beter meetelement te starten; dit om de werkelijke extreme-waarden-verdeling van de golfkrachtmaxima rond stilwaterniveau te vinden.

In figuur 9.5 tenslotte zijn de twee figuren in een grafiek ondergebracht.

HOOFDSTUK 10 CONCLUSIES

De hier besproken conclusies hebben betrekking op het meetgebied:

$$3,6 < d/H < 10,43$$

- De kansverdeling van de golfkrachtmaxima in een onregelmatig golfveld met brekende golven kan goed worden beschreven met de Weibull-verdeling.
- De vormparameter C van de Weibull-verdeling hangt af van de parameter d/H alsmede van het meetniveau t.o.v. stilwater. In het gebied waar de meeste golven breken ($d/H=5$), bereikt de C-waarde voor ieder meetniveau een minimum.

De gevonden C-waarden liggen in de volgende intervallen:

-2,5 cm MWL:	$1,02 < C < 1,36$	diep water:	$C=1,73$
	MWL: $1,31 < C < 1,67$	diep water:	$C=1,86$
+2,5 cm MWL:	$1,12 < C < 1,47$	diep water:	$C=1,68$

- Zowel de dimensieloze, gemiddelde als de significante golfkracht nemen toe naarmate men in ondieper water komt en bereiken voor sommige meetniveaus een maximum. De overige meetniveaus laten nog net geen maximum zien.

Wanneer de verhouding wordt bepaald tussen een (geschat) maximum en de dimensieloze golfkracht op diep water voor de drie verschillende meetniveaus, dan levert het verhoudingsgetal voor het meetniveau op -2,5 cm MWL de grootste waarde op.

- De verhouding tussen de maximale, geregistreeerde golfkracht in een experiment in ondiep water en de maximale, geregistreeerde golfkracht uit een experiment in diep water ligt tussen de waarden 3 en 5.

APPENDIX 1: PARAMETERLIJST

A	- drempelwaarde in Weibull-verdeling
B	- schaalparameter in Weibull-verdeling
b	- wrijving
β	- frequentieparameter
C	- constante
C	- vormparameter in Weibull-verdeling
C_d	- drag-coëfficiënt in de Morison-vergelijking
C_m	- traagheidscoëfficiënt in de Morison-vergelijking
c	- compliantie
c	- voortplantingssnelheid van een golf
D	- diameter meetring
d	- waterdiepte t.o.v. stilwaterniveau
F	- kracht
$\hat{F}$	- amplitude van een kracht
F*	- golfkracht volgens de theorie berekend
F*	- dimensieloze gemiddelde golfkracht
F _{gem}	- gemiddelde golfkracht
F _{sig}	- significante golfkracht
F _{sig}	- dimensieloze significante golfkracht
F _{und}	- ondergrens golfkracht
f	- frequentie (in Hz)
ϕ	- fase
g	- zwaartekrachtsversnelling
H	- gemiddelde golfhoogte
H _{sig}	- significante golfhoogte
h	- waterdiepte
i	- complex getal
K	- Keulegan-Carpenter getal
k	- veerconstante
L	- golflengte in diep water
M	- moment
m	- massa

Pr	- kans
Re	- Reynolds getal
ρ	- dichtheid van water
T	- trillingstijd
T	- golfperiode
t	- tijd
τ	- tijd
θ	- dempingsgetal
U	- watersnelheid in Keulegan-Carpenter getal
u	- locale watersnelheid
$\hat{u}$	- amplitude van de snelheid
u^*	- watersnelheid berekend volgens de korte-golftheorie
X	- overdrachtfactor
x	- verplaatsing
x	- waarde op de x-as
$\underline{x}$	- stochastische variabele
y	- waarde op de y-as
ω	- frequentie (in rad/s)
ω_e	- eigenfrequentie in geval met wrijving
ω_0	- eigenfrequentie in geval zonder wrijving

APPENDIX 2: LITERATUURLIJST

- Apelt, T. and P. Baddiley 1981,
Breaking wave forces on vertical cylinders,
Proc. 5th Australian conf. on coastal and ocean engineering, pp 85-89.
- Apelt, C.J. and J. Piorewicz 1987,
Laboratory studies of breaking wave forces acting on vertical cylinders in shallow water,
Coastal engineering 11 (1987) pag. 263-282.
- Chakrabarti, Subrata K. 1988,
Forces on vertical cylinder due to random waves,
Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean engineering,
vol. 114 no.3 may 1988 pp 267- 279.
- Easson, W.J. and C.A. Greated 1985,
Forces on structures due to deepwater breaking waves,
Proc. 4th int. conf. on behaviour of offshore structures (BOSS '85), pp 369-374.
- Honda, T. and H. Mitsuyasu 1974,
Experimental study of breaking wave force on a vertical cylinder,
Coastal engineering in Japan, vol. XVII, pp 59-70.
- Kjeldsen, S.P. and A.B. Akre 1985
Wave forces on vertical piles near the free surface caused by two-dimensional and three-dimensional breaking-waves,
Marintek, report no. 1.10.
- Kouwenhoven van, B.J. 1986,
Experimenteel onderzoek naar golfkrachten in onregelmatige, brekende golven in de brandingszone,
Afstudeerverslag, Civiele Techniek, TU Delft.

Ochi, M.K. and C.H. Tsai 1984

Prediction of impact pressure induced by breaking waves on vertical cylinders in random seas,

Applied ocean research, vol 6, no. 3, pp 157-162.

Sarpkaya, Turgut 1981,

Mechanics of wave forces on offshore constructions,

Van Nostrand Reinhold Company Inc.

Verbeek, P.H.J. and J.J.H. Brouwers 1985,

Long-term probability distributions and fatigue damage for Morison-type wave loading,

Proc. 4th int. conf. on behaviour of offshore structures (BOSS '85), pp 763-769.

Vledder van, G.Ph. 1983,

deel 3 Handleiding voor het gebruik van het computerprogramma WAVAN.

Afstudeerverslag, Civiele Techniek, TU Delft.

Wang Zeguang 1987,

An experimental study of wave forces on slope,

Afstudeerverslag, Civiele Techniek, TU Delft.

Collegedictaten

Battjes, J.A. 1985,

Korte golven,

collegedictaat b76.

Battjes, J.A. 1986,

Windgolven,

collegedictaat b78.

Bouma, A.L. en C. Esveld 1976,
Dynamica van constructies,
collegedictaat b9N.

Dijkman, M.W.J.W. 1984,
Algemene mechanica deel 2,
collegedictaat b8N.

Oorschot, van H.J.L. 1984,
Operationele- en risico-analyse,
collegedictaat a104.

Soest, van J. 1983,
Elementaire statistiek,
collegedictaat a92A DUM Delft.

Vrouwenvelder, A.C.W.M. en J.K. Vrijling 1984,
Probabilistisch ontwerpen,
collegedictaat b3.

