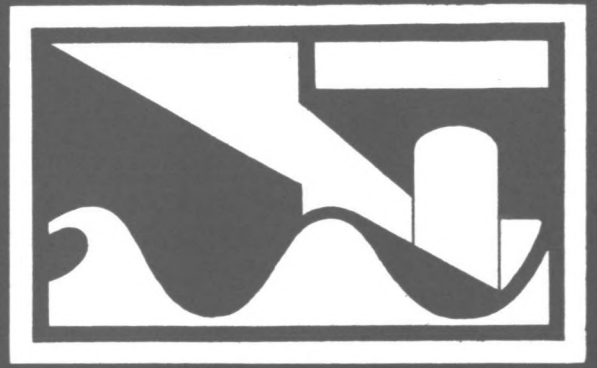


609



MODELPROEVEN TER BEPALING VAN DE INVLOED VAN  
LOODRECHT INVALLENDE GOLVEN OP BODEMWRIJVING  
VEROORZAAKT DOOR LANGSSTROMING

Afstudeerverslag van: R. van Leijen

M.J. van der Vlerk

Vakgroep Kustwaterbouwkunde  
Laboratorium voor Vloeistofmechanica  
Afdeling der Civiele Techniek  
Technische Hogeschool Delft

MODELPROEVEN TER BEPALING VAN DE INVLOED VAN  
LOODRECHT INVALLENDE GOLVEN OP BODEMWRIJVING  
VEROORZAAKT DOOR LANGSSTROMING

R. van Leijen

M.J. van der Vlerk

Afstudeerverslag van een deelontwerp bij de  
Vakgroep Kustwaterbouwkunde  
Laboratorium voor Vloeistofmechanica  
Afdeling der Civiele Techniek  
Technische Hogeschool Delft

Afstudeerbegeleider: Ir. P.J. Visser

Afstudeerhoogleraar: Prof.Dr.Ir. E.W. Bijker

Delft, september 1984

## INHOUD

Voorwoord

Samenvatting

	bladzijde
<u>1. Inleiding</u> .....	1
<u>2. Het model</u> .....	3
2.1 Beschrijving van het model .....	3
2.2 Instelling van het model .....	6
<u>3. De experimenten</u> .....	12
3.1 Beschrijving van de proeven .....	12
3.2 Waterdiepte- en verhangmetingen .....	14
3.3 Golfhoogte metingen .....	16
3.4 Snelheidsmetingen .....	16
<u>4. Enige theoretische achtergronden</u> .....	18
4.1 Vertikale snelheidsverdeling ten gevolge van stroming ...	18
4.2 Golfbewegingen .....	20
4.3 Bodemwrijvingstheorie .....	22
<u>5. Uitwerking en analyse van de metingen</u> .....	32
5.1 Bodemruwheid .....	32
5.2 Vertikale snelheidsverdelingen .....	34
5.3 Het verhang .....	36
5.4 Bodemwrijving .....	45
<u>6. Aanvullende metingen met in ontwikkeling zijnde apparatuur</u>	49
6.1 Inleiding .....	49
6.2 Onderdompelbare Laser-Doppler snelheidsmeter .....	49
6.3 Elektromagnetische snelheidsmeter .....	56
<u>7. Conclusies</u> .....	58
<u>8. Aanbevelingen</u> .....	59

INHOUD (vervolg)

	bladzijde
Lijst met gebruikte symbolen .....	61
Literatuurlijst .....	63

## VOORWOORD

In mei 1984 zijn wij, in het kader van een T.O.W. onderzoek en tevens als deel van ons afstudeerwerk bij de vakgroep waterbouwkunde, begonnen met een serie modelproeven in de golfbak van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de T.H. Delft.

De proeven die ruim twee maanden in beslag hebben genomen hadden tot doel meer inzicht te verschaffen in bodemwrijvingsprocessen bij een combinatie van stroming en golven. Tevens had dit onderzoek een verkennend karakter en ligt het in de bedoeling dat met onze bevindingen en aanbevelingen een nieuwe serie proeven gestart zal worden.

Onze speciale dank gaat uit naar Ir. P.J Visser welke ons zeer goed en prettig begeleid heeft en de overige medewerkers van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica, die altijd voor ons klaar stonden om te helpen. Tot slot willen wij het Waterloopkundig Laboratorium te Delft bedanken voor het beschikbaar stellen van in ontwikkeling zijnde apparatuur om snelheden in water te meten en speciaal Ir. H.W.H.E. Godefroy voor zijn medewerking.

## SAMENVATTING

Dit rapport omvat de beschrijving en de verwerking van de resultaten van proeven in een golfbak. Hierbij is gekeken naar de invloed van golven op de bodemwrijving veroorzaakt door langsstroming. Deze proeven vertoonden grote gelijkenis met de proeven die Bijker in 1967 heeft uitgevoerd.

Het model is zo ingesteld dat er een zo goed mogelijk uniform stroombeeld ontstond, wat inhield een in het gehele model gelijk (vormig), in de tijd constant, stroombeeld.

In een aantal punten is de snelheidsverdeling over de vertikaal bepaald met behulp van een micro-molen. Totaal zijn er 36 proeven uitgevoerd met 4 verschillende stroomsnelheden, waarop een loodrecht invallend golfveld werd gezet met verschillende golfperiodes en golfhoogtes. Hierbij werd steeds in 30 punten het waterpeil bepaald. Aan de hand van deze peilen kon met lineaire regressie het verhang in de stroomrichting bepaald worden. Verder zijn nog een drietal proeven uitgevoerd met golven maar zonder stroming, waarbij de orbitaalsnelheid is gemeten.

Met de bestaande theoriën is geprobeerd om de invloed van een golfveld op de bodemwrijving te bepalen, waarbij 2, in grote lijnen gelijke verhoudingsformules zijn gebruikt. Het verschil tussen beide formules is alleen op welke hoogte boven de bodem de stroomsnelheid en de orbitaalsnelheid maatgevend zijn.

Bij een uniforme stroming is de verhouding van de bodemschuifspanningen gelijk aan de verhouding van de bijbehorende gemeten verhangen. Als deze theoretische en experimenteel bepaalde verhoudingen vergeleken worden, blijkt dat geen van de beide theoriën aan de experimentele resultaten voldoen. Verder blijkt uit deze metingen dat een golfveld geen duidelijke invloed heeft op het verhang. Dit is heel iets anders dan Bijker in 1967 heeft gevonden, wat mogelijk veroorzaakt wordt doordat Bijker een zand en grind bodem gebruikte en in dit onderzoek een betonnen bodem is gebruikt.

Aan het eind van het onderzoek zijn nog enkele proeven met in ontwikkeling zijnde apparatuur gedaan, waarmee stroomsnelheden in 2 richtingen tegelijk gemeten konden worden. De invloed van golven op de stroomsnelheden kon nu ook gevonden worden. Het bleek dat de verticale snelheidsverdeling nauwelijks beïnvloed werd, maar de stromingen in het gehele model werden wel duidelijk beïnvloed. ————?

De conclusies zijn dan ook dat de resultaten niet overeenkomen met de bestaande theoriën en dat de invloed van een golfveld op de langsstroming nader onderzocht moet worden.

## 1. INLEIDING

Tot op heden is er nog slechts weinig bekend over bodemwrijving bij een combinatie van golven en stroming. Ten aanzien van elk van de gevallen apart is wel het nodige bekend maar bij de combinatie moeten allerlei veronderstellingen ingevoerd worden omtrent het vektorieel optellen van de stroomsnelheid en de orbitaalsnelheid. De bestaande theoriën zijn echter niet eenduidig over hoe dit zou moeten gebeuren.

Om een beter inzicht in bodemwrijvingsprocessen te krijgen is in het kader van het Toegepast Onderzoek Waterstaat (T.O.W.), een serie modelproeven gestart in de golfbak van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de T.H. Delft, afdeling der Civiele Techniek. Dit onderzoek is tevens een onderdeel van het afstudeerwerk (deelontwerp) bij de vakgroep waterbouwkunde van de beide samenstellers van dit rapport.

In 1967 heeft Bijker een aantal modelproeven gedaan ter verificatie van zijn theoretische bodemwrijvingsmodel. Bijker voerde deze proeven uit met zowel een zandbodem als een grindbodem. De bodemwrijving werd indirect via het verhang van de waterspiegel gemeten. Het verhang werd gemeten d.m.v. waterstandsmetingen in 2 punten met een onderlinge afstand van 10 meter. Door dit verhang te meten in de situatie zonder golven en met golven, kon iets gezegd worden over het veranderen van de bodemwrijving. Bijker vond dat bij een combinatie van stroming en dwars invallende golven, het verhang, en dus de bodemwrijving, toenam, hetgeen ook in het theoretische model voorspeld werd.

Doordat er toch enigszins aan deze metingen getwijfeld wordt, is een serie metingen uitgevoerd die een sterke gelijkenis hebben met de proeven van Bijker. Er zijn echter een aantal verschillen. De huidige metingen zijn uitgevoerd met een vlakke betonnen vloer en niet met een veranderlijke zand- of grindbodem zoals bij Bijker. Verder zijn waterpeilen gemeten in 30 punten (in plaats van 2) en er is bij de instelling van het model veel aandacht besteed aan de uniformiteit van de stroming.



Het doel van deze serie proeven is om door middel van verhang- en snelheidsmetingen een beter inzicht te krijgen in bodemwrijvingsprocessen. Het ligt in de bedoeling dat de resultaten uit deze serie metingen een aanzet geven tot verdere metingen. In dit kader moeten ook de metingen met de in ontwikkeling zijnde apparatuur gezien worden. Voor een deel hebben deze proeven dus een verkennend karakter.

In hoofdstuk 2 wordt het model en de instelling ervan uitvoerig besproken. De diverse proeven en metingen worden in hoofdstuk 3 besproken. In hoofdstuk 4 worden de voor deze experimenten van belang zijnde theoretische achtergronden behandeld. De verbanden tussen de experimenten (hoofdstuk 3) en de theorie (hoofdstuk 4) worden in hoofdstuk 5 toegelicht. Ten slotte worden de metingen welke gedaan zijn met de in ontwikkeling zijnde apparatuur van het Waterloopkundig Laboratorium in hoofdstuk 6 besproken.

## 2. HET MODEL

### 2.1 Beschrijving van het model

De proeven zijn uitgevoerd in de golfbak van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica (zie fig.2.1.1). Deze golfbak heeft een lengte van 34 meter en een breedte van 14 meter, met aan beide korte zijden mogelijkheden voor in- en uitstroming en aan een lange zijde een "slangen-golfopwekker". Tegenover de golfopwekker was een glad betonnen talud 1:25 aangebracht; met de teen van dit talud op 6,5 meter vanaf het golfschot.

In het model was een coördinaten stelsel met de y-as in de stroomrichting en de x-as loodrecht daarop. Acht raaien (A tot en met G) waren er uitgezet evenwijdig aan de x-as, met aan het begin en het einde van het model de raaien dichter bijelkaar om de randinvloeden van de in- en uitstroming beter te kunnen meten. In iedere raai waren er om de meter punten uitgezet die duidelijk gemarkeerd waren met verf op de betonnen bodem. Tussen deze punten waren er om de 20 centimeter kleinere markeringen aangebracht. De markeringen waren uitgezet om een betere oriëntatie te verkrijgen bij visuele waarnemingen.

Met een op afstand te bedienen meetwagen die over de bak stond opgesteld, was het mogelijk opnemers voor snelheids- en hoogtemetingen naar plaatsen te sturen met opgegeven x- en y-coördinaten.

Teneinde over een zo'n groot mogelijk gedeelte van het model een uniform stroombeeld te verkrijgen, is veel aandacht besteed aan de in- en uitstroming. Het water werd aangevoerd door 2 buizen met een totaal maximum debiet van ruim 800 liter per seconde. Met behulp van in de buizen aangebrachte meetflenzen aangesloten op kwikmanometers was het instromende debiet af te lezen. Het water kwam nu terecht in een soort woelbak, waarna het water over een vaste volkomen overlaat stroomde, die weer werd gevolgd door een nu verstelbare overlaat, waarachter het profiel begon. Nu volgden 2 muurtjes van holle gaten stenen om het water minder turbulent te maken,

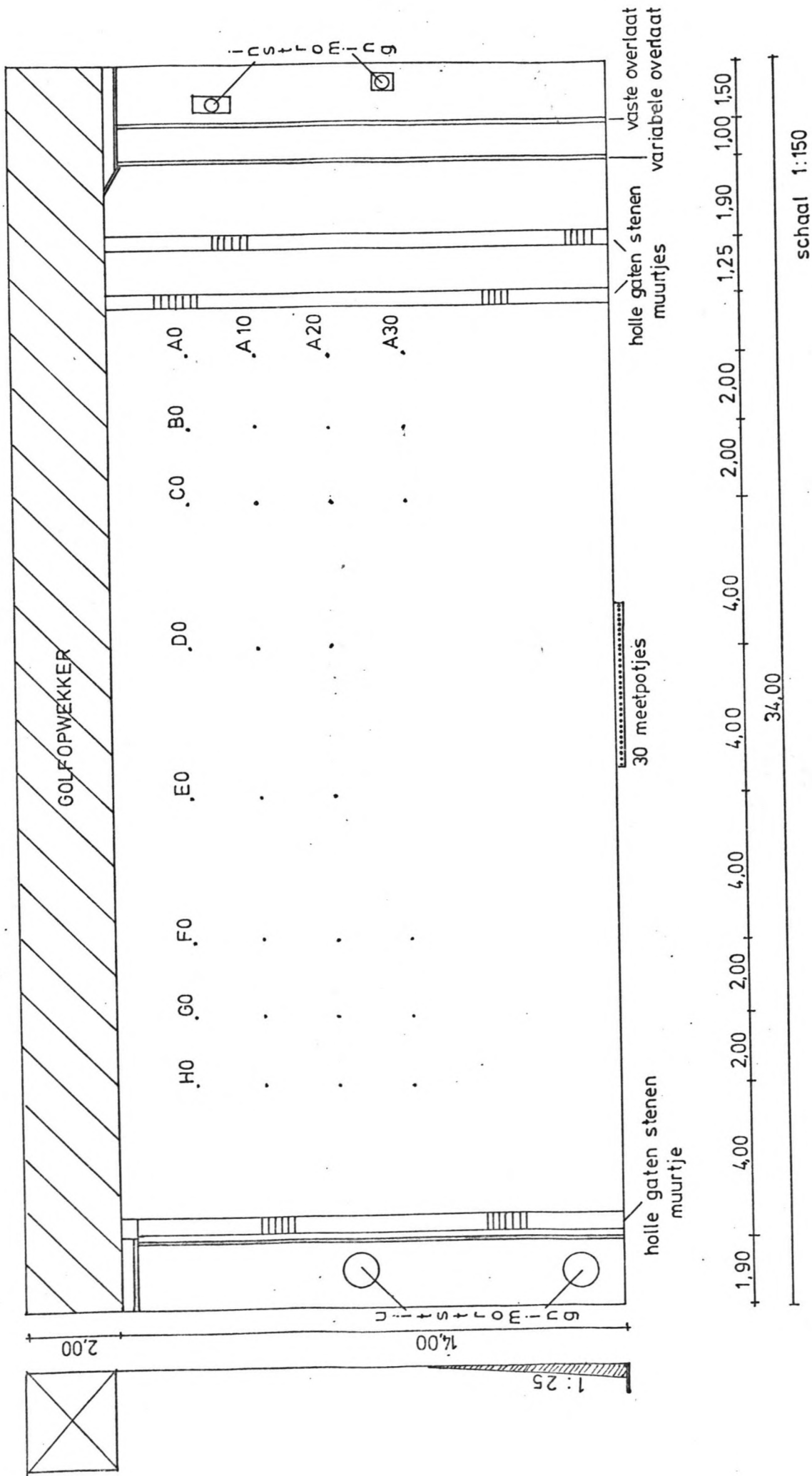


Fig.2.1.1.1 - Tekening van de situatie in de golfbak.

De uitstroming werd gereguleerd door eveneens een muurtje van holle gaten stenen. Achter dit muurtje was nog een overlaat die gedeeltelijk volkomen en gedeeltelijk onvolkomen was. Deze overlaat vormde de beëindiging van het profiel. Hierna volgde een bak met 2 grote gaten die voor de afvoer zorgden.

Met behulp van de aanwezige golfmachine is het mogelijk regelmatige golven op te wekken met een golfperiode tussen de 0,65 en 6 seconden en met een invalshoek van inval. Bij deze serie proeven is uitsluitend gewerkt met loodrecht invallende golven. Het golfschot bestaat uit rubber panelen van 0,4 meter. De beweging van het golfschot kan worden gevarieerd tussen een pure translatie (fig.2.1.2) en een volledig roterende beweging (fig.2.1.3).

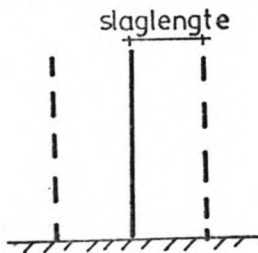


Fig.2.1.2 - Golfschot met pure translatie

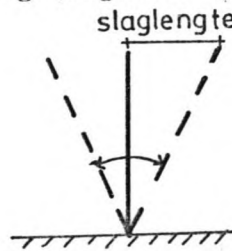


Fig.2.1.3 - Golfschot met volledig roterende beweging

Afhankelijk van de waterdiepte en de golfperiode werd steeds een zodanige combinatie van translatie en rotatie (slaghoek) ingesteld dat de optredende stoorgolven werden geminimaliseerd. (Dit aan de hand van een bij de golfbak behorende grafiek) Na de slaghoek te hebben ingesteld kan de golfhoogte worden ingesteld door een bepaalde slaglengte in te stellen. Door metingen in de bak kan de optredende golfhoogte dan worden bepaald. De op te wekken golfhoogtes werden beperkt door de golfsteilheid en de waterdiepte. Werden de golven te hoog gemaakt dan ontstond er een rommelig golfbeeld of braken de golven al direkt na het opwekken bij het golfschot.

Omdat voor dit onderzoek de variaties in het verhang zeer belangrijk zijn, moest in verschillende punten van het model het waterpeil gemeten worden. Hiervoor waren er op 30 plaatsen in de bak, in het vlak van de bodem, vierkante plaatjes aangebracht met middenin een gaatje met een diameter van ongeveer 1 millimeter. In elke raai waren er 4 meetpunten (0,10,20,30), behalve in de 2 middelste

raaien (D en E) waar slechts 3 meetpunten per raai waren (0,10,20), omdat hier verwacht werd dat het waterpeil constanter zou zijn door minder randinvloeden. Ieder meetpunt was via een dun slangetje, dat onder de bodem en het talud doorliep, aangesloten op meetpotjes die buiten de bak waren opgesteld (zie fig.2.1.1). In deze meetpotjes kon dan met een peilnaald die bevestigd was op een rail, het waterpeil van de overeenkomende meetpunten afgelezen worden. Met deze waterpeilen is het verhang te bepalen (zie 3.2).

## 2.2 Instelling van het model

Al eerder is gesteld dat veel aandacht is besteed aan de in- en uitstroming van het model teneinde in een zo'n groot mogelijk gedeelte een betrouwbaar meetgebied te verkrijgen. Aangezien bij de uitgevoerde proeven de verhangen bepaald werden door kleine waterstandsveranderingen, is dit van groot belang.

Het streven was om het stroombeeld na de instroming zo snel mogelijk ingesteld te krijgen en dit pas zo laat mogelijk door de uitstroming te laten beïnvloeden. Verder was het streven het stroombeeld zoveel mogelijk uniform te laten zijn. Dit geeft als doelstelling:

" Een in het hele model gelijk(vormig), in de tijd constant, stroombeeld"

Om in de dwarsrichting het stroombeeld gelijk te krijgen was er als eis gesteld dat de gemiddelde snelheden in punten van 1 raai niet meer dan plus of min 2 centimeter per seconde (+7 procent) mogen afwijken van de gemiddelde snelheid. Dit was een arbitraire eis. Om in de langsrichting het stroombeeld gelijk te krijgen was er als eis gesteld dat de snelheden over de vertikaal (de verticale snelheidsverdeling) in de stroomrichting niet te veel mogen veranderen. Dit gold zowel voor de groottes van deze snelheden als voor de vorm van de verticale snelheidsverdeling. Hieruit vloeide voort dat de gemiddelde snelheden van de raaien niet te veel mochten verschillen.

Er is aangenomen dat als de bak goed ingesteld zou zijn bij het maximale debiet, de bak ook goed ingesteld zou zijn bij kleinere debieten. Bij controle bleek dit redelijk te voldoen.

De instelling van het model is uitgevoerd bij het maximale debiet van ongeveer 800 liter per seconde.

Om de turbulentie (woeligheid) na de instroming zoveel mogelijk te beperken waren er na de overlaten 2 muurtjes van holle gaten stenen geplaatst, die de stroomlijnen ook rechter maakten. Om het stroombeeld zo snel mogelijk ingesteld te krijgen was de plaats waar de buizen het water inlieten zo gekozen dat het water al enigszins goed verdeeld was over de breedte van de bak. De uitlaten van de buizen waren zo gemaakt dat het water al minder woest de buizen uitkwam, wat bij het grote debiet dat er maximaal uitstroomde niet te verwaarlozen was. Het water kwam nu in een soort bak waar het over een volkomen overlaat uitstroomde. Het water was nu nog steeds erg woest door de kracht waarmee het de buizen uitkwam en stroomde dan ook niet gelijk verdeeld over deze overlaat, waardoor de overlaat niet als een theoretisch volkomen overlaat functioneerde. De tweede overlaat had schotten van ongeveer 2 meter lengte, die in de hoogte versteld konden worden, zodat de hoogte van de overlaat plaatselijk gevarieerd kon worden. Theoretisch kon worden bepaald hoe hoog de schotten van de overlaat moesten staan om een volkomen overlaat te verkrijgen, waarbij het debiet zo verdeeld was over het talud en het gedeelte met vlakke bodem, dat de stroomsnelheden over het profiel gelijk zouden zijn. Het bleek dat dit niet voldeed omdat het water bovenstrooms nog te woest aanstroomde en zodoende de energiehoogte bovenstrooms niet constant was over de lengte van de overlaat. Vooral terplaatse van de uitstroming van de buizen werd het water weggeblazen, zodat hier minder water over de overlaat kwam. Verder liep de overlaat niet helemaal door tot het golfschot zodat aan het einde van de overlaat bij het golfschot ook een extra debiet moest zijn om de stroomsnelheden bij het golfschot voldoende te laten zijn.

Door een aantal malen de schotten te verstellen en de snelheden op te meten in het model kon het uniforme stroombeeld in de dwarsrichting en de langsrichting ingesteld worden.

Nu bleek dat de vorm van de verticale snelheidsverdeling in de stroomrichting veranderde, en wel zo dat bij de instroming de snelheid bij de bodem relatief te hoog was. Het bleek dus dat het snelheidsprofiel zich in het begin van het model nog niet volledig ont-

wikkeld had. Het snelheidsprofiel kantelde langzaam tot aan het eind van de bak, waar het profiel geheel ontwikkeld was. Om het snelheidsprofiel al bij de instroming te laten kantelen, zodat het profiel in het begin van het model dezelfde vorm zou hebben als aan het eind, werd bij het tweede holle gaten muurtje onderaan gaas bevestigd om de stroomsnelheid bij de bodem te verminderen.

De snelheden bij de uitstroming konden worden gereguleerd door in het benedenstroomse muurtje van holle gaten stenen enkele openingen af te sluiten en bij het golfschot, waar de overlaat niet helemaal doorliep, enkele stenen weg te halen.

In de definitieve situatie zijn bij het maximale debiet (ongeveer 800 liter per seconde) om de meter de snelheden gemeten in de raaien A,C,E en H, en in de vertikaal om de 5 centimeter vanaf 2 centimeter van de bodem. Door de snelheden over de diepte te middelen konden de snelheidsverschillen in een raai bekeken worden. Aan de gestelde eis, dat de snelheden niet meer dan 2 cm/s. van de gemiddelde snelheid mochten afwijken, werd meestal voldaan. Zeker in het gedeelte met constante diepte (waar de verhangmetingen ook plaatsvinden) lagen de snelheden meestal zeer dicht bij elkaar, alleen op het talud (vanaf punt 25) waren de snelheidsverschillen wat groter, maar in de meeste gevallen nog wel binnen de gestelde eis (fig.2.2.1).

Aangezien er tussen de  $x=0$  en  $x=2$  meter niet gemeten kon worden door de bereikbaarheid van de meetwagen, is er aangenomen dat de snelheden hier eveneens aan de gestelde eisen voldeden. Achteraf kan hieraan getwijfeld worden.

De snelheden namen in de stroomrichting enigszins toe, maar tijdens het instellen werd dit toelaatbaar geacht, om de stroming toch nog als uniform te kunnen aannemen en om betrouwbare metingen en berekeningen te kunnen doen. In 5.4 over berekeningen van de bodemwrijving wordt hier nog op terug gekomen.

De verticale snelheidsverdeling (fig.2.2.2) was in alle punten ongeveer gelijkvormig.

In raai H bleken de snelheden meestal iets af te nemen, waarschijnlijk door enige opstuwning van het benedenstroomse muurtje.

De dikke lijn in fig.2.2.2 is de theoretische verticale snelheidsverdeling gevonden in 5.1.

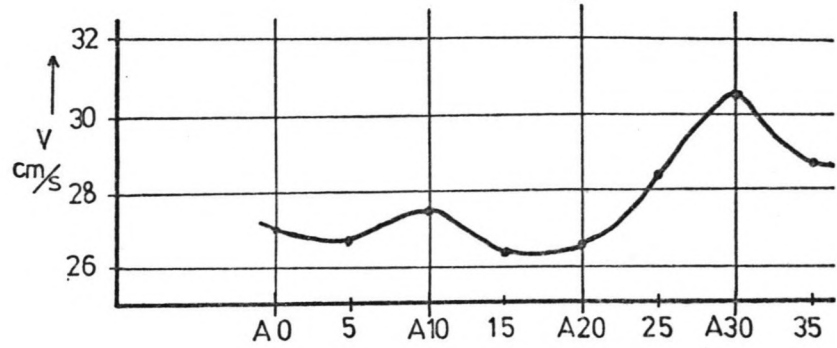
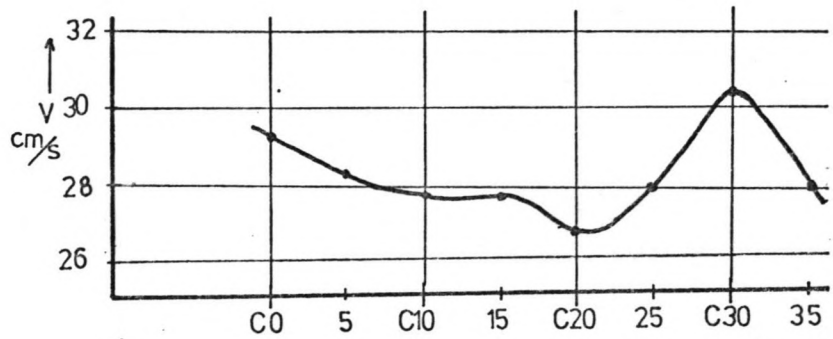
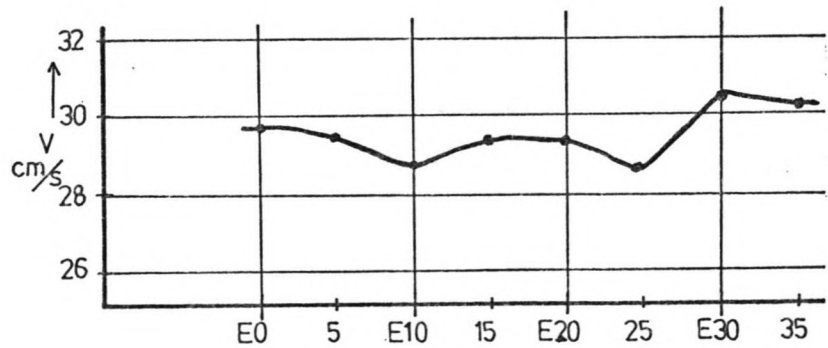
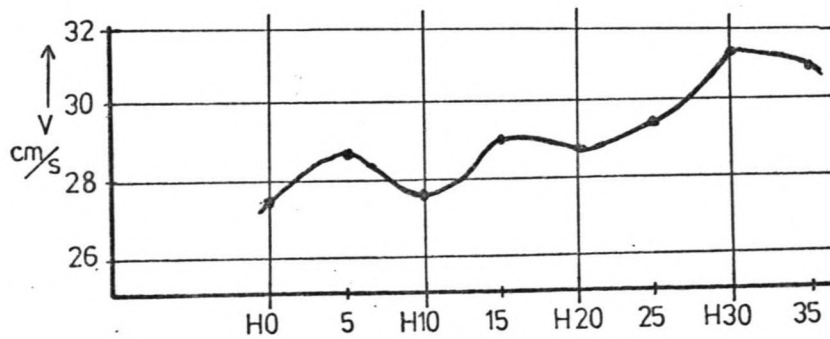
RAAI ARAAI CRAAI ERAAI H

Fig.2.2.1 - Vertikaal gemiddelde snelheidsverdeling over de raaien A,C,E en H.



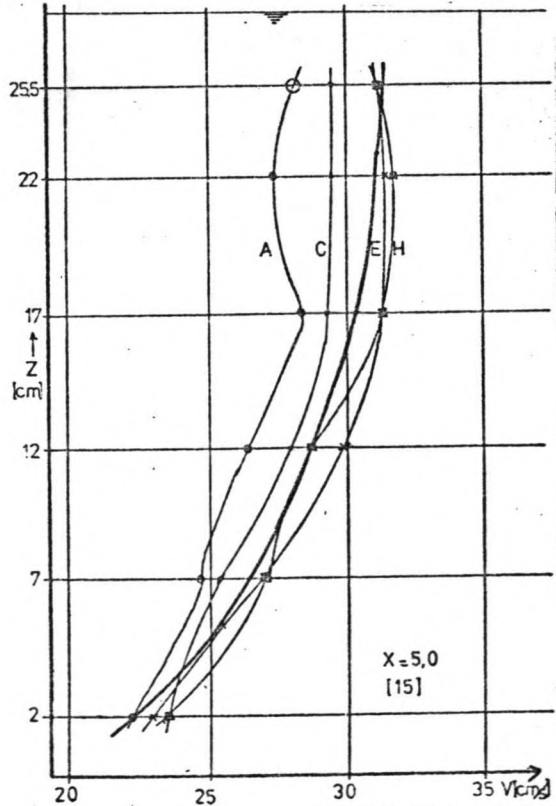
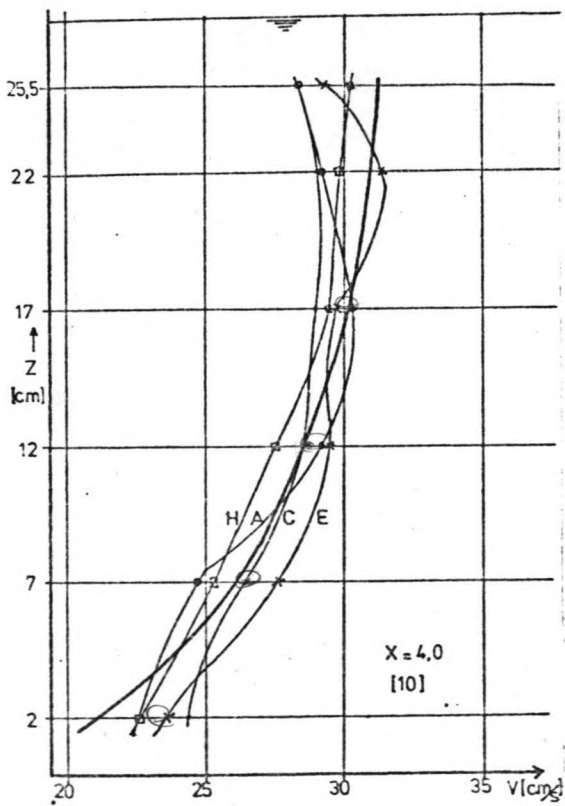
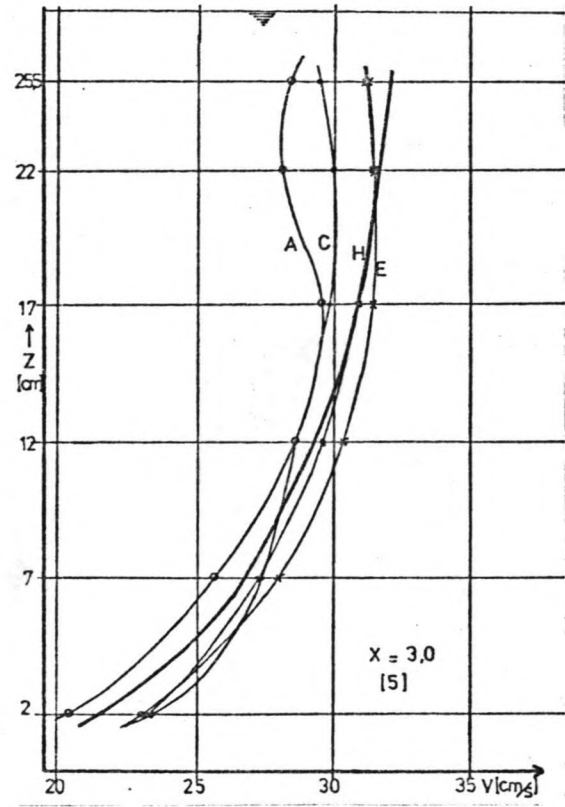
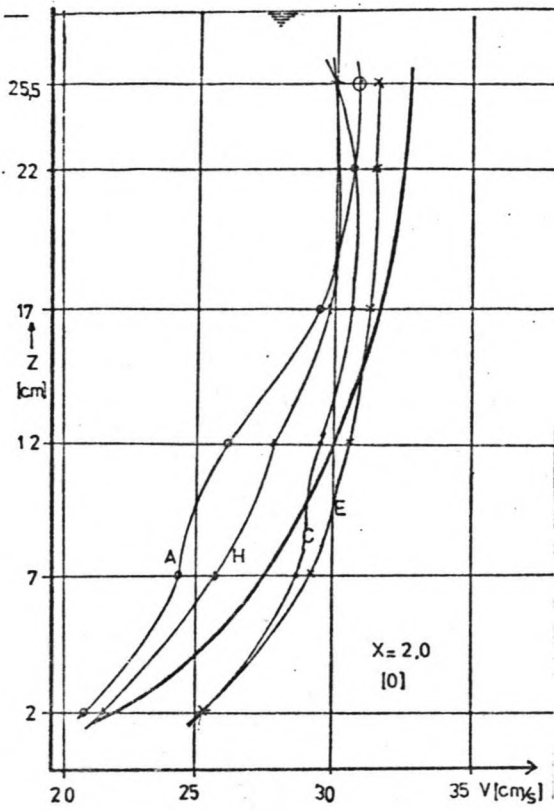


Fig.2.2.2 - Vertikale snelheidsverdeling in de raaien A,C,E en H.  
 $x = 2,0$  /  $x = 3,0$  /  $x = 4,0$  /  $x = 5,0$ .

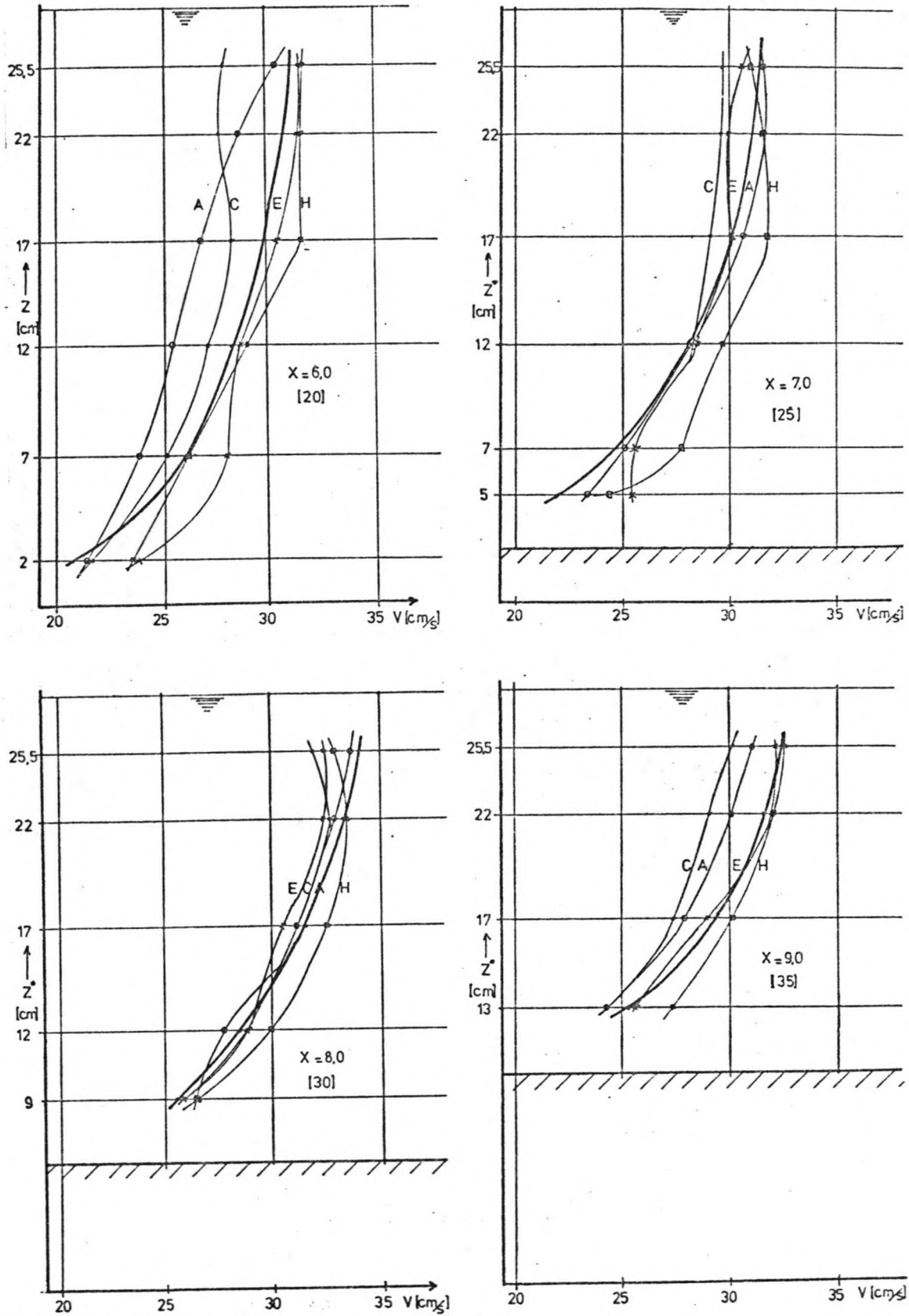


Fig.2.2.2 - Vertikale snelheidsverdeling in de raaien A,C,E en H.  
 $x = 6,0 / x = 7,0 / x = 8,0 / x = 9,0$ .

### 3. DE EXPERIMENTEN

#### 3.1 Beschrijving van de proeven

Na het instellen van het model zijn de eigenlijke metingen begonnen. Deze metingen zijn onder te verdelen in verschillende series van proeven waarbij in één serie het debiet  $Q$  constant werd gehouden, en het golfveld d.w.z. de golfhoogte  $H$  en de golfperiode  $T$  werd gevarieerd. Omdat de waterdiepte  $h$  in principe afhankelijk is van het toegevoerde debiet veranderde deze diepte niet bij eenzelfde debiet. Slechts bij 1 serie proeven is de uitstroming van de golfbak beperkt en de waterstand daardoor verhoogd.

Er zijn in totaal 7 series van proeven uitgevoerd, waarvan 6 series met een combinatie van stroming en golven en 1 serie met alleen golven. De series met een combinatie van stroming en loodrecht invallende golven zijn genummerd 1 tot en met 6. De proeven met de combinatie van golven en stroming zijn genummerd met 2 cijfers, respectievelijk het serienummer en een eigen proefnummer. Het proefnummer 0 betekent alleen stroming. De proeven in de serie met alleen golven zijn A, B en C genoemd.

Hieronder volgt een kort overzicht van de belangrijkste kenmerken van de verschillende series:

#### Serie 1,2 en 3

Bij serie 1,2 en 3 werd gestroomd met respectievelijk het maximale debiet, de helft van het maximale debiet en driekwart van het maximale debiet. Bij deze 3 series zijn elk 3 golfvelden toegepast met een verschillende golfperiode  $T$  van 0,96 seconde, 1,42 seconde en 1,90 seconde. Er is geprobeerd om de golfhoogte bij alle proeven ongeveer gelijk te houden.

#### Serie 4

Serie 4 is in principe gelijk aan serie 2 waar ook gestroomd werd met de helft van het maximale debiet. Bij deze serie werd echter gegolfd met een vaste periode van  $T=0,96$  seconde, maar werd de slaglengte gevarieerd en daarmee de golfhoogte  $H$ . De slaglengte van het golfschot

werd bij elke nieuwe proef iets opgevoerd totdat het golfbeeld rommelig werd (4.5) en zelfs de golven begonnen te breken na opwekking (4.6).

#### Serie 5

Bij serie 5 werd net zoals bij serie 1 met het maximale debiet gestroomd. Bij serie 5 werden echter zowel de golfperiode  $T$  als de golfhoogte  $H$  gevariëerd. Voor 4 verschillende golfperiodes werd elk een proef uitgevoerd met een kleine en een ongeveer 2 maal zo grote golfhoogte.

#### Serie 6

Serie 6 bestaat uit een reeks van proeven waarbij met de helft van het maximale debiet gestroomd werd. Deze serie proeven onderscheidde zich echter van serie 2 door een verhoogde waterstand tot het niveau wat normaal optrad bij de proeven waarbij met het maximale debiet gestroomd werd. Deze verhoogde waterstand werd verkregen door de uitstroming door het holle gaten stenen muurtje benedenstreams te verkleinen.

Proef 6.3 is in principe gelijk aan proef 6.0, waaruit blijkt dat dezelfde instelling ook dezelfde resultaten gaf. In de proeven werden zowel de golfperiode  $T$  als de golfhoogte  $H$  gevariëerd. Voor 2 verschillende golfperiodes ( $T=0,96$  s. en  $T=1,90$  s.) werd elk een proef met een kleine golfhoogte en een ongeveer 2 maal zo grote golfhoogte uitgevoerd. Verder werd er nog een proef uitgevoerd met een heel kleine golfperiode  $T=0,64$  seconde en een grote golfperiode  $T=2,30$  seconde en een tamelijk grote golfhoogte  $H$ .

#### Serie 7

In de laatste serie proeven A t/m C werd er alleen gegolfd en werd er niet gestroomd. Bij deze proeven is met behulp van een micro-molen de orbitaalsnelheid gemeten. De waterstand bij de proeven was ongeveer gelijk aan de waterstand bij het stromen met maximaal debiet.

Er is zoveel mogelijk geprobeerd om bij de proeven telkens maar één parameter te veranderen terwijl alle andere factoren gelijk gehouden werden. Hierdoor kon duidelijker de invloed van die veranderde parameter bekeken worden. Een aantal parameters konden eenvoudig bij de verschillende proeven veranderd worden. Dit waren het debiet  $Q$ ,

de golfperiode  $T$ , de golfhoogte  $H$  en de waterdiepte  $d$ .

Omdat  $U_m/V$  een belangrijke faktor is in veel bodemwrijvingsformules, zijn  $Q$ ,  $T$ ,  $H$  en  $d$  zo gekozen, in de verschillende proeven, dat er een mooie variatie in de faktor  $U_m/V$  ontstond en dat ook duidelijk de invloed van de veranderende parameter naar voren kwam.

### 3.2 Waterdiepte- en verhangmetingen

Zoals reeds in 2.1 beschreven, is in het model een meetsysteem aangebracht om waterpeilen te meten. Het meetsysteem moest ongevoelig zijn voor kort periodieke verschijnselen zoals de wisselende waterpeilen in een golfveld, maar ook voor iets langere oscillaties in het systeem zoals oscillaties die het gevolg zijn van het regelsysteem van de wateraanvoer. Het regelsysteem van de pompkamer van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica brengt een zeer kleine oscillatie met een periode van ongeveer 50 seconden met zich mee. Door de combinatie van een klein gaatje welke via een lange dunne leiding aan een meetpot met een relatief grote doorsnede gekoppeld is, bezit het meetsysteem voldoende traagheid om allerlei kort periodieke verschijnselen uit te dempen. Door de grote traagheid van het meetsysteem moest echter wel een vrij lange tijd gewacht worden tot het waterpeil in het meetpotje zijn evenwichtsstand bereikt had.

Het is van groot belang dat het hele meetsysteem goed ontluicht is. Luchtbellen in de leidingen zorgen voor foutieve meetresultaten. Om het waterpeil in een potje te kunnen meten, was boven de potjes een vaste rail aan de muur bevestigd, waarop een peilnaald gemonteerd werd. Deze peilnaald kon over de rail schuiven. Omdat het vrijwel onmogelijk was om deze rail precies waterpas te bevestigen, werden de waterpeilen van alle potjes gemeten terwijl het water in de bak in volledige rust was. Deze meting van het stilwaterpeil werd 3 maal uitgevoerd om meer betrouwbaarheid te krijgen. Deze metingen dienden namelijk als referentieniveau voor alle andere metingen. Bij deze 3 metingen bleken de resultaten nauwelijks af te wijken en werd het definitieve nulstandspeil bepaald, waarbij ieder potje zijn eigen nulstand kreeg.

Door bij een proef de nulstanden van de gemeten waarden af te trekken, kon het waterpeil boven het nulstands-referentievlak bepaald worden. Hieruit kon dan weer het verhang in de bak bepaald worden. Tevens kon door de waterdiepte bij het nulstandsniveau te meten, steeds de waterdiepte bepaald worden.

Elke serie proeven begon met een proef waarbij alleen gestroomd werd. Het waterpeil in alle potjes werd dan opgemeten en het verhang bepaald. Vervolgens werden er een aantal proeven gedaan met dezelfde stroming maar nu echter met verschillende golfvelden. Ook nu weer werden de waterpeilen in de potjes gemeten en de verhangen bepaald. De aandacht ging vooral uit naar hoe het verhang veranderde door een bepaald golfveld.

Uit de metingen bleek dat er zich randverschijnselen in de bak voordeden. Dicht bij de instroming en uitstroming en op het talud waren vaak randverschijnselen meetbaar. Op het vlakke deel van raai C tot raai G waren deze randverschijnselen niet merkbaar en daarom zijn de verhangen ook altijd bepaald over de afstand van raai C naar raai G, welke 14 meter groot is. Bij de golfvelden waren deze randverschijnselen behalve meetbaar ook goed zichtbaar, vooral aan de zijde van de instroming.

Om een hogere betrouwbaarheid te krijgen, werden de waterpeilen op het vlakke deel (de punten 0, 10 en 20) per raai gemiddeld. Het verhang  $i$  werd dan met behulp van lineaire regressie bepaald. Als gemiddelde waterdiepte  $d$  van de bak is de gemiddelde waterdiepte over de punten 0, 10 en 20 van raai E genomen. Bij een aantal malen berekenen van de gemiddelde waterdiepte bleek steeds dat deze gelijk of bijna gelijk was aan de gemiddelde waterdiepte in raai E, hetgeen niet zo verwonderlijk was omdat raai E ongeveer in het midden van de bak lag. De waarden in raai E gaven daarbij nog de minste spreiding van alle raaien te zien zodat het gemiddelde in raai E een betrouwbare waarde was voor de gemiddelde waterdiepte van de gehele bak.

### 3.3 Golfhoogte metingen

Om per proef het golfveld te definiëren werden golfhoogte metingen gedaan. De golfhoogten vertoonden in de bak variaties in langsrichting door randverschijnselen van de geleidewanden en in dwarsrichting door reflecties op het talud en door stoorgolven. Door deze variaties was het nodig om golfhoogten te meten in verschillende raaien. Hiervoor was op de meetwagen een golfhoogte meter bevestigd die op een schrijver was aangesloten welke de golfhoogte registreerde.

Bij het opwekken van de golven ontstaan er tevens stoorgolven waarvan de belangrijkste een periode hebben die de helft is van de opgewekte golven. Door in een raai in 10 à 15 punten de golfhoogte te meten, kan ondanks de stoorgolf een betrouwbare waarde van de gemiddelde golfhoogte worden verkregen. Doordat er in dwarsrichting van de bak variatie in de golfhoogte optreedt door reflectie tegen het talud werd er in één raai over een lengte van  $n \times \frac{1}{2}\lambda$  gemeten. Meestal werden de golfhoogten op gelijke afstanden, in raai E en raai D, van ongeveer 20 tot 40 centimeter van elkaar gemeten over een lengte van  $2 \text{ à } 3 \times \frac{1}{2}\lambda$ . Het meetgebied lag altijd zoveel mogelijk in het midden van het vlakke gedeelte van de bak om shoaling effecten, die op het talud optreden en randinvloeden de metingen niet te laten beïnvloeden. Alle golfhoogten van de 2 raaien werden tenslotte gemiddeld tot één gemiddelde golfhoogte.

### 3.4 Snelheidsmetingen

De snelheidsmetingen zijn uitgevoerd met behulp van een micro-molen. Met een micro-molen kunnen slechts snelheden in één richting gemeten worden. Zodra snelheden in 2 richtingen voorkomen, zoals bijvoorbeeld bij een combinatie van langsstroming en golven loodrecht daarop, zijn de metingen onbetrouwbaar en soms zelfs waardeloos. Dit betekent dat bij de proeven met alleen stroming of alleen golven gebruik gemaakt kon worden van de micro-molen als snelheidsmeter.

De micro-molen was op de meetwagen bevestigd en verbonden met een integrator en een schrijver. Het was met de micro-molen mogelijk om op een afstand van 2 centimeter vanaf de bodem snelheden te meten. Omdat vooral de snelheden vlak bij de bodem voor bodemwrijvingsprocessen het meest interessant zijn, werd bij het bepalen van de verticale snelheidsverdeling meestal vlak bij de bodem om de 2,5 centimeter de snelheid gemeten en wat hoger in de vertikaal om de 5 centimeter. Bij de snelheidsmetingen met alleen stroming werd het signaal verwerkt met behulp van een integrator. Hierbij werd altijd gedurende 60 seconden gemeten om de variatie in de snelheid, door onder andere turbulentie, uit te middelen. Bij metingen van de orbitaalsnelheid werd de snelheid geregistreerd door een schrijver. Hier werd vaak een iets kortere periode gemeten omdat de turbulentie hier een veel kleinere invloed had.

Voor de verticale snelheidsverdeling van de langsstroming werd in een raai om de meter gemeten. Om de gemiddelde snelheid in een punt te bepalen werden de snelheden in één vertikaal gemiddeld. De gemiddelde snelheid van een raai werd verkregen door de gemiddelde snelheden van de punten 0, 5, 10, 15 en 20 te middelen. De gemiddelde snelheid van een proef werd gelijk gesteld aan de gemiddelde snelheid in de C-raai en de E-raai van die proef (definitie).

Ook werden er nog metingen bij een combinatie van golven stroming met in ontwikkeling zijnde apparatuur uitgevoerd. Zie hiervoor hoofdstuk 6.



#### 4. ENIGE THEORETISCHE ACHTERGRONDEN

##### 4.1 Vertikale snelheidsverdeling ten gevolge van stroming

De verticale snelheidsverdeling in een turbulente en uniforme stroming, is geheel bepaald door de schuifspanning aan de bodem ( $\tau_b$ ) en een lengtemaat ( $z_0$ ) als integratieconstante. De schuifspanning ( $\tau_b$ ) wordt verwerkt in de bodemschuifspanningssnelheid ( $v_x$ ), gedefinieerd als:

$$v_x = (\tau_b / \rho)^{\frac{1}{2}} \quad 4.1.1$$

Voor de bodemschuifspanning  $\tau_b$  is af te leiden dat bij een kleine helling van de waterspiegel ( $\sin \theta = i$ ) geldt:

$$\tau_b = \rho g h i \quad 4.1.2$$

zodat de schuifspanningssnelheid door invullen van 4.1.2 in 4.1.1 gelijk is aan:

$$v_x = \sqrt{g h i} \quad 4.1.3$$

De lengtemaat  $z_0$  is de hoogte direct de ontwikkelde grenslaag waar de stroomsnelheid nul genomen wordt. Als we de afstand tot de bodem met  $z$  aanduiden en de lokale gemiddelde stroomsnelheid als  $v(z)$ , dan geldt voor een breed kanaal ( $B \gg d$ ) het volgende:

$$v(z) \approx \frac{v_x}{\kappa} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad 4.1.4$$

Waarin  $\kappa$  de constante van von Karman is ( $\kappa = 0,4$ ). Om nu de integratieconstante  $z_0$  te kunnen bepalen moet er eerst worden bepaald of de bodem hydraulisch ruw of glad is, wat dan ook de snelheidsverdeling bij de bodem bepaalt. Dit hangt af van de verhouding van de dikte van de viskeuze sublaag ( $\delta$ ), die door de invloed van de bodem op de stroom wordt opgewekt en de wandoneffenheden. De viskeuze sublaag is gedefinieerd als:

$$\delta = \frac{11,6 \nu}{v_x} \quad 4.1.5$$

waarin  $\nu$  de kinematische viscositeit is, die  $10^{-6}$  genomen kan worden bij normale temperaturen.

Is de viskeuze sublaag ruimschoots groter dan de wandoneffenheden dan is de bodem hydraulisch glad. Is dit echter omgekeerd dan is de bodem hydraulisch ruw. Er is bij deze proeven van een hydraulisch ruwe bodem uit gegaan, hetgeen later geverifiëerd moet worden. De integratieconstante  $z_0$  is nu afhankelijk van de wandoneffenheden en niet van de viskeuze sublaag, zoals bij een hydraulisch gladde wand. Nikuradse heeft de wandoneffenheden gedefiniëerd als de equivalenten zandruwheid ( $r$ ). De weerstand van de bodem is dan gelijk aan die welke beplakt is met uniforme zandkorrels met diameter  $r$ . Uit experimenten is gebleken dat  $z_0 = r/32$ , zodat voor de verticale snelheidsverdeling geldt:

$$v(z) = \frac{v_x}{\kappa} \ln \frac{32z}{r} \quad , \text{als } r \gg \delta \quad 4.1.6$$

ofwel:

$$v(z) = \frac{\sqrt{ghi}}{\kappa} \ln \left( \frac{32z}{r} \right) \quad 4.1.7$$

De relatieve snelheid  $v/\bar{v}$  is nu uit te zetten als functie van de relatieve diepte  $z/d$  en met de faktor  $d/r$  als parameter (zie fig. 4.1.1) is de gemiddelde snelheid die over de vertikaal optreedt te vinden op de diepte  $z = 0,37d$ .

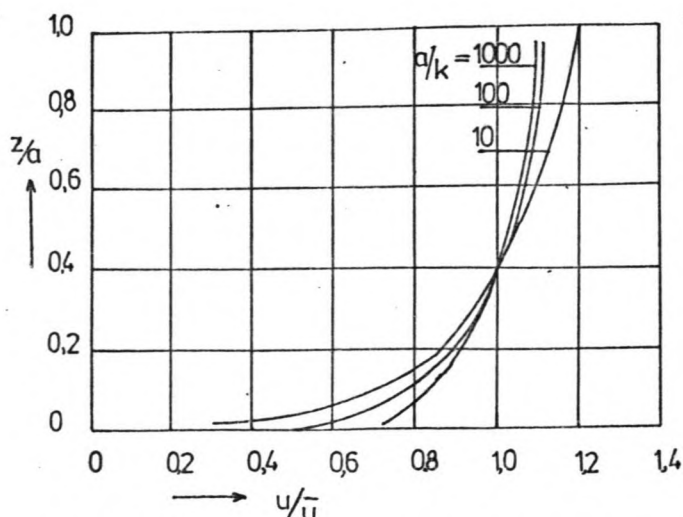


Fig.4.1.1 - Relatieve snelheidsverdeling

## 4.2 Golfbewegingen

Een vaak toegepaste keuze ten aanzien van de te hanteren golftheorie is die tussen de sinusoidale en de cnoïdale golftheorie. De cnoïdale golftheorie is een niet lineaire ondiep water theorie afgeleid van de lange golftheorie. De sinusoidale theorie is een lineaire korte golftheorie.

Voor de keuze zijn 2 criteria van belang:

- 1)  $U \equiv H\lambda^2/d^3$   
 $U < 15$ : Sinusoidale theorie is toepasbaar.  
 $U > 15$ : Bekijk tweede criterium.
- 2)  $d/\lambda_0 < 0,1$ : Cnoïdale theorie geeft betrouwbare resultaten.  
 $d/\lambda_0 > 0,1$ : Toepassing cnoïdale theorie is zinloos en sinusoidale theorie is onbetrouwbaar.

De keuze blijkt echter minder zwaarwegend dan deze wel lijkt. Le Mehaute c.s. (1969) hebben namelijk aangetoond dat de orbitaalbeweging bij de bodem in alle gevallen (ook als de cnoïdale theorie beter zou zijn), goed door de korte golftheorie benaderd kan worden. En omdat bij dit onderzoek de interesse vooral uitgaat naar de bewegingen bij de bodem (in verband met de bodemwrijving), is de benadering met de korte golftheorie betrouwbaar genoeg.

Orbitaalbewegingen zijn bewegingen van het water veroorzaakt door golven. Deze bewegingen zijn afhankelijk van de soort golven. Zoals eerder vermeld is, kunnen de bewegingen bij de bodem betrouwbaar bepaald worden met de lineaire golftheorie. Deze theorie geeft dat waterdeeltjes om één vast punt bewegen, zodat er dus geen resulterend massa-transport is. De horizontale deeltjessnelheid is volgens de lineaire korte golftheorie:

$$u(z) = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh(kz)}{\sinh(kd)} \cos\left(kx - \frac{2\pi t}{T}\right) \quad 4.2.1$$

waarin:  $H$  = Golfhoogte

$T$  = Golfperiode

$k = \text{Golfgetal } \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)$

$z = \text{Hoogte boven de bodem}$

$d = \text{Waterdiepte}$

$x = \text{Horizontale coördinaat}$

$t = \text{De tijd}$

Deze verdeling loopt tot vlak boven de bodem, waar een turbulente grenslaag ontstaat. De maximale orbitaalsnelheid (de snelheidsamplitude) bij de bodem (direkt boven de grenslaag), is dan gelijk aan:

$$\hat{u}_0 = \frac{\pi H}{T} \frac{1}{\sinh(kd)} \quad 4.2.2$$

De verdeling van de amplitude van de orbitaalsnelheid over de verikaal is dan:

$$\hat{u}(z) = \hat{u}_0 \cosh(kz) \quad 4.2.3$$

Deze waarden zijn algemeen geldig.

### 4.3 Bodemwrijvings theorie

De bodemschuifspanning  $\tau_b$  veroorzaakt door een momentane snelheid nabij de bodem kan geschreven worden als:

$$\tau_b = C\rho u_b |u_b| \quad 4.3.1$$

waarin:  $u_b$  = de momentane snelheid nabij de bodem.  
 $C$  = een dimensieloze wrijvingscoëfficiënt.

Voor een turbulente maar gemiddeld genomen éénparige en permanente stroming, met een over de gehele diepte gelijke snelheid, reduceert vergelijking 4.3.1 tot

$$\tau_b = C\rho V_b^2 \quad 4.3.2$$

waarin:  $V_b$  = de snelheid nabij de bodem (en vanwege de aanname van van de over de hele diepte gelijke snelheid is  $V_b$  tevens gelijk aan de gemiddelde snelheid).

De aanname dat er over de hele diepte overal een gelijke snelheid zou zijn is niet reëel. Ook bij de modelproeven is een snelheidsprofiel gemeten dat dicht in de buurt ligt van het theoretische logarithmische snelheidsprofiel. In de verdere uitwerkingen blijkt echter dat ondanks de irrationele aanname, de resultaten beter voldoen dan andere aannamen.

De wrijvingscoëfficiënt  $C$  is geen constante maar hangt af van het Reynolds getal  $Re$ . Voor het geval echter, dat de stroming turbulent is, hangt  $C$  af van de relatieve ruwheid  $r/R$  (waarin  $r$  de diameter van de ruwheidselementen en  $R$  de hydraulische straal) en is onafhankelijk geworden van het Reynolds getal.

Volgens Prandtl kan de snelheidsverdeling van een turbulente stroming in de vertikaal geschreven worden als:

$$V(z) = \frac{V_x}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad 4.3.3$$

waarin:  $V(z)$  = gemiddelde stroomsnelheid op een hoogte  $z$  boven de bodem.

$\kappa$  = 0,4, de konstante van von Karman.

$z_0$  = hoogte boven de bodem waar de snelheid gelijk aan nul is.

$v_x$  = bodemschuifspanningssnelheid,  $v_x = (\tau_b/\rho)^{\frac{1}{2}}$  4.3.4

De over de vertikaal gemiddelde snelheid is dan:

$$V = \frac{1}{h-z_0} \int_{z_0}^h V(z) dz = \frac{v_x}{\kappa} \ln \frac{h}{ez_0} \quad 4.3.5$$

Met 4.3.4 kan de betrekking tussen  $\tau_b$  en  $V$  geschreven worden als:

$$V = (\tau_b/\rho)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\kappa} \ln \frac{h}{ez_0} \quad 4.3.6$$

waaruit volgt dat:

$$\tau_b = \left( \frac{1}{\kappa} \ln \frac{h}{ez_0} \right)^{-2} \rho V^2 \quad 4.3.7$$

Met  $\tau_b = C\rho V^2$  (4.3.2) volgt dat:

$$C = \left( \frac{1}{\kappa} \ln \frac{h}{ez_0} \right)^{-2} \quad 4.3.8$$

Voor hydraulisch ruwe bodems, met Nikuradse ruwheidsmaat  $r$ , geldt:

$$z_0 = r/33 \quad 4.3.9$$

zodat we voor 4.3.8 kunnen schrijven:

$$C = \left( \frac{\kappa}{\ln \frac{12h}{r}} \right)^2 \quad 4.3.10$$

Deze wrijvingscoëfficiënt is dimensieloos, maar wel gekoppeld aan de Chezy coëfficiënt volgens:

$$C_{\text{chezy}} = \left( \frac{g}{C} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 4.3.11$$

Voor de situatie met alleen golven heeft Jonsson (1966) gevonden dat de bodemschuifspanning, bij een turbulente laagstroming in het hydraulisch ruwe regime, kan worden geschreven als:

$$\tau_b = C' \rho u_b |u_b| \quad 4.3.12$$

waarin  $u_b$  = de momentane snelheid nabij de bodem.  
 $C'$  = een dimensieloze wrijvingscoëfficiënt.

Jonsson vond voor  $C'$  de volgende relatie:

$$\frac{1}{4(2C')^{\frac{1}{2}}} + \log\left(\frac{1}{4(2C')^{\frac{1}{2}}}\right) = -0,08 + \log\left(\frac{a_b}{r}\right) \quad 4.3.13$$

waarin  $a_b$  = de bewegingsamplitude nabij de bodem.

Swart (1974) benaderde 4.3.13 met de volgende formule:

$$C' = \frac{1}{2} \exp \left\{ -5,977 + 5,213 \left( \frac{a_b}{r} \right)^{-0,194} \right\} \quad 4.3.14$$

Voor een combinatie van de langsstroming  $V$  en de orbitaalsnelheid  $u_b$  kan nu de momentane snelheidsvektor  $\underline{u}_b$  nabij de bodem samengesteld worden.

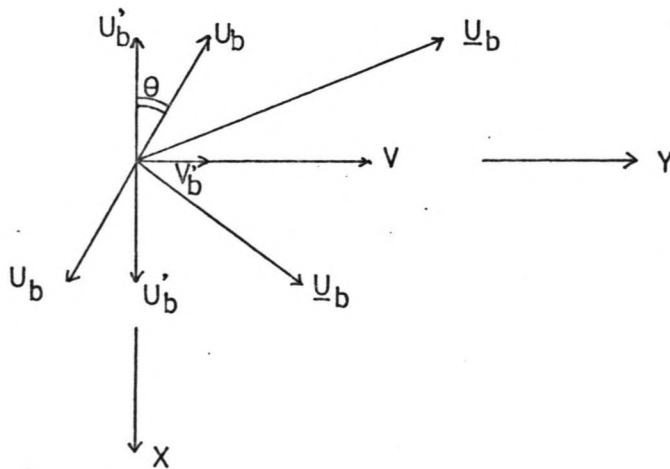


Fig.4.3.1 - Vektoriëel optellen van de orbitaalsnelheden.

Deze momentane snelheidsvektor  $\underline{u}_b$  kan worden geschreven als:

$$\underline{u}_b = ( u_b \cos\theta, u_b \sin\theta + v ) \quad 4.3.15$$

waarin  $u_b$  de horizontale orbitaalsnelheid nabij de bodem is.

$$( u'_b, v'_b ) = ( u_b \cos\theta, u_b \sin\theta ) \quad 4.3.16$$

De absolute waarde van  $\underline{u}_b$  kan nu worden geschreven als:

$$|\underline{u}_b| = ( u_b^2 + 2u_b v \sin\theta + v^2 )^{\frac{1}{2}} \quad 4.3.17$$

Invullen van 4.3.15 en 4.3.17 in 4.3.1, waarbij het tijdgemiddelde over de golfperiode T genomen wordt, geeft in y-richting:

$$\bar{\tau}_{by} = C \rho \frac{1}{T} \int_0^T ( u_b^2 + 2u_b v \sin\theta + v^2 )^{\frac{1}{2}} ( u_b \sin\theta + v ) dt \quad 4.3.18$$

Uit de experimenten van Le Mehauté c.s. (1969) bleek dat voor toepassingen nabij de bodem, de lineaire korte golftheorie goed voldoet. De horizontale orbitaalsnelheid nabij de bodem kan dus worden geschreven als ( zie ook 4.2.2 ):

$$u_b = u_m \cos\omega t \quad 4.3.19$$

$$\text{met } u_m = \frac{\pi H}{T} \frac{1}{\sinh(kh)} \quad 4.3.20$$

waarin  $u_m$  = maximale orbitaalsnelheid nabij de bodem.  
 $\omega$  = hoeksnelheid.

Vergelijking 4.3.18 kan nu geschreven worden als:

$$\bar{\tau}_{by} = C \rho v^2 f(\theta, \frac{u_m}{v}) \quad 4.3.21$$

Herschrijven en invullen van 4.3.19 levert:



$$\begin{aligned} \bar{\tau}_{by} = C \rho V^2 \frac{1}{T} \int_0^T & \left( 1 + 2 \frac{u_m}{V} \sin\theta \cos\omega t + \left( \frac{u_m}{V} \right)^2 \cos^2\omega t \right)^{\frac{1}{2}} \times \\ & \times \left( 1 + \frac{u_m}{V} \sin\theta \cos\omega t \right) dt \end{aligned} \quad 4.3.22$$

Voor  $f(\theta, \frac{u_m}{V})$  kan dus nu worden geschreven:

$$\begin{aligned} f(\theta, \frac{u_m}{V}) = \frac{1}{T} \int_0^T & \left( 1 + 2 \frac{u_m}{V} \sin\theta \cos\omega t + \left( \frac{u_m}{V} \right)^2 \cos^2\omega t \right)^{\frac{1}{2}} \times \\ & \times \left( 1 + \frac{u_m}{V} \sin\theta \cos\omega t \right) dt \end{aligned} \quad 4.3.23$$

Deze elliptische integraal kan vrij nauwkeurig benaderd worden door:

$$f(\theta, \frac{u_m}{V}) = 1 + \frac{1}{4} \left( \frac{u_m}{V} \right)^2 (1 + \sin^2\theta), \quad \text{als } \frac{u_m}{V} < 1 \quad 4.3.24$$

$$\begin{aligned} f(\theta, \frac{u_m}{V}) = \frac{10 - \frac{u_m}{V}}{9} \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left( \frac{u_m}{V} \right)^2 (1 + \sin\theta) \right\} + \frac{\frac{u_m}{V} - 1}{9} \left\{ \frac{2}{\pi} \frac{u_m}{V} (1 + \sin\theta) \right\}, \\ \text{als } 1 \leq \frac{u_m}{V} \leq 10 \end{aligned} \quad 4.3.25$$

$$f(\theta, \frac{u_m}{V}) = \frac{2}{\pi} \frac{u_m}{V} (1 + \sin^2\theta), \quad \text{als } \frac{u_m}{V} > 10 \quad 4.3.26$$

Kort samengevat zijn de belangrijkste vereenvoudigingen en aanamen die voor formule 4.3.22 zijn gedaan:

- × De langsstroomsnelheid en de orbitaalsnelheid worden vektorieel in de langsstromingsrichting opgeteld en daarna over de tijd gemiddeld.
- × Dit vektorieel optellen gebeurt in een niet nader gedefinieerd punt nabij de bodem.
- × De langsstromingssnelheid  $V$  nabij de bodem wordt gelijk gesteld aan de gemiddelde stroomsnelheid. Er wordt dus niet uit gegaan van een logaritmisch snelheidsprofiel.
- × De orbitaalsnelheid  $u_b$  nabij de bodem wordt met behulp van de lineaire korte golftheorie berekend. Het punt nabij de bodem ligt hierbij in het vlak  $z = 0$ .

Zoals uit het voorgaande naar voren is gekomen, is het moeilijk te zeggen hoe de langsstromingssnelheid en de orbitaalsnelheid opgeteld moeten worden. Bijker (1967) stelde dat voor een combinatie van stroming en golven, de vektoriele som op een bepaald niveau  $z'$  in de grenslaag bepalend is voor de resulterende bodemschuifspanning.

Dit niveau zou dan liggen op een hoogte waar de raaklijn vanuit de oorsprong ( $V = 0, z = 0$ ) precies raakt aan het logaritmisch snelheidsprofiel van de langsstroming. Dit niveau ligt in de hypothetische grenslaag op een hoogte  $z'$ , en is geheel verzonken in de ruwheidselementen. Voor  $z'$  kan geschreven worden:

$$z' = ez_0 = er/33 \quad 4.3.27$$

Vervolgens bepaalde Bijker in dit punt  $z'$  de stroomsnelheid en de orbitaalsnelheid om deze vektorieel op te kunnen tellen. Dit optellen gebeurde op dezelfde wijze als hiervoor al eerder beschreven. Het invullen van  $z'$  voor  $z$  in formule 4.3.3 levert de stroomsnelheid behorende bij het logaritmisch snelheidsprofiel op hoogte  $z'$ :

$$V(z') = \frac{V_x}{\kappa} \ln \frac{z'}{z_0} = \frac{V_x}{\kappa} \ln \frac{ez_0}{z_0} \quad 4.3.28$$

en dus,

$$V(z') = \frac{V_x}{\kappa} \quad 4.3.29$$

Anders schrijven van 4.3.2 levert:

$$\frac{\tau_b}{\rho} = CV^2 \quad 4.3.30$$

Dit gecombineerd met de formule 4.3.4 voor de bodemschuifspanningsnelheid  $V_x$  levert bij invullen in 4.3.29:

$$V(z') = \frac{C^{\frac{1}{2}}}{\kappa} V \quad 4.3.31$$

waarin  $V(z')$  = snelheid op hoogte  $z'$ .

$V$  = gemiddelde stroomsnelheid.

De faktor  $C^{\frac{1}{2}}/\kappa$  kan dus gezien worden als een reductiefaktor waarmee de gemiddelde stroomsnelheid moet worden vermenigvuldigd om de snelheid in het punt  $z = z'$  te krijgen.

De orbitaalsnelheid  $u_b$  (zie formule 4.3.19 en 4.3.20), is de snelheid bij de bodem, net buiten de grenslaag. Omdat het niveau  $z'$  in deze grenslaag ligt en de lineaire korte golftheorie geen uitspraak doet over de snelheidsverdeling in deze grenslaag heeft Bijker dit deel gelineairiseerd. De orbitaalsnelheid op een hoogte  $z'$  stelt Bijker dan op:

$$pu_b = pu_m \cos \omega t \quad 4.3.32$$

met  $p = 0,39$  (theoretisch) en  $p = 0,45$  (experimenteel). De faktor  $p$  is dus een reductiefaktor waarmee de orbitaalsnelheid  $u_b$  vermenigvuldigd moet worden om de orbitaalsnelheid in de grenslaag op een hoogte  $z'$  te krijgen.

De momentane bodemschuifspanning kan nu op een iets andere manier geschreven worden dan 4.3.1 om het rekenen iets te vergemakkelijken. Door  $V_x = (\tau_b/\rho)^{\frac{1}{2}}$ , in te vullen in 4.3.29 volgt dat de momentane bodemschuifspanning gelijk is aan:

$$\tau_b = \rho \kappa^2 u(z') |u(z')| \quad 4.3.33$$

waarin  $u(z')$  = de momentane snelheid op een hoogte  $z'$  van de bodem.

Hierin is  $u(z')$  een samenstel van de stroomsnelheid op hoogte  $z'$  en de orbitaalsnelheid op hoogte  $z'$ . Zodoende volgt op dezelfde wijze als voor 4.3.15, dat voor de momentane snelheid  $u(z')$  geschreven worden:

$$u(z') = (pu_m \cos \theta \cos \omega t, pu_m \sin \theta \cos \omega t + \frac{C^{\frac{1}{2}}}{\kappa} V) \quad 4.3.34$$

De absolute waarde van  $u(z')$  kan geschreven worden als:

$$|u(z')| = \left\{ (pu_m)^2 \cos^2 \omega t + 2pu_m \sin \theta \cos \omega t \frac{C^{\frac{1}{2}}}{\kappa} V + \frac{C}{2} V^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad 4.3.35$$

Invullen van 4.3.34 en 4.3.35 in 4.3.33, waarbij het tijdgemiddelde over de golfperiode  $T$  genomen wordt geeft in de  $y$ -richting:

$$\begin{aligned} \tau_b = \rho \kappa^2 \frac{1}{T} \int_0^T \{ (pu_m)^2 \cos^2 \omega t + 2pu_m \sin \theta \cos \omega t \frac{C^{\frac{1}{2}}}{\kappa} V + \frac{C}{\kappa^2} V^2 \}^{\frac{1}{2}} \times \\ \times (pu_m \sin \theta \cos \omega t + \frac{C^{\frac{1}{2}}}{\kappa} V) dt \end{aligned} \quad 4.3.36$$

$V^2$  buiten de integraal halen levert:

$$\begin{aligned} \tau_b = \rho \kappa^2 V^2 \frac{1}{T} \int_0^T \{ (\frac{pu_m}{V})^2 \cos^2 \omega t + 2 \frac{pu_m}{V} \sin \theta \cos \omega t \frac{C^{\frac{1}{2}}}{\kappa} + \frac{C}{\kappa^2} \}^{\frac{1}{2}} \times \\ \times (\frac{pu_m}{V} \sin \theta \cos \omega t + \frac{C^{\frac{1}{2}}}{\kappa}) dt \end{aligned} \quad 4.3.37$$

$C/\kappa^2$  buiten de integraal halen levert tenslotte:

$$\begin{aligned} \tau_b = \rho CV^2 \frac{1}{T} \int_0^T \{ (\frac{p\kappa}{C^{\frac{1}{2}}})^2 (\frac{u_m}{V})^2 \cos^2 \omega t + 2 \frac{p\kappa}{C^{\frac{1}{2}}} (\frac{u_m}{V}) \sin \theta \cos \omega t + 1 \}^{\frac{1}{2}} \times \\ \times (\frac{p\kappa}{C^{\frac{1}{2}}} (\frac{u_m}{V}) \sin \theta \cos \omega t + 1) dt \end{aligned} \quad 4.3.38$$

$$\text{Met } \xi = \frac{p\kappa}{C^{\frac{1}{2}}}, \quad 4.3.39$$

kan 4.3.38 in de volgende vorm geschreven worden (vergelijk ook 4.3.21 en 4.3.22):

$$\tau_b = \rho CV^2 f(\theta, \xi \frac{u_m}{V}) \quad 4.3.40$$

$$\begin{aligned} \text{waarin } f(\theta, \xi \frac{u_m}{V}) = \frac{1}{T} \int_0^T \{ 1 + 2\xi \frac{u_m}{V} \sin \theta \cos \omega t + (\xi \frac{u_m}{V})^2 \cos^2 \omega t \}^{\frac{1}{2}} \times \\ \times (1 + \xi \frac{u_m}{V} \sin \theta \cos \omega t) dt \end{aligned} \quad 4.3.41$$

Hiermee is dus 4.3.41 gelijk aan 4.3.23 met het enige verschil dat  $u_m/V$  vervangen is door  $\xi u_m/V$ .

In de aanpak van Bijker staat centraal dat de gemiddelde langsstromingssnelheid en de orbitaalsnelheid nabij de bodem gereduceerd worden tot snelheden in het niveau  $z'$ , wat zich in de grenslaag bevindt. De faktor  $\xi$  is nu gelijk aan de verhouding van de reductiefactoren van de orbitaalsnelheid en de langsstromingssnelheid. De faktor  $\xi$  is dus niet zomaar een faktor maar heeft fysische betekenis.

Zoals uit de titel van dit rapport naar voren is gekomen, gaat het vooral om de invloed van golven op bodemwrijving veroorzaakt door langsstroming. Bij de aanname dat een golfveld de verticale snelheidsverdeling van de langsstroming niet verandert, wordt deze invloed volledig bepaald door  $f(\theta, u_m/V)$  of zoals bij Bijker door  $f(\theta, \xi u_m/V)$ .

Door in proeven met en zonder golven, de verhangen te bepalen is het mogelijk de invloed van het golfveld op de bodemwrijving te bepalen, mits het stroombeeld uniform is. Wanneer het stroombeeld niet geheel uniform is moet behalve met de verhangen ook nog rekening worden gehouden met versnellings- of vertragingstermen van de stroming.

Met behulp van de impulsvergelijking kan, in de situatie met rechte stroomlijnen verder uitgewerkt worden:

$$\text{Impulsvergelijking: } F = \frac{d(mV)}{dt} \quad 4.3.42$$

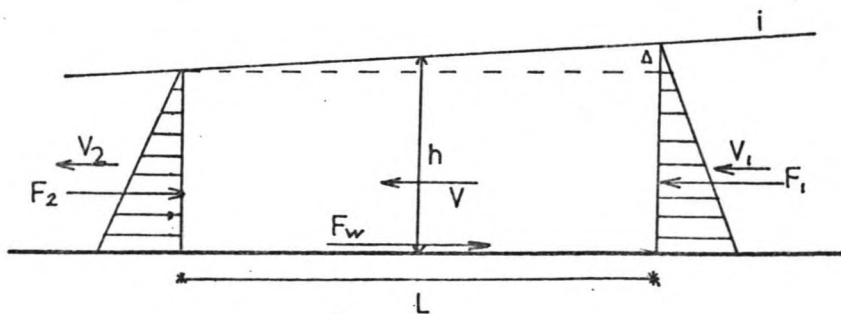


Fig.4.3.1 - Evenwicht.

De impulsvergelijking toegepast op fig.4.3.2 levert per eenheid van breedte:

$$F_1 - F_2 - F_w = \frac{d(mV)}{dt} \quad 4.3.43$$

Verder uitwerken levert:

$$\frac{1}{2} \rho g (h + \frac{1}{2}\Delta)^2 - \frac{1}{2} \rho g (h - \frac{1}{2}\Delta)^2 - F_w = -\rho qV_1 + \rho qV_2 \quad 4.3.44$$

uitschrijven geeft:

$$\frac{1}{2} \rho g (h^2 + \frac{1}{4}\Delta^2 + h\Delta - h^2 - \frac{1}{4}\Delta^2 + h\Delta) - F_w = \rho hV(V_2 - V_1) \quad 4.3.45$$

met  $\Delta = i \times l$  en  $F_w = \tau_w \times l$  geeft dit:

$$\frac{1}{2} \rho g 2hi - \tau_w l = \rho hV(V_2 - V_1) \quad 4.3.46$$

Zodat de bodemschuifspanning  $\tau_w$  geschreven kan worden als:

$$\tau_w = \rho ghi - \rho hV \frac{(V_2 - V_1)}{l} \quad 4.3.47$$

Als de snelheid constant blijft, kan formule 4.3.47 worden vereenvoudigd tot:

$$\tau_w = \rho ghi \quad 4.3.48$$

Bij een bodem die geheel waterpas ligt, is het zoals uit fig. 4.3.2 blijkt, in principe niet mogelijk dat er een uniforme stroming is.

Immers bij de aanwezigheid van een kracht  $F_w$  moet  $F_1$  groter zijn dan  $F_2$ , wil het water stromen. Dit impliceert dat  $h_2 < h_1$  en dus dat  $u_2 > u_1$ , hetgeen inhoudt dat aan de voorwaarden die voor een uniform stroombeeld moeten gelden niet meer voldaan wordt. Als de continuïteit voor een meetgebied geldt in een uniforme stroming en het verhang klein is, kan de versnellingsterm verwaarloosd worden.

Uit het voorgaande mag dus geconcludeerd worden dat, als aan de continuïteit voldaan wordt in het meetgebied, voor de hier uitgevoerde proeven geldt dat de bodemwrijving direct afhankelijk is van het verhang zoals in 4.3.48.

## 5. UITWERKING EN ANALYSE VAN DE METINGEN

### 5.1 Bodemruwheid

Een veel gebruikte coëfficiënt, om de invloed van de bodem op stroming weer te geven, is de coëfficiënt die voorkomt in de vergelijking van Chezy voor de gemiddelde snelheid. Deze Chezy coëfficiënt  $C$  is in tegenstelling tot de dimensieloze wrijvingscoëfficiënt  $C$  uit 4.3 niet dimensieloos. Tevens is het eigenlijk geen wrijvingscoëfficiënt maar meer een gladheidscoëfficiënt.

$$V = C (hi)^{\frac{1}{2}} \quad 5.1.1$$

waarin  $C$  = Chezy coëfficiënt

$h$  = waterdiepte

$i$  = verhang

Hieruit volgt dat de Chezy coëfficiënt gelijk is aan:

$$C = V/(hi)^{\frac{1}{2}} \quad 5.1.2$$

Met behulp van deze vergelijking kan voor alle proeven uit de beschikbare meetgegevens de Chezy coëfficiënt bepaald worden, (tabel 1).

Om iets te kunnen zeggen over de stroming dicht bij de wand moet eerst de ruwheid van de wand bepaald worden. In het algemeen is deze in twee categoriën te verdelen, namelijk:

Hydraulisch ruw met als eis  $r \gg \delta$

Hydraulisch glad met als eis  $r \ll \delta$

waarin  $\delta$  = dikte van de viskeuze sublaag

$r$  = equivalente zandruwheid volgens Nikuradse.

De dikte van de viskeuze sublaag is gedefiniëerd als:

$$\delta = \frac{11,6 \nu}{v_x} \quad 5.1.3$$

Hierin is de bodemschuifspanningssnelheid gedefiniëerd als:

$$v_x = (\tau_b / \rho)^{\frac{1}{2}} \quad 5.1.4$$

De bodemschuifspanning voor een niet te groot verhang  $i$  geschreven worden als:

$$\tau_b = \rho g h i, \quad 5.1.5$$

zodat met behulp van 5.1.3, 5.1.4 en 5.1.5 de dikte van de viskeuze sublaag  $\delta$  geschreven kan worden als:

$$\delta = \frac{11,6 v}{(g h i)^{\frac{1}{2}}} \quad 5.1.6$$

Met de meetresultaten is nu voor elke proef  $\delta$  te berekenen. In tabel 1 zijn de uitkomsten hiervan te vinden. Om de wandruwheid  $r$  te bepalen nemen we de Chezy coëfficiënt volgens White-Colebrook bij een grote breedte-diepte verhouding:

$$C = 18 \log \frac{12R}{r + \delta/3,2} \quad 5.1.7$$

Waaruit volgt:

$$r = \left( \frac{12h}{\exp(C/18)} \right) - \frac{\delta}{3,2}, \text{ als } R \approx h \quad 5.1.8$$

Met de meetresultaten en de eerder berekende  $C$  en  $\delta$  is nu de equivalenten zandruwheid  $r$  te berekenen. Zie hiervoor tabel 1.

Uit de resultaten blijkt nu dat in slechts enkele gevallen de zandruwheid  $r$  kleiner is dan de viskeuze sublaag  $\delta$ . In de meeste gevallen is  $r$  zelfs een aantal malen groter dan  $\delta$ , zodat er kan worden aangenomen dat de bodem zich als hydraulisch ruw gedraagt.

De grote waarden van de equivalenten zandruwheid  $r$ , die de mate van weerstand aangeeft, bij serie 6, zijn te verklaren uit de omstandigheden dat hier het water bij de uitstroming meer gestuwd wordt, zodat de weerstand groter voor het hele systeem groter is.



De verschillen van de waarden van  $r$  in de verschillende proeven van serie 1 t/m 5 wordt veroorzaakt door de sterke invloed van  $C$  op  $r$ .  $C$  wordt bepaald door de gemiddelde stroomsnelheid, het verhang en de waterdiepte. Deze laatste is nauwkeurig te bepalen. Echter in de gemiddelde stroomsnelheid en het verhang zijn grote afwijkingen mogelijk. Verder zit het verhang ook in  $\delta$ , maar werkt hier minder sterk door op  $r$ , zodat deze mogelijke afwijkingen via  $C$  en via  $\delta$  minder sterk doorwerken op de bepaling van  $r$ .

De bodemruwheid is echter ook niet helemaal constant, doordat een zeer fijn zand, wat in het systeem aanwezig was, variërende smalle ribbels van ongeveer 3 millimeter hoog vormde. Deze ribbels variëerden in hoogte en richting afhankelijk van de golfhoogte, golfperiode en de duur van de golfbelasting. Verder viel op dat de zandribbels een kleine hoek maakten met de richting van de langsstroming. Bij een klein experiment met kalium-permanganaat viel het tevens op dat deeltjes op de bodem in de lengterichting van de ribbels bewogen, terwijl iets hoger in de vertikaal de richting gelijk was aan die van de langsstroom. Het deel waar de deeltjes langs de ribbels bewogen kan duiden op een viskeuze sublaag die ontstaat bij de bodem. Naar deze bewegingen van de ribbels en de verbanden met de stroming en het verhang is verder niet gekeken.

## 5.2 Vertikale snelheidsverdelingen

Door beperkingen van de meetapparatuur konden de snelheden in de vertikaal niet gemeten worden met tegelijkertijd stromen en golven. Er konden dus alleen langsstroomsnelheden gemeten worden in de situatie van stromen zonder golven en orbitaalsnelheden konden alleen gemeten worden in de situatie met golven zonder stroming. Later is er wel de mogelijkheid geweest om snelheden te meten tijdens stromen en golven tegelijkertijd. Er zijn echter te weinig metingen gedaan om er betrouwbare conclusies uit te trekken (zie hiervoor hoofdstuk 6).

Dit had tot gevolg dat er niet kon worden gekeken of de golven de verticale snelheidsverdeling van de langsstroming, in langsrichting beïnvloeden of dat de langsstroming de verticale snelheidsverdeling van de orbitaalbeweging beïnvloed. Tot nu toe is altijd aangenomen dat dit niet het geval is. Met een ander soort snelheidsmeters dan de huidige kunnen, waarschijnlijk in de nabije toekomst, wel metingen gedaan worden bij een combinatie van golven en stroming.

In de situatie van alleen stromen en geen golven bleek uit een aantal metingen van de langsstroomsnelheid op dezelfde plaats en onder gelijke omstandigheden, dat de afwijkingen in de metingen, bij het maximale debiet, niet meer dan ongeveer 1,5 cm/s van het gemiddelde afweken. Dit komt neer op een afwijking van  $\pm 5$  procent. Deze afwijkingen ontstaan door variaties in de stroming, maar ook door variaties in het functioneren van de micro-molen.

Met fig. 4.1.1 is de theoretische verticale snelheidsverdeling eenvoudig te bepalen (in de situatie zonder golven). In fig. 2.2.2 is deze snelheidsverdeling voor proef 1.0 ingetekend. Als de theoretische en de opgemeten snelheidsverdeling vergeleken wordt, blijkt dat ze in grote lijnen goed overeenkomen. In het gebied dicht bij de bodem neemt de berekende snelheid sneller af. Bij een aantal snelheidsverdelingen blijkt dat de snelheid bij het oppervlak afneemt, iets wat veroorzaakt kan worden doordat het molentje minder diep onder water steekt en het water daardoor gemakkelijker om het molentje heen kan stromen.

Als we de snelheidsverdelingen in de 4 raaien vergelijken blijkt dat in het algemeen de lijnen redelijk gelijkvormig blijven. Echter de toe- of afname van de snelheden tussen de raaien in overeenkomende punten (met gelijke x-coördinaten), is niet over de hele raai gelijk. Dit heeft tot gevolg dat de stroomlijnen niet recht in de stroomrichting zullen lopen. Echter proeven met kleurstof maakten duidelijk dat deze afwijkingen nogal meevielen en de aanwezige turbulentie voor meer verspreiding zorgde.

In de situatie van golven zonder stroming is de maximale orbitaalsnelheid met behulp van de lineaire golftheorie uit te rekenen als functie van de diepte:

$$\hat{u}(z) = \frac{\pi H \cosh(kz)}{T \sinh(kh)} \quad 5.2.1.$$

Als dit in figuur 5.2.1 uitgezet wordt naast de opgemeten waarden uit proef A, B en C, valt op dat de berekende orbitaalsnelheid (dikke lijn) en de opgemeten orbitaalsnelheid redelijk goed overeenkomen.

De orbitaalsnelheid is opgemeten met een micromolen gekoppeld aan een schrijver (fig.5.2.2). Hieruit is te zien dat de fout in het opmeten van de maximale orbitaalsnelheid betrekkelijk klein is. Hiermee, en eveneens met afwijkingen van de micro-molen, zouden de betrekkelijk kleine afwijkingen tussen de berekende en de opgemeten orbitaalsnelheden verklaard kunnen worden.

### 5.3 Het verhang

Het verhang dat in de langsrichting van ons model ontstaat, wordt bepaald door in een aantal punten het waterpeil op te meten. In het opmeten hiervan kan een onnauwkeurigheid zitten door de afleesfout, die echter niet groter zal zijn dan  $\pm 0,1$  mm. Bij het meerdere malen doen van dezelfde meting bleek deze slechts kleine afwijking. Dat de meetpunten goed reageerden op een veranderde situatie, bleek met het vergroten van de golfhoogte. Hierbij zakte het waterpeil over het gehele model, waarvan in figuur 5.3.1 proef 4 als voorbeeld is uitgezet. Deze daling van het waterpeil kan ontstaan door een opzet tegen het talud en een wave-set down in het gedeelte met constante diepte. Deze veranderingen voldoen niet aan de vergelijkingen die hiervoor op zee zijn opgesteld, omdat er in de golfbak slechts een beperkte hoeveelheid water aanwezig is en randverschijnselen een sterke invloed hebben.

In proeven serie 6 waar de waterstand gelijk was aan die in serie 1 en in serie 5, maar de stroomsnelheid ongeveer de helft was, was het

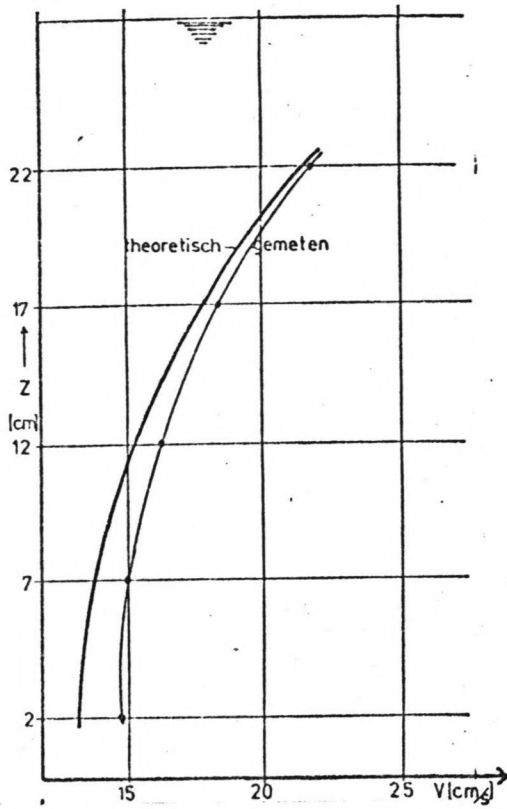
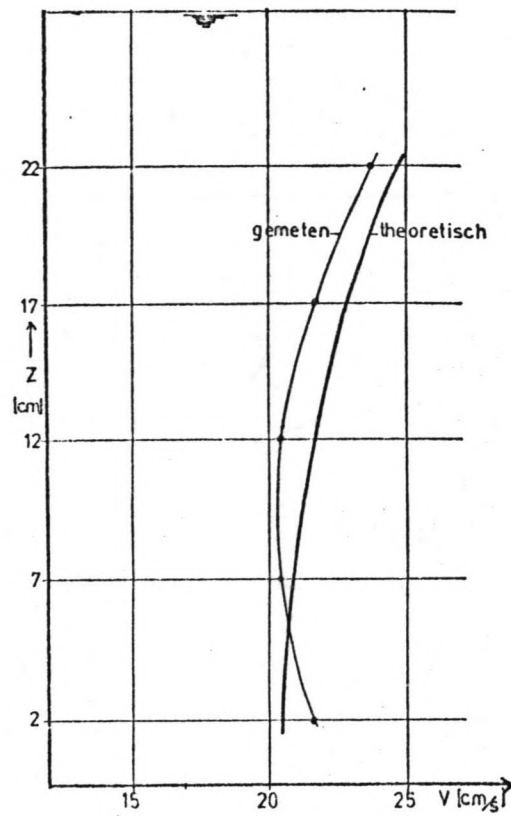
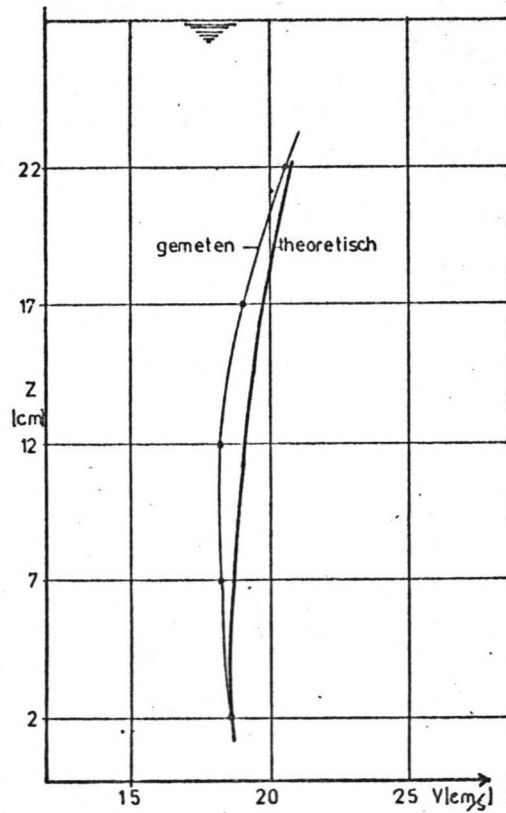
PROEF A  $Q=0$   $H=7,4\text{cm}$ .PROEF B  $Q=0$   $H=8,4\text{cm}$ .PROEF C  $Q=0$   $H=6,4\text{cm}$ .

Fig.5.2.1 - Vergelijking amplitude orbitaalsnelheid, theoretisch en opgemeten.



Fig.5.2.2 - Schrijveruitvoer van de orbitaalsnelheid, gemeten met een micro-molen.

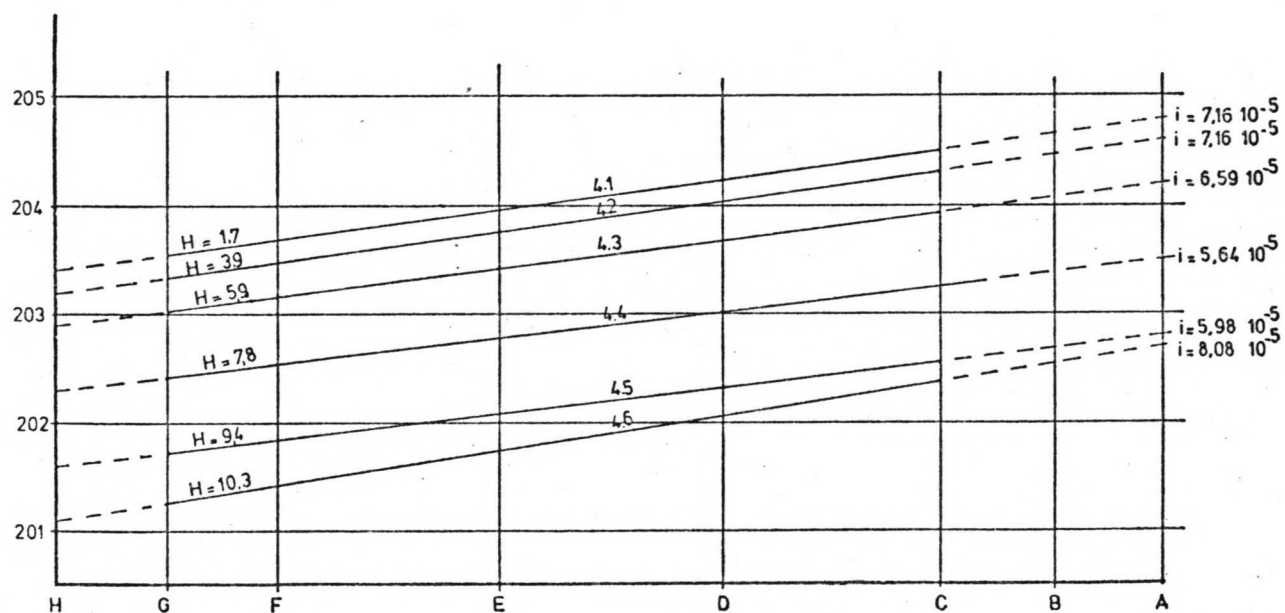


Fig.5.3.1 - Verandering van het waterniveau, onder invloed van toenemende golfhoogte (proef 4.1 t/m 4.6).

verhang ook meer dan de helft kleiner. Wat ook te verwachten was, omdat:

$$\tau_b = \rho g h i \quad 5.3.1$$

en eveneens 
$$\tau_b = C_p V^2 \quad 5.3.2$$

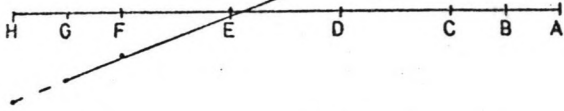
Hieruit volgt 
$$i = \frac{C_p V^2}{g h} \quad 5.3.3$$

Zodat het verhang in de situatie zonder golven volgens deze benadering evenredig met de snelheid in het kwadraat is.

Ondanks de nauwkeurigheid van de metingen variëerden de gemeten peilen in een raai toch nog met ongeveer  $\pm 0,2$  mm. van het gemiddelde. Dit zal niet alleen zijn ontstaan door meetfouten, maar ook door verschillen van de waterpeilen in een raai. Deze kunnen zijn ontstaan door het niet perfect uniforme stroombeeld en een niet gelijk golfveld over het gehele model. Echter ondanks deze afwijkingen moeten de gemeten verhangen toch betrouwbaar worden geacht. Aangezien voor het peil in een raai een gemiddelde van 3 waterpeilen uit de raai is genomen. Door het peil van 5 raaien is met lineaire regressie (kleinste kwadraten methode) een lijn bepaald die het minst van de punten afwijkt, deze lijn vormt de verhanglijn (zie 3.2). Het voordeel van deze methode is dat een afwijking van een waterpeil in een raai slechts een kleine variatie in het verhang geeft.

Als voor alle proeven deze benadering op papier uitgezet wordt (fig. 5.3.2) valt op dat de meeste punten niet meer dan 0,1 mm. van de geregresseerde lijn afluigen. Wat door de meetfout kan zijn ontstaan. Verder valt in dit figuur op, dat het waterpeil in raai H dicht bij de verhanglijn ligt, ondanks dat deze raai dicht bij de uitstroming ligt en daardoor randinvloeden zou kunnen ondervinden. Visueel zag het golfveld bij raai H er ook tamelijk ongestoord uit. Dit was niet het geval bij de raaien A en B, waar de randinvloeden duidelijk zichtbaar waren. Uit het gemiddelde van de raaien A en B blijkt ook dat deze niet goed op de verhanglijn liggen. De peilen binnen de raaien A en B verschillen ook sterk, wat dus ook nog de sterke randinvloeden van de instroming en de wanden aantoont.

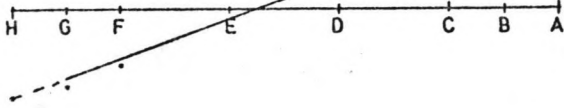
PROEF 1.0

 $Q=Q_{\max}$   $H=0,0$  cm $i=9,2 \cdot 10^{-5}$ 

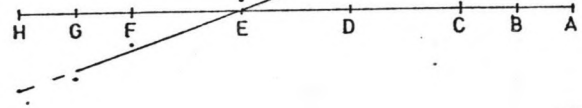
PROEF 2.0

 $Q=\frac{1}{2}Q_{\max}$   $H=0,0$  cm $i=7,2 \cdot 10^{-5}$ 

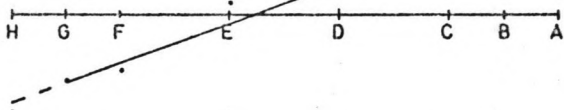
PROEF 1.1

 $Q=Q_{\max}$   $H=7,4$  cm $i=9,0 \cdot 10^{-5}$ 

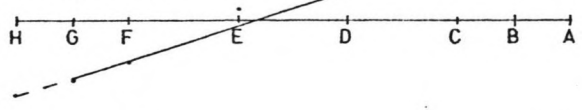
PROEF 2.1

 $Q=\frac{1}{2}Q_{\max}$   $H=6,3$  cm $i=8,8 \cdot 10^{-5}$ 

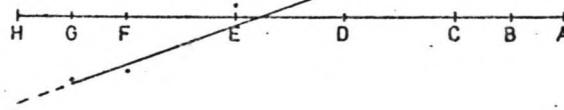
PROEF 1.2

 $Q=Q_{\max}$   $H=8,4$  cm $i=11,3 \cdot 10^{-5}$ 

PROEF 2.2

 $Q=\frac{1}{2}Q_{\max}$   $H=7,3$  cm $i=7,9 \cdot 10^{-5}$ 

PROEF 1.3

 $Q=Q_{\max}$   $H=6,9$  cm $i=8,9 \cdot 10^{-5}$ 

PROEF 2.3

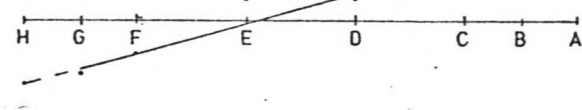
 $Q=\frac{1}{2}Q_{\max}$   $H=6,8$  cm $i=6,8 \cdot 10^{-5}$ 

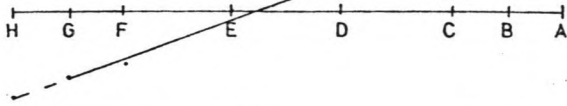
Fig.5.3.2<sup>I</sup> - Het verhang benaderd met behulp van lineaire regressie door de gemeten waterniveau's. Proevenseries 1 en 2.



PROEF 3.0

$$Q = \frac{3}{4}Q_{\max} \quad H = 0,0 \text{ cm}$$

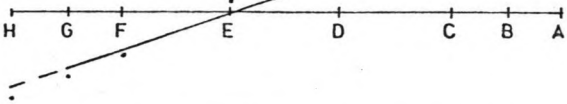
$$i = 8,9 \cdot 10^{-5}$$



PROEF 3.1

$$Q = \frac{3}{4}Q_{\max} \quad H = 7,6 \text{ cm}$$

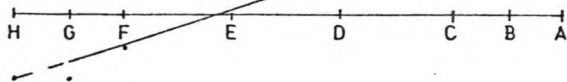
$$i = 8,2 \cdot 10^{-5}$$



PROEF 3.2

$$Q = \frac{3}{4}Q_{\max} \quad H = 7,1 \text{ cm}$$

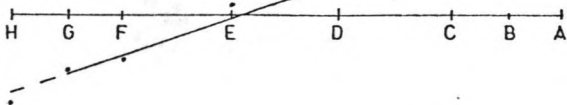
$$i = 7,9 \cdot 10^{-5}$$



PROEF 3.3

$$Q = \frac{3}{4}Q_{\max} \quad H = 6,8 \text{ cm}$$

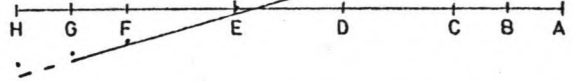
$$i = 8,3 \cdot 10^{-5}$$



PROEF 4.1

$$Q = \frac{1}{2}Q_{\max} \quad H = 1,7 \text{ cm}$$

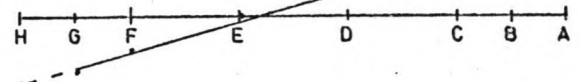
$$i = 7,2 \cdot 10^{-5}$$



PROEF 4.2

$$Q = \frac{1}{2}Q_{\max} \quad H = 3,9 \text{ cm}$$

$$i = 7,2 \cdot 10^{-5}$$



PROEF 4.3

$$Q = \frac{1}{2}Q_{\max} \quad H = 5,9 \text{ cm}$$

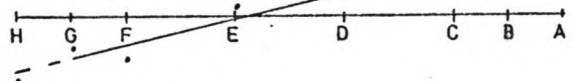
$$i = 6,6 \cdot 10^{-5}$$



PROEF 4.4

$$Q = \frac{1}{2}Q_{\max} \quad H = 7,8 \text{ cm}$$

$$i = 5,6 \cdot 10^{-5}$$



PROEF 4.5

$$Q = \frac{1}{2}Q_{\max} \quad H = 9,4 \text{ cm}$$

$$i = 6,0 \cdot 10^{-5}$$



PROEF 4.6

$$Q = \frac{1}{2}Q_{\max} \quad H = 10,3 \text{ cm}$$

$$i = 8,1 \cdot 10^{-5}$$

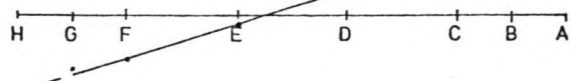
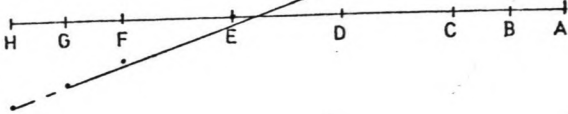


Fig.5.3.2<sup>II</sup> - Het verhang benaderd met behulp van lineaire regressie door de gemeten waterniveau's. Proevenseries 3 en 4.

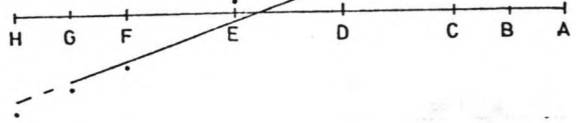
## PROEF 5.0

Q=Qmax H=0,0 cm

 $i=8,9 \cdot 10^{-5}$ 

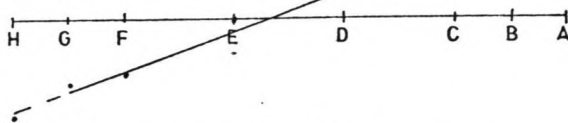
## PROEF 5.5

Q=Qmax H=3,9 cm

 $i=9,4 \cdot 10^{-5}$ 

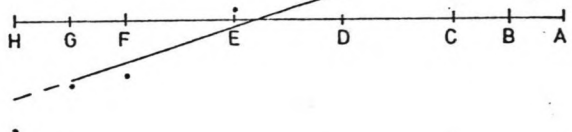
## PROEF 5.1

Q=Qmax H=3,9 cm

 $i=8,9 \cdot 10^{-5}$ 

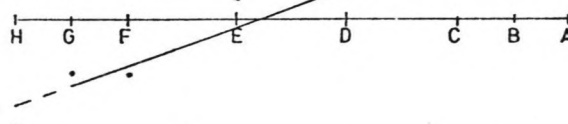
## PROEF 5.6

Q=Qmax H=7,8 cm

 $i=8,3 \cdot 10^{-5}$ 

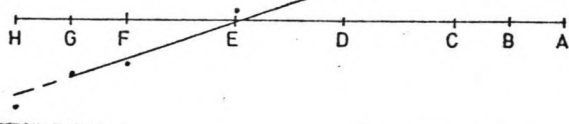
## PROEF 5.2

Q=Qmax H=9,4 cm

 $i=7,2 \cdot 10^{-5}$ 

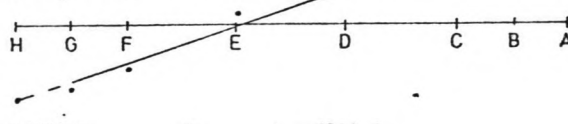
## PROEF 5.7

Q=Qmax H=3,9 cm

 $i=8,6 \cdot 10^{-5}$ 

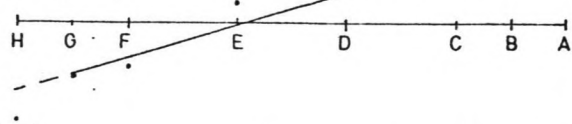
## PROEF 5.3

Q=Qmax H=3,9 cm

 $i=8,8 \cdot 10^{-5}$ 

## PROEF 5.8

Q=Qmax H=8,1 cm

 $i=7,7 \cdot 10^{-5}$ 

## PROEF 5.4

Q=Qmax H=9,4 cm

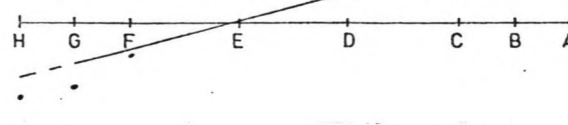
 $i=6,7 \cdot 10^{-5}$ 

Fig.5.3.2<sup>III</sup> - Het verhang benaderd met behulp van lineaire regressie door de gemeten waterniveau's. Proevenserie 5.

PROEF 6.0

 $Q = \frac{1}{2} Q_{\max}$   $H = 0,0$  cm $i = 3,0 \cdot 10^{-5}$ 

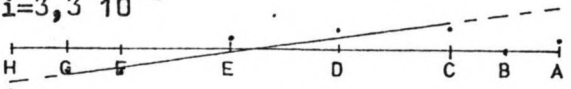
PROEF 6.4

 $Q = \frac{1}{2} Q_{\max}$   $H = 3,7$  cm $i = 3,9 \cdot 10^{-5}$ 

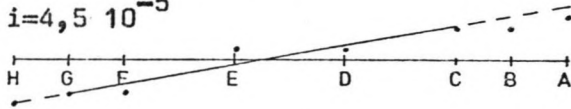
PROEF 6.1

 $Q = \frac{1}{2} Q_{\max}$   $H = 4,0$  cm $i = 3,9 \cdot 10^{-5}$ 

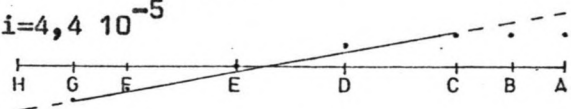
PROEF 6.5

 $Q = \frac{1}{2} Q_{\max}$   $H = 7,4$  cm $i = 3,3 \cdot 10^{-5}$ 

PROEF 6.2

 $Q = \frac{1}{2} Q_{\max}$   $H = 7,8$  cm $i = 4,5 \cdot 10^{-5}$ 

PROEF 6.6

 $Q = \frac{1}{2} Q_{\max}$   $H = 4,6$  cm $i = 4,4 \cdot 10^{-5}$ 

PROEF 6.3

 $Q = \frac{1}{2} q_{\max}$   $H = 0,0$  cm $i = 3,0 \cdot 10^{-5}$ 

PROEF 6.7

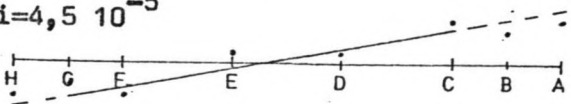
 $Q = \frac{1}{2} Q_{\max}$   $H = 11,8$  cm $i = 4,5 \cdot 10^{-5}$ 

Fig.5.3.2<sup>IV</sup> - Het verhang benaderd met behulp van lineaire regressie door de gemeten waterniveau's. Proevenserie 6.

Uit de resultaten van de metingen valt op dat er geen direkt verband valt te constateren tussen een opgewekt golfveld en een optredend verhang. Dit is juist zo opvallend omdat Bijker (1967) juist wel vond dat een optredend golfveld het verhang vergrootte.

#### 5.4 Bodemwrijving

In hoofdstuk 4.3 zijn twee methoden besproken om de bodemwrijving op theoretische wijze te bepalen. Bij de eerste methode worden de orbitaalsnelheid en de langsstromingssnelheid net buiten de grenslaag gecombineerd waarbij wordt aangenomen dat de langsstromingssnelheid over de gehele diepte constant is. De bodemschuifspanning is dan:

$$\tau_{b y cw} = C\rho V^2 f(\theta, \frac{u}{V}) \quad 5.4.1$$

waarin de indices de volgende betekenis hebben:

- b = nabij de bodem
- y = in y -richting
- c = met stroming (current)
- w = met golven (waves)

Bij de methode van Bijker (1967) wordt de orbitaalsnelheid en de langsstromingssnelheid in de grenslaag gecombineerd op een hoogte  $z'$  boven de bodem. De bodemschuifspanning wordt dan:

$$\tau_{b y cw} = C\rho V^2 f(\theta, \xi \frac{u}{V}) \quad 5.4.2$$

Door nu eerst de bodemschuifspanning bij alleen stroming te berekenen en dit vervolgens bij de situatie met stroming en golven te doen kan de invloed van het golfveld op de bodemwrijving door langsstroming bepaald worden. De bodemschuifspanning bij alleen stroming kan geschreven worden als:

$$\tau_{b y c} = C\rho V^2 \quad 5.4.3$$

Voor de eerste methode kan de verandering van de bodemschuifspanning door een golfveld nu met behulp van formule 5.4.1 en 5.4.3 geschreven worden als:

$$\frac{\tau_{b y c w}}{\tau_{b y c}} = \frac{C_{\rho} V^2 f(\theta, \frac{u}{V^m})}{C_{\rho} V^2} = f(\theta, \frac{u}{V^m}) \quad 5.4.4$$

Voor de methode van Bijker levert dit:

$$\frac{\tau_{b y c w}}{\tau_{b y c}} = \frac{C_{\rho} V^2 f(\theta, \xi \frac{u}{V^m})}{C_{\rho} V^2} = f(\theta, \xi \frac{u}{V^m}) \quad 5.4.5$$

Voor de experimenten kan de bodemschuifspanning bij alleen langsstroming geschreven worden als:

$$\tau_{b y c} = \rho g h i_c \quad 5.4.6$$

Voor de experimenten met een combinatie van stroming en golven wordt dit:

$$\tau_{b y c w} = \rho g h i_{c w} \quad 5.4.7$$

Zodat ook voor de experimenten de verandering van de bodemwrijving door een golfveld nu geschreven kan worden als:

$$\frac{\tau_{b y c w}}{\tau_{b y c}} = \frac{\rho g h i_{c w}}{\rho g h i_c} = \frac{i_{c w}}{i_c} \quad 5.4.8$$

In tabel 1 zijn 5.4.4, 5.4.5 en 5.4.8 voor alle proeven uitgerekend.

Door nu de theoretisch berekende waarden van 5.4.4 en 5.4.5 te vergelijken met de resultaten van de proeven uit formule 5.4.8 kan bekeken worden hoe goed de twee theoriën de werkelijkheid benaderen.

Uit de experimenten is naar voren gekomen dat het verhang gemiddeld niet wordt beïnvloed door een golfveld. Dit zou er op duiden dat een golfveld de bodemschuifspanning niet vergroot. De eerste methode voor-

spelt een kleine toename van de bodemschuifspanning bij een combinatie van golven en stroming. De methode van Bijker daarentegen voorspelt een veel grotere toename.

Bij deze experimenten is er gemiddeld over alle proeven helemaal geen toename van de bodemschuifspanning geconstateerd. Hieruit volgt dat de resultaten van beide theorieën niet overeenkomen met de resultaten die uit de experimenten volgen.

De eerste methode komt vaak dichter in de buurt van de experimentele resultaten omdat deze methode ook slechts kleine toenames van bodemschuifspanning voorspelt. Echter deze methode voorspelt ook altijd een toename van de bodemschuifspanning die er niet gemeten is. De methode van Bijker voorspelt nog grotere toenames en wijkt daarom nog meer van de experimentele resultaten af.

Een verklaring hiervoor kan zijn dat de huidige proeven zijn uitgevoerd met een glad afgestreaken betonbodem, terwijl Bijker zijn proeven met een bodem van zand of grind uitvoerde. Bij een zandbodem zal de beddingvorm veranderen onder invloed van een golfveld. Bij een verandering van een golfveld is het dus mogelijk dat behalve een bepaalde golfparameter ook de beddingvorm verandert. Het gevolg hiervan is dan dat het niet meer duidelijk is door welke verandering (die van de golfparameter of die van de beddingvorm) de bodemschuifspanning verandert is. Bij een gladde betonbodem echter zal de beddingvorm niet kunnen veranderen. Zolang er altijd maar één parameter verandert, is altijd bekend waardoor een verandering in de bodemschuifspanning veroorzaakt wordt.

Een andere verklaring voor het afwijken van de theoretische en de experimentele waarden kan veroorzaakt worden doordat de theorie er van uitgaat dat de orbitaalsnelheid en de langsstroomsnelheid onafhankelijk van elkaar zijn, zodat ze in een bepaald vlak opgeteld kunnen worden.

Er zijn nog nooit metingen gedaan om te zien hoe langsstroming en orbitaalsnelheid, door loodrecht op de stroom invallende golven,

elkaar beïnvloeden. Zo gaat Bijker er van uit dat het logaritmische snelheidsprofiel van de langsstroming volledig hetzelfde blijft onder golfvelden met verschillende invalshoeken. Bij aanvullende metingen met in ontwikkeling zijnde Laser-Doppler apparatuur (hoofdstuk 6) is bij deze proeven gebleken dat de langsstroming wel degelijk beïnvloed kan worden door een golfveld.

Een andere mogelijkheid voor het niet overeenkomen van de theorie met de experimenten kan zijn dat de bodemwrijving zich niet verhoudt als de verhangen, door bijvoorbeeld veranderingen in het stroombeeld bij een situatie met golven. Dit zal nader onderzocht moeten worden door stroomsnelheidsmetingen uit te voeren bij de combinatie van stromingen en golven.

## 6. AANVULLENDE METINGEN MET IN ONTWIKKELING ZIJNDE APPARATUUR.

### 6.1 Inleiding

De nu bestaande apparatuur om watersnelheden te meten, zoals bijvoorbeeld de micro-molen, heeft een aantal beperkingen. Zoals dat er niet dicht (minder dan ongeveer 2 cm.) bij de bodem gemeten kan worden en dat de stroming slechts uit een constante richting moet komen om betrouwbare metingen te kunnen doen.

Het Waterloopkundig Laboratorium te Delft heeft echter op het ogenblik apparatuur in ontwikkeling om, zonder verstoringen, snelheden in 2 richtingen tegelijkertijd te kunnen meten. Twee van deze apparaten, die nog prototypes waren, zijn gedurende een korte periode voor dit onderzoek beschikbaar geseest. Zodat tijdens enkele proeven de stroom- en de orbitaalsnelheid tegelijkertijd gemeten konden worden. Dit bood voor het W.L. ook de mogelijkheid om de bruikbaarheid van deze apparatuur in een golfbak met stroming en loodrecht invallende golven te kunnen uitproberen.

Omdat de apparatuur slechts voor een zeer korte periode beschikbaar was, zijn er maar een beperkt aantal metingen mee uitgevoerd. En omdat de apparatuur nog in ontwikkeling was, zodat de betrouwbaarheid nog niet precies bekend was, zijn de resultaten van deze proeven buiten de berekeningen en analyses van het totale onderzoek gehouden.

### 6.2 Onderdompelbare Laser-Doppler snelheidsmeter

De onderdompelbare Laser-Doppler snelheidsmeter (LDS) is gebaseerd op de bestaande Laser-Doppler snelheidsmeter die in golfgoten, met glazen wanden, al veel wordt gebruikt. In een golfbak is de bestaande Laser-Doppler apparatuur niet bruikbaar zonder allerlei voorzieningen te treffen.

De door het W.L. ontwikkelde LDS bestaat uit een laserbuis welke laserstralen uitzend die via een spiegeltje, 7 centimeter lager,



teruggekaatst worden (fig.6.2.1), dit geheel bevindt zich onder water. Door frekwentieverschil te meten tussen uitgezonden en teruggekaatst laser licht, veroorzaakt door het Doppler effect, kan nu twee loodrecht op elkaar staande snelheden in het platte vlak gemeten worden, de snelheid in de langsrichting en de snelheid in de dwarsrichting. Het punt waar de snelheden gemeten worden, bevindt zich tussen de lichtbron en het spiegeltje in, zodat de snelheid ook niet dichter dan vier centimeter vanaf de bodem gemeten kan worden. Omdat de sensoren van de laserstralen onder water moeten zijn tijdens het meten, kan er ook niet te dicht onder het wateroppervlak gemeten kan worden.

Met de LDS zijn de vier proeven uit de eerste serie gedaan, dus met verschillende golfperiodes, ongeveer gelijke golfhoogte, maximaal debiet en geen extra opstuwning. De eerste proef was met alleen stroming (proef 1.0). Deze metingen waren ook al gedaan met de micro-molen, zodat de resultaten van de metingen met de micro-molen en van de metingen met de LDS vergeleken kunnen worden (tabel 6.2.1). Het blijkt nu dat de resultaten zeer weinig van elkaar af liggen, met een maximum van vijf procent.

De 3 situaties waarin gemeten is met golven zijn:

- Proef 1.1 met golfperiode 0,96 sec. en golfhoogte  $H = 7,4$  cm.
- Proef 1.2 met golfperiode 1,42 sec. en golfhoogte  $H = 8,4$  cm.
- Proef 1.3 met golfperiode 1,90 sec. en golfhoogte  $H = 6,9$  cm.

De verticale snelheidsverdeling van deze proeven in 5 punten van een raai, zijn uitgezet tegen de snelheidsverdeling in de situatie zonder golven (fig.6.2.2 t/m 4). Uit deze figuren zijn een aantal conclusies te trekken:

- De vorm van de verticale snelheidsverdeling wordt nauwelijks beïnvloed door golven. In een aantal gevallen is de snelheid bij de bodem met golven relatief wat groter dan in de situatie zonder golven.
- In de situatie van stroming zonder golven neemt de snelheid in de stroomrichting toe, maar in de situatie van stroming met golven neemt de snelheid juist in de stroomrichting af. Dit is een effect wat in de berekeningen van de bodemschuifspanning (4.3.47) de ver-

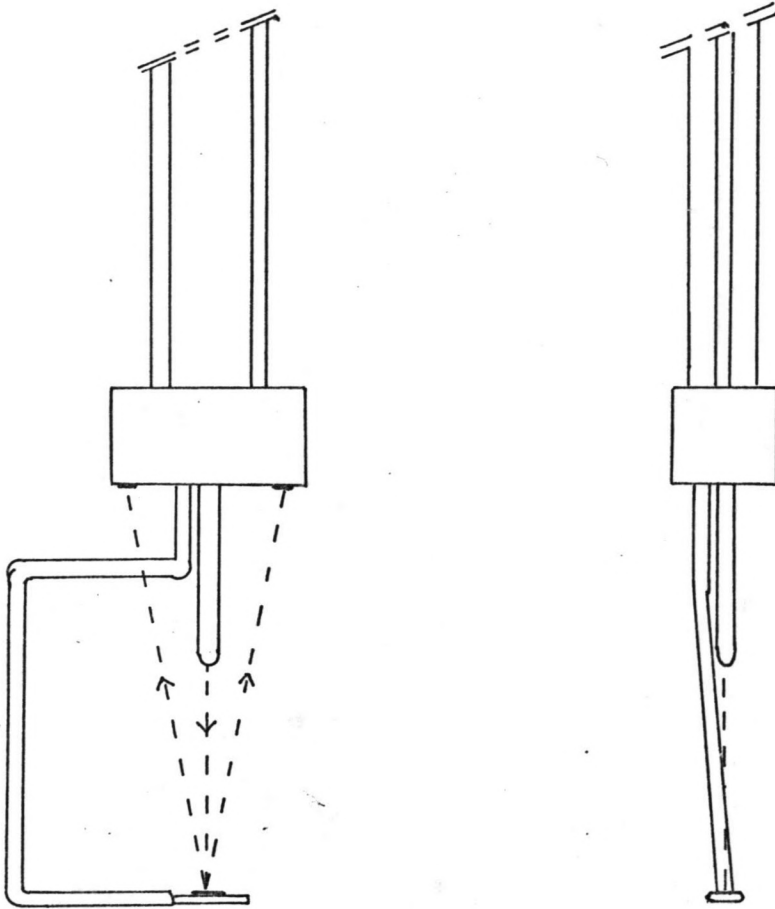


Fig.6.2.1. - Onderdompelbare Laser-Doppler snelheidsmeter (LDS).  
 schaal 1 : 2

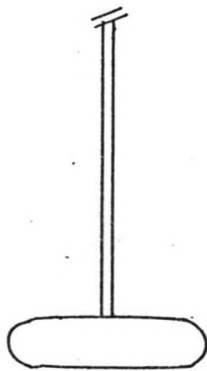


Fig.6.3.1 - Elektromagnetische snelheidsmeter (EMS).  
 schaal 1 : 2

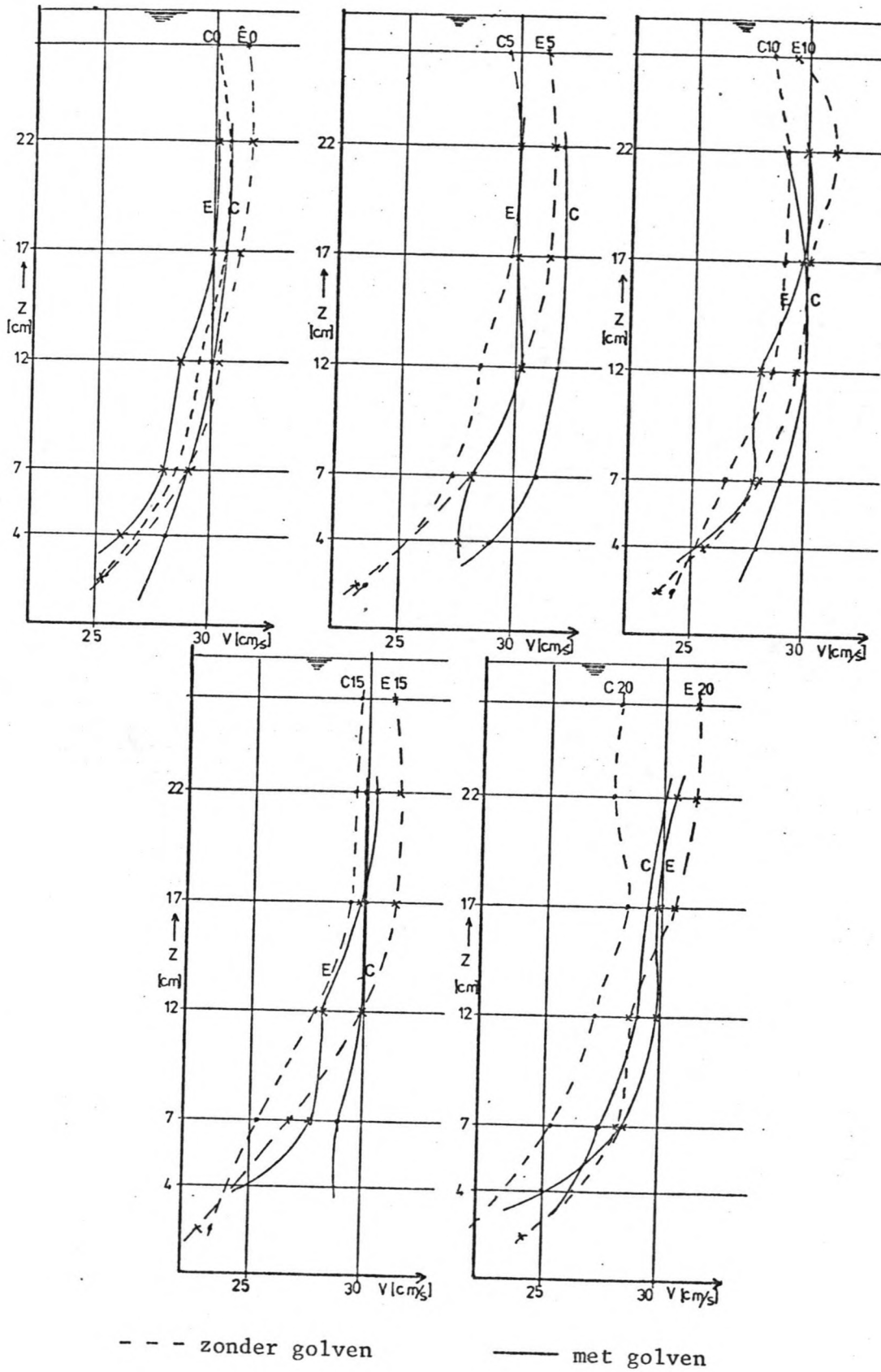


Fig.6.2.2 - Vergelijking verticale snelheidsverdeling, gemeten in de situatie zonder golven (proef 1.0, micro-molen) en in de situatie met golven (proef 1.1, LDS).

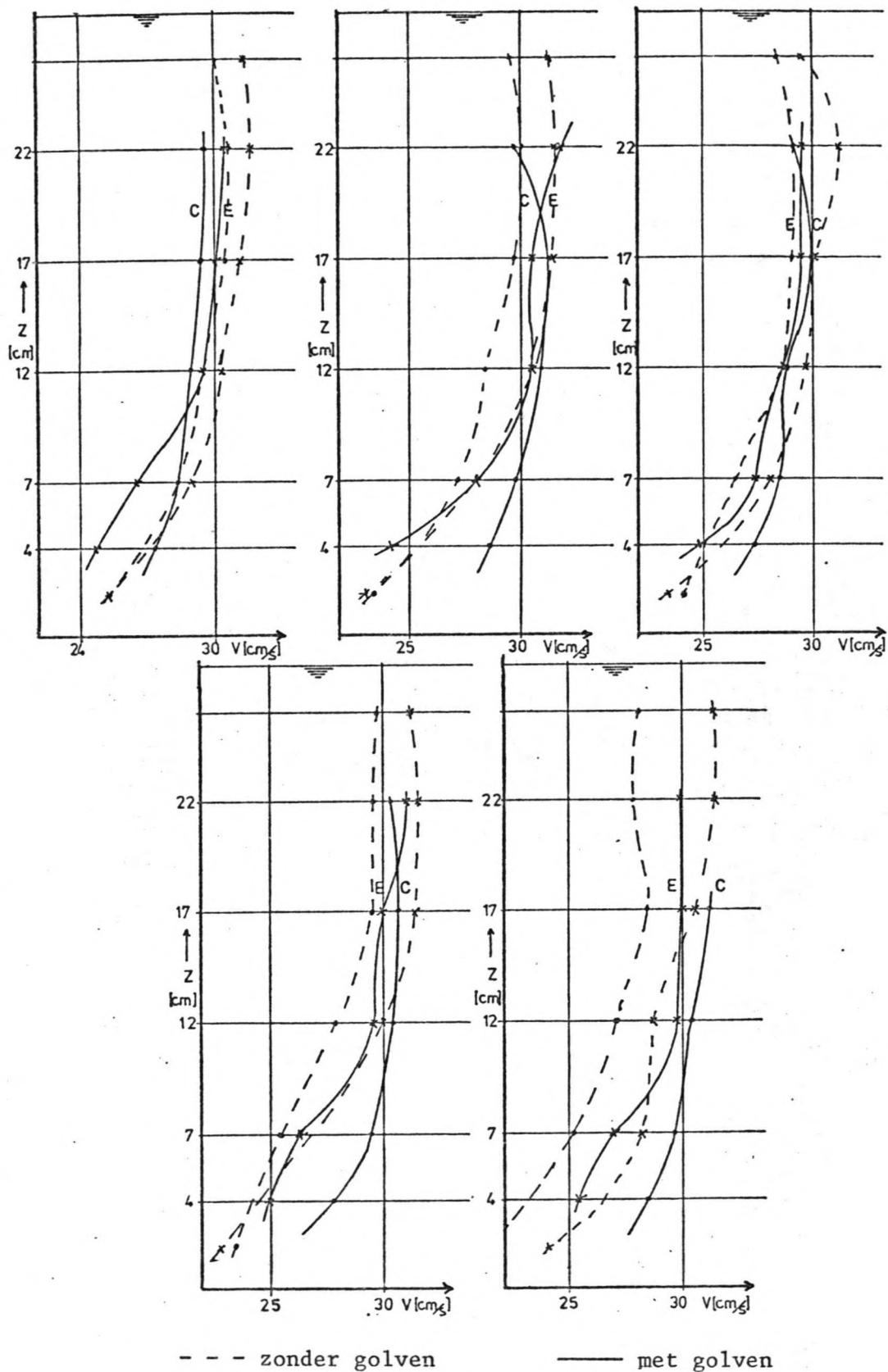


Fig.6.2.3 - Vergelijking verticale snelheidsverdeling, gemeten in de situatie zonder golven (proef 1.0, micro-molen) en in de situatie met golven (proef 1.2, LDS).

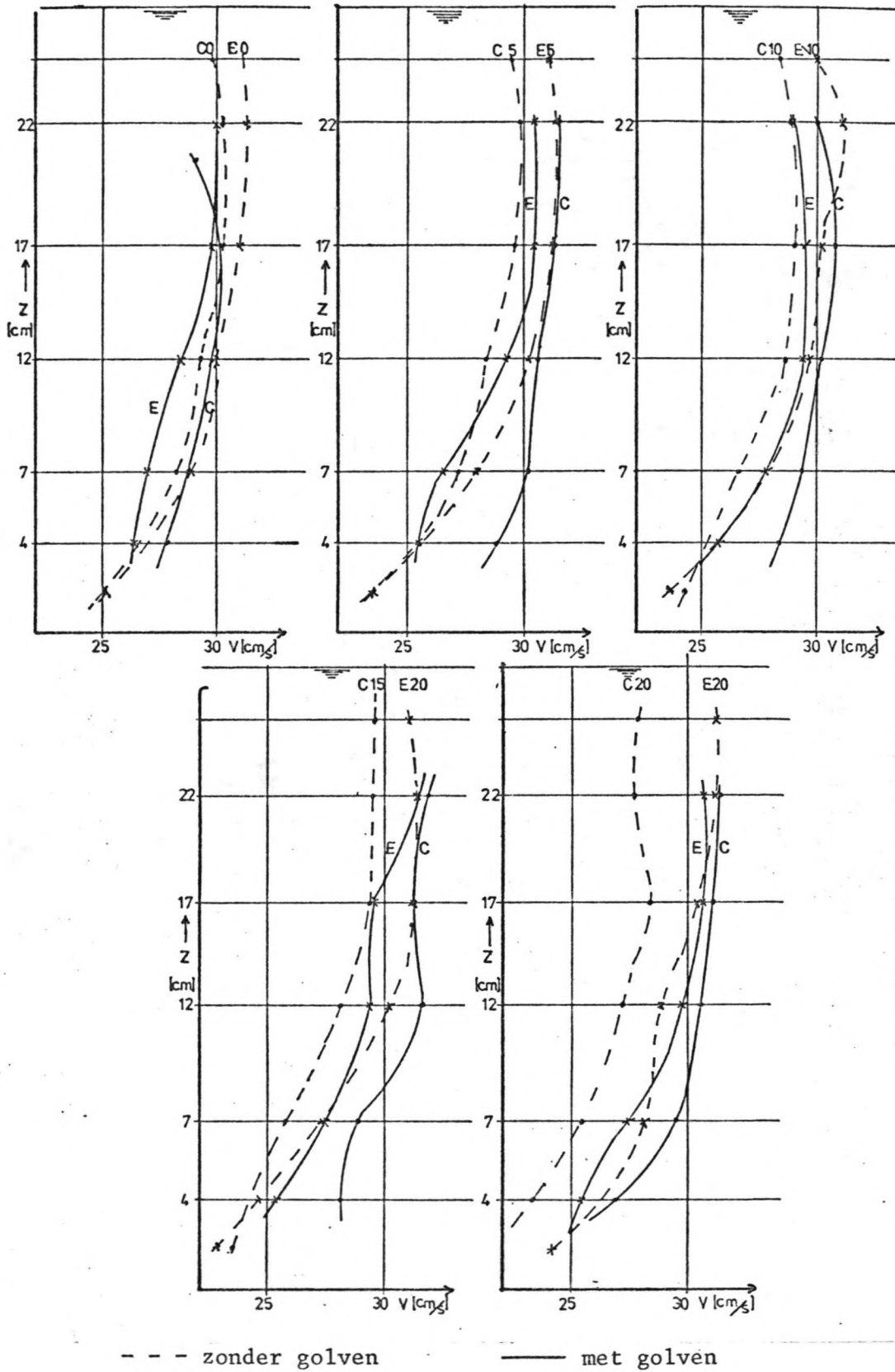


Fig.6.2.4 - Vergelijking verticale snelheidsverdeling, gemeten in de situatie zonder golven (proef 1.0, micro-molen) en in de situatie met golven (proef 1.3, LDS).

snellingsterm zal veranderen en daardoor gevolgen heeft voor de berekeningen van de verandering van de bodemschuifspanning door golven.

Het is mogelijk dat dit effect alleen in de golfbak ontstaat en niet onder natuurlijke omstandigheden.

- Bij deze verandering van de snelheden blijven de snelheden in raai E ongeveer gelijk, echter de snelheden in raai C nemen toe onder invloed van golven.

Z (cm)	X = 2,0		X = 3,0		X = 4,0		X = 5,0		X = 6,0	
	M-M	LDS	M-M	LDS	M-M	LDS	M-M	LDS	M-M	LDS
21	30,6	28,9	29,4	28,6	29,1	27,9	29,5	29,2	27,8	27,7
17	30,5	29,3	29,7	29,4	29,0	27,5	29,4	28,8	28,5	27,7
12	29,4	29,3	28,3	29,9	28,6	28,1	28,0	28,7	27,1	27,2
7	28,5	29,3	27,2	29,1	26,5	27,1	25,4	26,6	25,5	25,4
4	--	27,7	--	26,5	--	24,2	--	25,2	--	25,0

Stroomsnelheden gemeten in proef 1.0, raai C, met micro-molen en Laser-Doppler snelheidsmeter.

Z (cm)	X = 2,0		X = 3,0		X = 4,0		X = 5,0		X = 6,0	
	M-M	LDS	M-M	LDS	M-M	LDS	M-M	LDS	M-M	LDS
21	31,6	31,4	31,5	32,0	31,4	30,0	31,5	31,2	31,4	31,6
17	31,1	30,6	31,4	31,8	29,9	29,8	31,5	31,6	30,7	30,8
12	30,0	30,6	30,3	31,2	29,6	28,5	30,2	29,1	28,8	29,6
7	29,1	28,3	28,0	29,5	27,9	27,5	27,0	28,1	28,2	26,7
4	--	27,2	--	26,8	--	25,2	--	26,6	--	26,2

Stroomsnelheden gemeten in proef 1.0, raai E, met micro-molen en Laser-Doppler snelheidsmeter.

Tabel 6.2.1

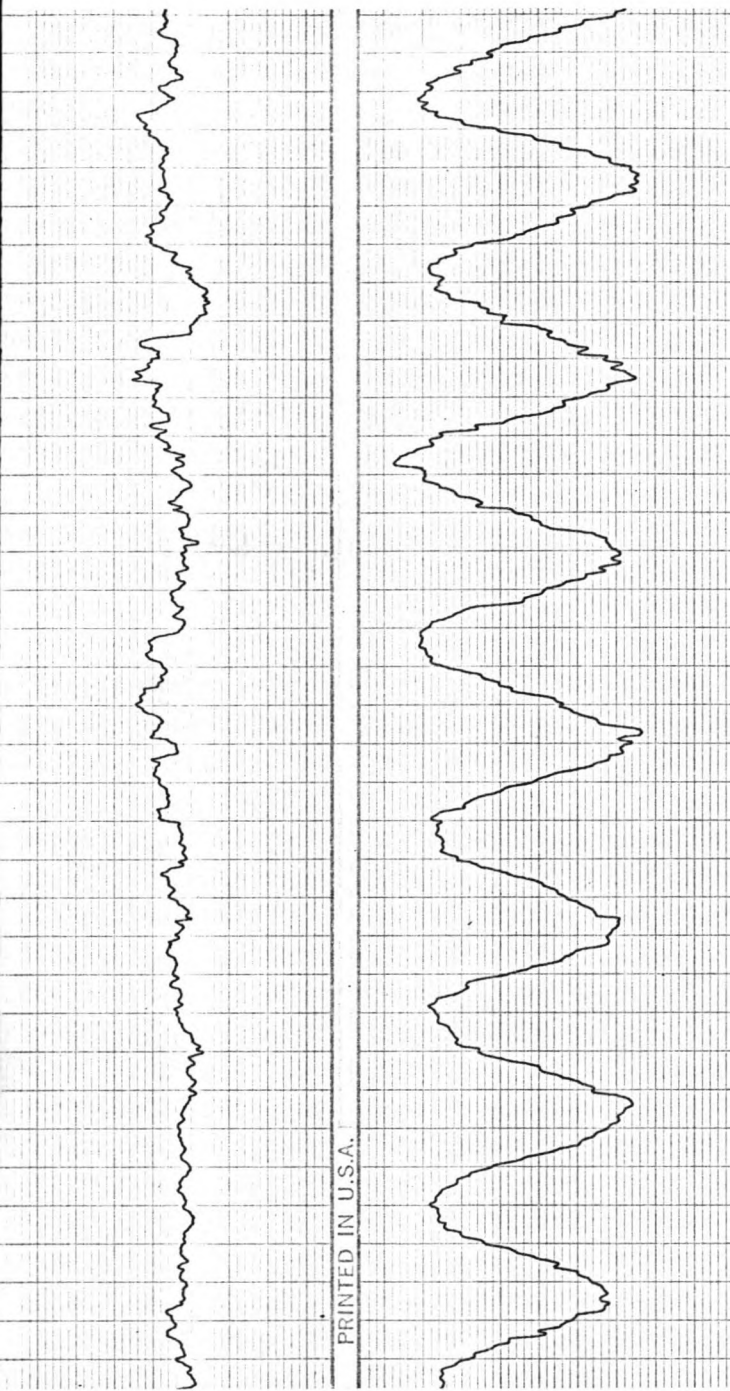
### 6.3 Elektromagnetische snelheidsmeter

De elektromagnetische snelheidsmeter (EMS) die het W.L. in ontwikkeling heeft is een kleine schijf, met een diameter van ongeveer 5 centimeter en een dikte van ongeveer 1,5 centimeter, dat aan een staafje is bevestigd waarmee het onder water gebracht kan worden (zie fig.6.3.1). Doordat het stromende water een elektrische veld in het schijfje induceert, kunnen de snelheden in 2 richtingen van het platte vlak gemeten worden.

De EMS kan net als de LDS niet dicht bij de bodem meten, doordat er dan tussen de bodem en het schijfje een contractie ontstaat waardoor de stroomsnelheid toeneemt en de metingen sterk beïnvloed worden. De EMS kan echter wel dicht bij het wateroppervlak meten als de LDS.

De EMS was voor dit onderzoek slechts een halve dag beschikbaar zodat er weinig resultaten zijn. Als de meetresultaten die verkregen zijn met de EMS vergeleken worden met die van de LDS (fig.6.3.1) valt op dat in grote lijn de resultaten gelijk zijn, maar dat de EMS een veel "rommeliger" beeld geeft, wat mogelijk ontstaat door de grotere verstoringen in het stroombeeld die de EMS door zijn vorm veroorzaakt. Verder bleek dat bij de metingen over de vertikaal de resultaten ook minder goed voldeden aan de theorie dan bij de metingen met de LDS.

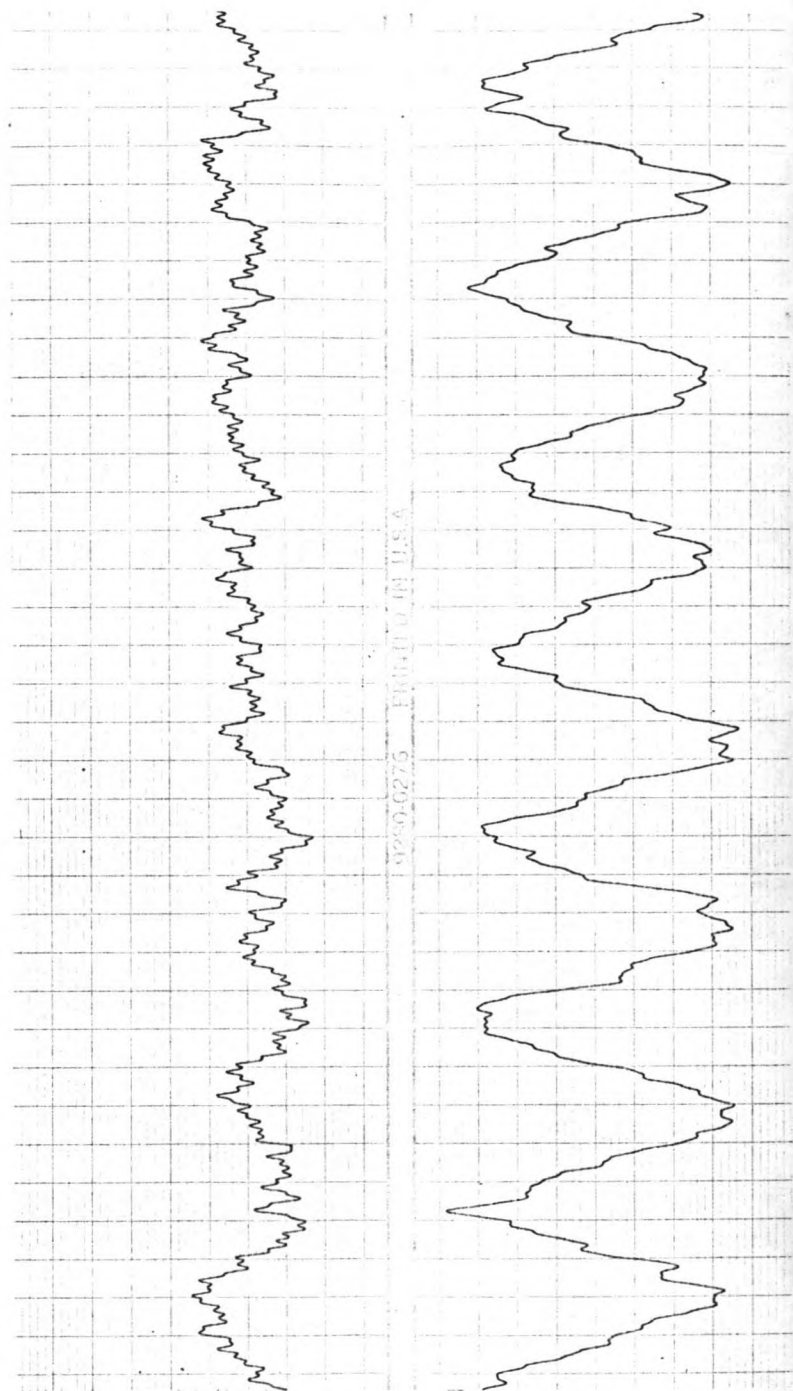
Door het beperkt aantal metingen en de ook op het eerste gezicht niet betere resultaten dan met de LDS, hebben we de resultaten van de metingen met EMS ook niet verder beschouwd.



stroomsnelheid

orbitaalsnelheid

Metingen met LDS



stroomsnelheid

orbitaalsnelheid

Metingen met EMS

Schaal : Horizontaal  $1\text{cm} \Delta 10\text{cm/s}$ .  
 Vertikaal  $1\text{cm} \Delta 0,4\text{cm/s}$ .

Fig.6.3.2 - Vergelijking resultaten van metingen met de LDS en de EMS,  
 proef 1.1.



## 7. CONCLUSIES

- De gemeten verhangen zijn van grote invloed op de resultaten van het onderzoek.
- Vanwege de zeer kleine waterstandsverschillen die gemeten moesten worden, is de instelling van een uniform stroombeeld van zeer groot belang.  
Niet uniformiteit geeft grote verstoringen op de resultaten.
- Loodrecht invallende golven op langsstroming geven geen duidelijke vergroting van het verhang, zoals Bijker (1967) wel vond.
- De theorie dat de bodemschuifspanning vergroot onder invloed van een golfveld loodrecht op een langsstroming, wordt met de uitgevoerde proeven niet aangetoond.
- Voor het bepalen van het verhang en om inzicht te krijgen in verstoringen in het model, bleek het noodzakelijk om van vele meetpunten gebruik te maken.

## 8. AANBEVELINGEN.

- Het is van groot belang dat er veel aandacht wordt besteed aan het verkrijgen van een uniform stroombeeld in het model.  
De volgende verbeteringen zijn hiervoor in overweging te nemen:
  1. De in- en uitstroming tot over de gehele breedte van het model te laten doorlopen.
  2. Het debiet zo snel mogelijk goed over de breedte te verdelen door ook op de eerste overlaat verstelbare schotten te plaatsen.
  3. De schotten van de tweede overlaat beter instelbaar te maken door kleinere eenheden.
  4. Bekijken of het zinvol is om extra maatregelen te nemen om de turbulentie te verkleinen, bijvoorbeeld door extra holle gaten stenen of gaas aantebrengeen.
  5. De stroomsnelheden dichter bij het golfschot te meten dan tot nu toe is gebeurd.
  6. De overlaat bij de instroming en het muurtje bij de uitstroming zo in te stellen dat het stroombeeld nog beter uniform is.
  
- Met behulp van een snelheidsmeter welke in twee richtingen in het platte vlak snelheden kan meten, de invloed te bekijken van golven op een uniform stroombeeld. Dit zowel in langs- en dwarsrichting als over de vertikaal.
  
- Er moet geprobeerd worden een meetopstelling te ontwerpen waarmee het mogelijk is om snelheden vlakbij de bodem te meten omdat deze juist van belang zijn bij bodemwrijvingsprocessen.
  
- Het verdient aanbeveling om bij verdere proeven het gedrag, onder verschillende omstandigheden, van het fijne sediment wat zich in het systeem bevindt, vast te leggen.
  
- Vervolg proeven moeten worden uitgevoerd met een zandbodem. Deze proeven dienen zo te worden uitgevoerd dat de resultaten goed vergeleken kunnen worden met de proeven met de betonbodem. Tevens zal er dan ook aandacht moeten worden besteed aan de beddingvormen van de zandbodem en de veranderingen hierin.

- Eveneens kunnen er nog proeven worden gedaan met een bodem met een grotere ruwheid.

LIJST MET GEBRUIKTE SYMBOLENRomeinse letters

Symbool	Omschrijving	Dimensie	Eenheid
a	amplitude van de orbitaalbeweging	L	m
C	Chezy wrijvingscoëfficiënt	$L^{\frac{1}{2}} T^{-1}$	$m^{\frac{1}{2}}/s$
	Dimensieloze wrijvingscoëfficiënt	-	-
e	Basis van het natuurlijke logaritme (exp)	-	-
F	Kracht	$M L T^{-2}$	N
g	Zwaartekrachtversnelling	$L T^{-2}$	$m/s^2$
H	Golfhoogte	L	m
h	Waterdiepte	L	m
i	Verhang	-	-
k	Golfgetal	$L^{-1}$	1/m
L	Lengtemaat	L	m
l	Mengweglengte	L	m
p	Dimensieloze parameter van de orbitaal- snelheid	-	-
Q	Debiet	$L^3 T^{-1}$	$m^3/s$
q	Debiet per eenheid van breedte	$L^2 T^{-1}$	$m^2/s$
r	Equivalentente zandruwheid volgens Nikuradse	L	m
Re	Getal van Reynolds	-	-
T	Golfperiode	T	s
t	Tijd	T	s
U	Parameter voor keuze golftheorie	-	-
u	Snelheidscomponent t.g.v. orbitaal- beweging	$L T^{-1}$	m/s
<u>u</u>	Momentane snelheid	$L T^{-1}$	m/s
V	Gemiddelde snelheid over de vertikaal	$L T^{-1}$	m/s
v	Snelheid in stroomrichting	$L T^{-1}$	m/s
$v_x$	Bodemschuifspanningssnelheid	$L T^{-1}$	m/s
X	Coördinaat loodrecht op stroomrichting	L	m
Y	Coördinaat in de stroomrichting	L	m
Z	Vertikale coördinaat met oorsprong bij de bodem	L	m

Symbool	Omschrijving	Dimensie	Eenheid
$z_0$	Hoogte boven de bodem waar de waarde langssnelheid nul is	L	m
$z'$	Hoogte boven de bodem waar volgens Bijker snelheden bepalend zijn voor de resulterende bodemschuifspanning	L	m

### Griekse letters

Symbool	Omschrijving	Dimensie	Eenheid
$\theta$	Hoek	-	-
$\kappa$	Von Karman coëfficiënt	-	-
$\lambda$	Golflengte	L	m
$\xi$	Parameter	-	-
$\pi$	Constante (3,14....)	-	-
$\rho$	Soortelijke massa van het water	$M L^{-3}$	$kg/m^3$
$\tau$	Schuifspanning	$M L^{-1} T^{-2}$	$N/m^2$
$\nu$	Kinematische viscositeit	$L^2 T^{-1}$	$m^2/s$
$\omega$	Hoeksnelheid van de golfbeweging	$T^{-1}$	1/s

### INDICES

Symbool	Omschrijving
b	nabij de bodem
c	met stroming (current)
m	maximum
w	met golven (waves)
x	component in de X-richting
y	component in de Y-richting

LITERATUURLIJST

Anoniem(1973): Shore protection Manual, Volume III, U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Oahu, Hawaïi.

Anoniem (1976): Coastal Engineering, Volume I, Introduction, edited by W.W. Massie, Coastal Engineering group, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology.

Anoniem (1978/1980): Coastal Engineering, Volume II, Harbor and Beach Problems, edited by W.W. Massie, Coastal Engineering group, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology.

Bijker, E.W. (1967): Some considerations about scales for coastal models with movable bed: Doctorate dissertation, Delft University of Technology.

Battjes, J.A. (1977): Brandingsstromen, Cursus Kustdynamica en Kustverdediging, Stichting Postdoctoraal Onderwijs in de Civiele Techniek.

James, I.D. (1972): Some nearshore effects of ocean waves, University of Cambridge, Cambridge, dissertation.

Le Mehauté, B., D. Divoky, A. Lin (1969): Shallow water waves: a comparison of theories and experiments, Proc. 11th Conference Coastal Engineering, London, 1968, pp. 86-107.

Visser, P.J. (1984): A mathematical model of uniform longshore currents and the comparison with basin experiments, Communications on Hydraulics, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, report no. 84-2.

de Vries, M. (1977): Inleiding vloeistofmechanica (Concept handleiding b-72), vakgroep vloeistofmechanica, afdeling der Civiele Techniek, Technische Hogeschool Delft.

PROEF	T(s)	d(m)	H(m)	V(m/s)	$\lambda$ (m)	k(1/m)	i(-)	$C(m^{1/2}/s)$	$r$ (m)	$\delta$ (m) $10^{-3}$	$u_m$ (m/s)	$u_m/V(-)$	$\xi(-)$	$f(u_m/V)(-)$	$f(\xi u_m/V)(-)$	$i_{cw}/i_c$
1.0	0	0,279	0	0,284	-	-	$9,2 \cdot 10^{-5}$	56	2,37	0,73	0	0	2,79	1,00	1,00	---
1.1	0,96	0,278	0,074	0,284	1,27	4,95	$9,0 \cdot 10^{-5}$	57	1,97	0,74	0,131	0,46	2,84	1,05	1,41	0,98
1.2	1,42	0,278	0,084	0,284	2,14	2,94	$11,3 \cdot 10^{-5}$	51	4,69	0,66	0,204	0,72	2,54	1,13	1,78	1,23
1.3	1,90	0,279	0,069	0,284	2,98	2,11	$8,9 \cdot 10^{-5}$	57	2,07	0,74	0,183	0,64	2,84	1,10	1,77	0,99
2.0	0	0,203	0	0,196	-	-	$7,2 \cdot 10^{-5}$	51	3,21	0,97	0	0	2,54	1,00	1,00	---
2.1	0,96	0,204	0,063	0,196	1,16	5,44	$8,8 \cdot 10^{-5}$	46	6,53	0,87	0,152	0,78	2,29	1,15	1,74	1,22
2.2	1,42	0,203	0,073	0,196	1,88	3,35	$7,9 \cdot 10^{-5}$	49	4,41	0,92	0,220	1,12	2,44	1,30	2,65	1,10
2.3	1,90	0,204	0,068	0,196	2,59	2,42	$6,8 \cdot 10^{-5}$	53	2,49	0,99	0,219	1,12	2,64	1,30	2,91	0,94
3.0	-	0,245	0	0,257	-	-	$8,9 \cdot 10^{-5}$	55	2,35	0,79	0	0	2,74	1,00	1,00	---
3.1	0,96	0,245	0,076	0,257	1,23	5,13	$8,2 \cdot 10^{-5}$	57	1,74	0,83	0,153	0,60	2,84	1,09	1,67	0,92
3.2	1,42	0,245	0,071	0,257	2,02	3,11	$7,9 \cdot 10^{-5}$	58	1,55	0,84	0,187	0,73	2,89	1,13	2,02	0,89
3.3	1,90	0,245	0,068	0,257	2,79	2,25	$8,3 \cdot 10^{-5}$	57	1,74	0,82	0,194	0,75	2,84	1,14	2,04	0,93
4.1	0,96	0,204	0,017	0,196	1,16	5,44	$7,2 \cdot 10^{-5}$	51	3,30	0,96	0,041	0,21	2,54	1,01	1,07	---
4.2	0,96	0,204	0,039	0,196	1,16	5,44	$7,2 \cdot 10^{-5}$	51	3,30	0,97	0,094	0,48	2,54	1,06	1,36	1,00
4.3	0,96	0,203	0,059	0,196	1,16	5,44	$6,6 \cdot 10^{-5}$	54	2,08	1,01	0,144	0,71	2,69	1,13	1,84	0,92
4.4	0,96	0,203	0,078	0,196	1,16	5,44	$5,6 \cdot 10^{-5}$	58	1,16	1,10	0,189	0,93	2,89	1,22	2,60	0,78
4.5	0,96	0,202	0,094	0,196	1,16	5,44	$6,0 \cdot 10^{-5}$	56	1,57	1,06	0,230	1,13	2,79	1,31	3,13	0,83
4.6	0,96	0,202	0,103	0,196	1,16	5,44	$8,1 \cdot 10^{-5}$	48	4,91	0,92	0,252	1,24	2,39	1,37	2,91	1,13
5.0	0	0,279	0	0,284	-	-	$8,9 \cdot 10^{-5}$	57	2,07	0,74	0	0	2,84	1,00	1,00	---
5.1	0,96	0,279	0,039	0,284	1,27	4,95	$8,9 \cdot 10^{-5}$	57	2,07	0,74	0,068	0,24	2,84	1,01	1,12	1,00
5.2	0,96	0,278	0,094	0,284	1,27	4,95	$7,2 \cdot 10^{-5}$	63	0,84	0,82	0,166	0,58	3,14	1,08	1,77	0,81
5.3	1,42	0,279	0,039	0,284	2,13	2,96	$8,8 \cdot 10^{-5}$	57	2,07	0,75	0,094	0,33	2,84	1,03	1,22	0,99
5.4	1,42	0,278	0,094	0,284	2,14	2,94	$6,7 \cdot 10^{-5}$	66	0,45	0,86	0,229	0,81	3,28	1,16	2,57	0,75
5.5	1,90	0,279	0,039	0,284	2,98	2,11	$9,4 \cdot 10^{-5}$	55	2,68	0,72	0,104	0,37	2,74	1,03	1,25	1,06
5.6	1,90	0,278	0,078	0,284	2,99	2,10	$8,3 \cdot 10^{-5}$	59	1,56	0,77	0,206	0,73	2,94	1,13	2,06	0,93
5.7	2,31	0,279	0,039	0,284	3,66	1,72	$8,6 \cdot 10^{-5}$	58	1,76	0,76	0,107	0,38	2,89	1,04	1,30	0,97
5.8	2,31	0,278	0,081	0,284	3,70	1,70	$7,7 \cdot 10^{-5}$	61	1,15	0,80	0,221	0,78	3,04	1,15	2,27	0,87
6.0	0	0,278	0	0,133	-	-	$3,0 \cdot 10^{-5}$	46	8,9	1,28	0	0	2,79	1,00	1,00	---
6.1	0,96	0,279	0,040	0,133	1,27	4,95	$3,9 \cdot 10^{-5}$	40	19,7	1,12	0,070	0,53	1,99	1,07	1,27	1,30
6.2	0,96	0,278	0,078	0,133	1,27	4,95	$4,5 \cdot 10^{-5}$	38	25,5	1,05	0,138	1,04	1,89	1,27	1,89	1,50
6.3	0	0,280	0	0,133	-	-	$3,0 \cdot 10^{-5}$	46	9,0	1,28	0	0	2,29	1,00	1,00	1,00
6.4	1,90	0,280	0,037	0,133	2,97	2,11	$3,9 \cdot 10^{-5}$	40	19,8	1,12	0,096	0,72	1,99	1,13	1,48	1,30
6.5	1,90	0,279	0,074	0,133	2,98	2,11	$3,3 \cdot 10^{-5}$	44	11,6	1,22	0,194	1,46	2,19	1,50	3,19	1,10
6.6	0,64	0,280	0,046	0,133	0,63	9,90	$4,4 \cdot 10^{-5}$	38	25,7	1,06	0,029	0,22	1,89	1,01	1,04	1,47
6.7	2,3	0,275	0,118	0,133	3,66	1,72	$4,5 \cdot 10^{-5}$	38	25,3	1,03	0,328	2,47	1,89	2,37	5,03	1,50
A	0,96	0,278	0,074	0,0	1,27	4,95	-	-	-	-	0,129	$\infty$	-	-	-	-
B	1,42	0,277	0,084	0,0	2,13	2,96	-	-	-	-	0,203	$\infty$	-	-	-	-
C	1,90	0,274	0,069	0,0	2,94	2,14	-	-	-	-	0,182	$\infty$	-	-	-	-

Tabel 1 Meetresultaten en uitwerkingen





