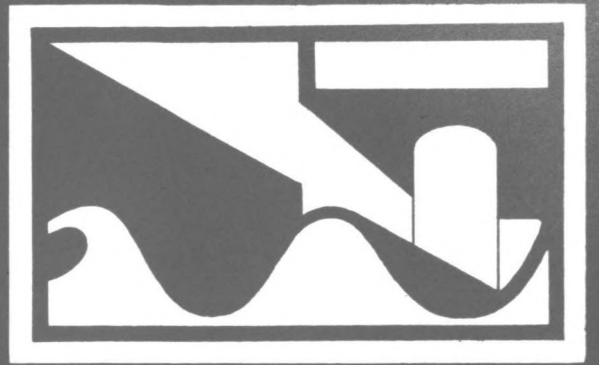
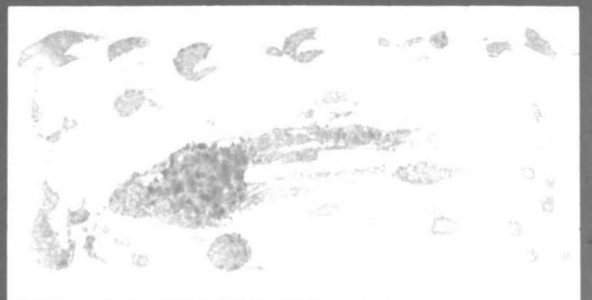


052.



MODELONDERZOEK NAAR DE INVLOED VAN LOODRECHT
INVALLENDE GOLVEN OP DE BODEMWRIJVING
VEROORZAAKT DOOR LANGSSTROMING.

afstudeerverslag van: J.A. van der Stel



MODELONDERZOEK NAAR DE INVLOED
VAN LOODRECHT INVALLENDE GOLVEN,
OP DE BODEMWRIJVING VEROORZAAKT
DOOR LANGSSTROMING.

door: J.A. van der Stel

afstudeer-deelontwerp bij de vakgroep kustwaterbouw

hoogleraar: prof.dr.ir. E.W. Bijker

begeleider: ir. P.J. Visser

Delft, december 1985

VOORWOORD

Dit rapport handelt over een in het kader van Toegepast Onderzoek Waterstaat (T.O.W.), verricht modelonderzoek naar de invloed van loodrecht invallende golven op de bodemwrijving veroorzaakt door langsstroming. Hiertoe zijn van februari tot oktober 1985 (met onderbrekingen) experimenten uitgevoerd in het golfbassin van het laboratorium voor vloeistofmechanika van de T.H. Delft. Voor ondergetekende betekende dit onderzoek tevens de afsluiting van mijn opleiding tot civiel ingenieur.

Dit onderzoek betreft de tweede fase van een langer lopend onderzoek onder de supervisie van ir. P.J. Visser, en bouwt als zodanig voort op de bevindingen van mijn voorgangers R. van Leyen en M.J. van der Vlerk. Het ligt in de bedoeling dat het onderzoek na mij nog zal worden voortgezet.

De uitgevoerde experimenten vertonen een sterke gelijkenis met de proeven die Bijker in 1967 uitvoerde in het kader van zijn onderzoek naar bodem sediment-transporten onder een combinatie van langsstroming en golven. Uitkomst van dit onderzoek (naast de bekende Bijker-formule), was een toename van de bodemwrijving onder stroming en golven, ten opzichte van de bodemwrijving onder alleen langsstroming.

De aanleiding tot het huidige onderzoek was, dat sinds 1967 de indruk is ontstaan dat de destijds door Bijker voorspelde toename aan de hoge kant zou zijn. Zowel de experimenten van Van Leyen en Van der Vlerk, als de in dit rapport behandelde experimenten lijken dit vermoeden te bevestigen.

Helemaal eenduidig zijn de uitkomsten echter nog niet. Het stromingsmodel is namelijk zeer gevoelig gebleken voor allerlei instel-onnauwkeurigheden. Dit is te wijten aan het feit dat de optredende toename van de bodemwrijving waarschijnlijk zeer klein is, en daardoor snel dreigt te verdwijnen in de meetonnauwkeurigheid. Nader onderzoek is derhalve zeker gewenst, mede omdat nog slechts is gemeten bij loodrechte golfval en een bodemtoestand die niet aan sedimentatie onderhevig was.

Mijn speciale dank gaat uit naar dhr. H. Bakker en ing. R. Janse voor het beschikbaar stellen van tekstverwerker en printer, en in het bijzonder naar ir. P.J. Visser voor de prettige begeleiding tijdens dit onderzoek.

Johan van der Stel,
december 1985

INHOUD

	blz.
1: INLEIDING	1
2: MODELLEREN VAN BODEMWRIJVING	4
2.1 Alleen stroming	4
2.2 Bodemwrijving onder golven	7
2.3 Bodemwrijving bij stroming en golven	14
3: BESCHRIJVING VAN DE EXPERIMENTEN	20
3.1 De te meten grootheden	20
3.2 Beschrijving van het model	22
3.3 Beschrijving van de metingen	28
3.3.1 Meting basisgrootheden	28
3.3.1.1 Snelheidsmetingen	28
3.3.1.2 Golfperiode en Golfhoogte	30
3.3.1.3 Waterdiepte en Verhang	31
3.3.2 Het meetprogramma	32
4: PRESENTATIE MEETRESULTATEN	38
4.1 Metingen op gladde bodem	38
4.1.1 Instelmetingen	38
4.1.2 Verhangmetingen	42
4.1.3 Snelheidsmetingen met de mikromolen	42
4.1.3.1 Langsstromsnelheden	42
4.1.3.2 Orbitaalsnelheden	51
4.1.4 Metingen met de Onderdompelbare Laser-Doppler Snelheidsmeter	52
4.1.5 Bodemwrijving	56
4.2 Metingen op ruwe bodem	60
4.2.1 Instelmetingen	60
4.2.2 Verhangmetingen	60
4.2.3 Snelheidsmetingen met de mikromolen	64
4.2.3.1 Langsstromsnelheden	64
4.2.3.2 Orbitaalsnelheden	67
4.2.4 Snelheidsmetingen met de Onderdompelbare Laser-Doppler Snelheidsmeter	69
4.2.4.1 Langsstroom- en orbitaalsnelheden in 6 punten per raai	69
4.2.4.2 Nauwkeurige profielmetingen	75
4.2.5 Bodemwrijving	82
5: KONKLUSIES EN AANBEVELINGEN	84
5.1 Konklusies	84
5.2 Aanbevelingen	86
6: LITERATUURLIJST	87
BIJLAGE: OVERZICHTSTABEL	89

LIJST VAN GEBRUIKTE SYMBOLEN

<u>symbool</u>	<u>omschrijving</u>	<u>eenheid</u>
ab	amplitude van de orbitaalbeweging nabij de bodem	m
A	-m.b.v. lin. regr. bepaalde koeff. voor het log. snelh. profiel $v(z)$	1/s
	-in h.s. 2.3 tevens de "knik" in het snelh. profiel bij stroming en golven volgens Lundgren beschrijvend	-
B	m.b.v. lin. regr. bepaalde koeff. voor het log. snelh. profiel $v(z)$	m/s
C	dimensieloze bodemwrijvingskonstante	-
Cch	bodemwrijvingskonstante volgens Chezy	\sqrt{m}/s
e	basis van natuurlijke logaritme	-
fw	bodemwrijvingskonstante volgens Jonsson	-
F	kracht	N
g	zwaartekrachtversnelling	m/s^2
h	gemiddelde waterdiepte	m
hc	waterdiepte bij alleen stroming	m
hcw	waterdiepte bij stroming en golven	m
H	gemiddelde golfhoogte	m
i	verhang	-
ic	verhang bij alleen stroming	-
icw	verhang bij stroming en golven	-
k	golfgetal	1/m
l	mengeweglengte	m
L	golflengte	m
p	schuifspanningssnelheid bij golfbeweging	m/s
\hat{p}	amplitude schuifspanningssnelheid	m/s
pb	amplitude schuifspanningssnelheid voor de golfbeweging aan de bodem	m/s
p	driedimensionale schuifspanningssnelheid	m/s
\bar{p}	gemiddeld konstante deel van p	m/s
\tilde{p}	fluktuerende deel van p	m/s
P	Koefficient voor orbitaalsnelheid in de grenslaag	-
Pb	Koefficient P volgens Bijker	-
Ps	Koefficient P volgens Swart	-
Pr	druk	N/m^2
q	hulpvariabele gelijk aan p	m/s
Q	debiet	1/s
r	equivalente zandruwheid volgens Nikuradse	m
t	tijd	s
T	golfperiode	s
u(z)	orbitaalsnelheid	m/s
ub	orbitaalsnelheid aan de bodem (fluktuerend)	m/s
ud	defect velocity	m/s
um	orbitaalsnelheids-amplitude aan de bodem	m/s
ut	orbitaalsnelheids-amplitude op hoogte $z=zt$ boven de bodem	m/s
\underline{u}	momentane snelheidsvektor	m/s
$v(z)$	langsstroomsnelheid	m/s
\bar{v}	over de vertikaal gemiddelde snelheid	m/s
\bar{v}_c	gemiddelde snelheid bij alleen stroming	m/s
\bar{v}_{cw}	gemiddelde snelheid bij stroming en golven	m/s
v^*	schuifspanningssnelheid voor langsstroming	m/s
x	koordinaat loodrecht op de stromingsrichting, $x=0$ bij het golfschot	m
y	koordinaat in stromingsrichting, $y=0$ in raai A	m
z	vertikale coördinaat met oorsprong aan de bodem	m

zo	integratiekonstante voor de logaritmische snelheid $v(z)$	m
zt	hoogte boven de bodem waar volgens Bijker de langsstroom- en orbitaaltaalsnelheid bepalend zijn voor de gekombineerde bodemschuifspanning	m
zgrens	hoogte boven de bodem waarboven de lin. golftheorie geldig is	m
α	stromingspercentage over het talud	-
δ	dikte van een viskeuze sublaag	m
ϵ	turbulente viskeuziteit	kg/ms
η	laminaire viskeuziteit	kg/ms
θ	hoek van inval	-
k	konstante van Von Karman	-
λp	golflengte schuifspanningssnelheid p	m
ν	laminaire viskeuziteits-konstante	m^2/s
νt	turbulente viskeuziteits-konstante	m^2/s
ξ	koefficient, variërend met de wijze van samenstellen van u en v	-
π	pi ($\approx 3,14\dots$)	-
ρ	soortelijke massa	kg/m ³
σ	spreidingsfaktor (standaard afwijking)	-
τ	schuifspanning	N/m ²
τ_b	bodemwrijving	N/m ²
$\tau_{b,c}$	bodemwrijving bij alleen stroming	N/m ²
$\tau_{b,cw}$	bodemwrijving bij stroming en golven	N/m ²
ω	fasesnelheid golfbeweging	rad/s
ϕ	faseverschuiving bij 3-dim. schuifsp. snelh. p	rad

HOOFDSTUK 1: INLEIDING.

De vorm van een kust is over het algemeen niet stabiel, maar vertegenwoordigt een momentaan evenwicht in het krachtenspel der elementen. Ze is onderhevig aan een kontinu proces van erosie en/of sedimentatie.

Voor een effectieve kustverdediging is het derhalve van groot belang de processen te kennen die bij het transport van sediment een rol spelen.

Een belangrijk aspekt bij sedimenttransport is de bodemwrijving. Immers, de optredende wrijving in het contactvlak tussen water en bodem bepaalt of, en in hoeverre bodemmateriaal zal worden meegevoerd door het bewegende water.

Langs de kust zijn zowel stroming als golfbeweging bepalend voor de bodemwrijving.

In 1967 is door Bijker een theorie ontwikkeld waarbij een gekombineerde term voor de bodemwrijving werd gevonden middels het vektorieel optellen van langsstromingsnelheid en orbitaalsnelheid in een punt nabij de bodem. Bijker gebruikte dit principe bij het opstellen van een formule voor bodemtransport onder stroming en golven (de Bijkerformule).

Ter verifikatie van zijn theorie is door Bijker een serie modelproeven verricht in een golfbassin.

De ontwikkelde theorie voorspelde een toename van de bodemwrijving in de situatie van langsstroming en golven, ten opzichte van de situatie met alleen stroming.

Omdat de bodemwrijving lineair evenredig is met het verhang, moest de toename van de bodemwrijving bij horizontale bodem en uniforme stroming, dus terug te vinden zijn in een toegenomen verhang van de waterspiegel. Op deze wijze kon langs twee wegen het effect van een golfveld op de bodemwrijving worden nagegaan; Enerzijds door de gemeten langsstroom- en orbitaalsnelheden in de theorie te stoppen, anderzijds door het meten van de verhangen onder respectievelijk alleen stroming en stroming plus golven. De theoretisch voorspelde toename van de bodemwrijving bleek inderdaad door de verhangmetingen te worden bevestigd.

Sinds 1967 is echter de indruk ontstaan dat de door Bijker voorspelde, gekombineerde bodemwrijving wellicht toch aan de hoge kant zou zijn (zie o.a. Visser, 1984).

Mede daarom is in het kader van Toegepast Onderzoek Waterstaat (T.O.W.), een modelonderzoek gestart in het golfbassin van het laboratorium voor vloeistofmechanika van de T.H. Delft.

De uitgevoerde experimenten zijn nauw verwant aan de eerder genoemde modelproeven van Bijker. Echter, gezien de grote waarde voor dit onderzoek van de gemeten verhangen, en gezien het feit dat de waterstandsverschillen soms zeer klein zijn (orde van grootte 10^{-4} m, is de orde van grootte van de meetnauwkeurigheid), worden de verhangen gemeten in 30 meetpunten (Bijker had slechts 2 meetpunten).

Bovendien worden de onderzoekingen gefaseerd uitgevoerd. Dat wil zeggen dat niet meteen met los bodemmateriaal wordt gewerkt, maar dat eerst de bodemwrijving bij een "gladde" beton bodem wordt bestudeerd, terwijl de golfval in eerste instantie haaks op de stroomrichting gekozen wordt.

Het betreft hier dan ook een langer lopend onderzoek, dat grotendeels door studenten als onderdeel van hun afstuderen wordt uitgevoerd.

De eerste, inleidende fase werd uitgevoerd door R. van Leyen en M.J. van der Vlerk (1984).

In die eerste fase is geëxperimenteerd met verschillende debieten en verschillende golfvelden.

Hieronder volgt een samenvatting van hun voornaamste konklusies en aanbevelingen:

- 1- Loodrecht invallende golven op langsstroming hebben geen duidelijke vergroting van het verhang te zien gegeven. Bijgevolg kon ook geen toename van de bodemwrijving worden aangetoond.
- 2- Het is van groot belang veel zorg te besteden aan de instelling van een uniform stroombeeld, daar niet-uniformiteit verstoring van de resultaten tot gevolg heeft. Zo wordt het b.v. moeilijker om een duidelijk verhang te meten.
- 3- Teneinde wat "overtuigender" verhangen te kunnen konstateren verdient het aanbeveling de bodem te verruwen, b.v. middels het aanbrengen van een laagje grind.
- 4- Met behulp van een snelheidsmeter welke in twee richtingen in het platte vlak tegelijkertijd kan meten, dient de invloed van golven op een uniform stroombeeld te worden nagegaan (b.v. met een onderdompelbare Laser-Doppler snelheidsmeter).
- 5- Gezien het belang voor dit onderzoek van stroom- en orbitaal-snelheden nabij de bodem, dient een meetopstelling te worden ontworpen waarmee snelheden vlak bij de bodem gemeten kunnen worden.

Het voor u liggende rapport betreft de tweede fase van het onderzoek. Naar aanleiding van de bevindingen van Van Leyen en Van der Vlerk is eerst nog een aantal experimenten uitgevoerd op de gladde beton bodem, waarbij met name veel zorg is besteed aan het instellen van een zo uniform mogelijke stroming.

Vervolgens is de bodem ruw gemaakt, middels het aanbrengen van een dunne laag fijn grind, waarvan mocht worden aangenomen dat het niet door het bewegende water zou worden meegevoerd. Ook nu is weer getracht op de eerder beschreven wijze een indruk te verkrijgen omtrent de bodemwrijving onder een combinatie van langsstroming en loodrechte golfval.

Bovendien zijn bij de verschillende stroom- en golfinstellingen een aantal snelheidsprofielen in de vertikaal doorgemeten (zowel langsstroom- als orbitaal-snelheid) teneinde de wederzijdse beïnvloeding van stroming en golven te kunnen nagaan. Hierbij is gebruik gemaakt van een door het W.L.-Delft ontwikkelde Onderdompelbare Laser-Doppler Snelheidsmeter (zie Godefroy en Vegter, 1984), een apparaat waarmee snelheden in twee richtingen in het platte vlak tegelijk gemeten kunnen worden. Hierbij zijn ook snelheden vlak bij de bodem (ca. 0,5 mm) gemeten.

In de hierna volgende hoofdstukken zal uitgebreid worden ingegaan op de bevindingen. Allereerst zal in hoofdstuk 2 een stuk theorie worden behandeld. In hoofdstuk 3 wordt vervolgens een beschrijving gegeven

van de opzet van de metingen.

Hiervoor is reeds gesproken van een langer lopend onderzoek. Het ligt dan ook in de bedoeling dat dit onderzoek nog zal worden voortgezet. Tot nu toe is steeds gewerkt met loodrecht invallende golven. In de toekomst zal ook bij onder een hoek invallende golven gemeten moeten worden. Uiteindelijk zullen de metingen op een losse (sediment) bodem moeten worden verricht.

2: MODELLEREN VAN BODEMWRIJVING

2.1 ALLEEN STROMING.

De schuifspanning in een statistisch-stationaire, uniforme stroming, is opgebouwd uit een laminair- en een turbulent-viskeus deel:

$$\tau = \tau_{\text{lam.}} + \tau_{\text{turb.}} = \eta \cdot \delta v / \delta z + \epsilon \cdot \delta v / \delta z \quad 2.1$$

Waarin: $\eta = \nu \cdot \rho$ = laminaire viskeuziteit, met $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
 $\epsilon = \nu_t \cdot \rho$ = turbulente viskeuziteit, met ν_t volgens de mengwegtheorie van Prandtl:

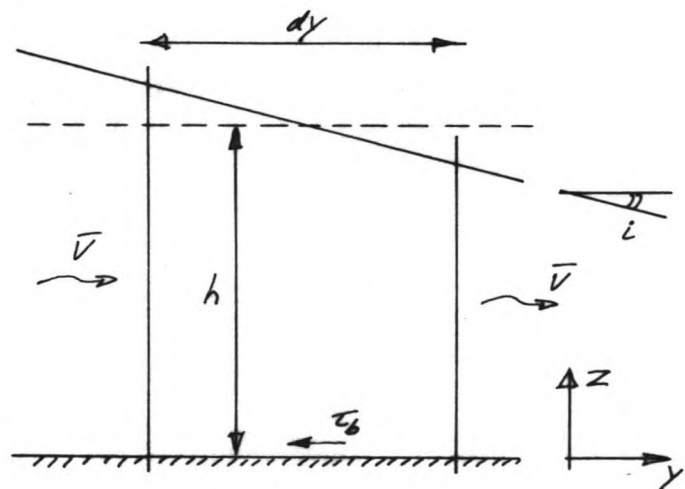
$$\nu_t = l^2 \cdot |\delta v / \delta z| \quad 2.2$$

$l = \kappa \cdot z \cdot \sqrt{1-z/h}$, de mengweglengte, met z = de hoogte boven de bodem, h = de waterdiepte en κ = de konstante van von Karman (ca 0,4).

Voor $z/h \ll 1$: $l = \kappa \cdot z$.

De viskeuze schuifspanning zal overheersen in stroming nabij een gladde wand. Op grotere afstand van de wand of in het geval van een ruwe wand is de turbulente (of Reynoldse) schuifspanning maatgevend.

De schuifspanning aan de bodem is wat onder de bodemwrijving wordt verstaan. Een evenwichtsbeschouwing van een verticale moot in een stationaire- uniforme stroming (zie afb. 2.1), leert dat voor die moot de bodemwrijving kan worden uitgedrukt als:



afb. 2.1

$$\tau_b = \rho \cdot g \cdot h \cdot \delta h / \delta y = \rho \cdot g \cdot h \cdot i \quad 2.3$$

Vergelijking 2.3 is in feite de gereduceerde bewegingsvergelijking (Navier Stokes). Hiertoe zijn de volgende veronderstellingen gemaakt:

I) Statistisch stationaire stroming, zodat $\delta v / \delta t = 0$

II) Uniforme stroming, dat wil zeggen:

1- De snelheidscomponent loodrecht op de langsstroming is gelijk aan nul: $u(z) = 0$;

2- De stroming is konstant, zowel in de langsstroomrichting (y) als haaks daarop (x), zodat $\delta v / \delta x = 0$ en $\delta v / \delta y = 0$.

III) $h \gg dh/dy$, zodat een gemiddelde waarde h voor het gehele stroomgebied mag worden verondersteld.

De term $(g \cdot h \cdot i)$ in (2.3) heeft de dimensie van een snelheid in het kwadraat, en wordt daarom gedefinieerd als de schuifspanningssnel-

heid:

$$v^* = \sqrt{(\tau_b/\rho)} \quad 2.4$$

In het geval van laminaire stroming kan (2.3) worden gelijkgesteld aan het laminair viskeuze deel van (2.1). Integratie van $\delta v/\delta z$ in deze vergelijking, gebruik makend van (2.4), levert een lineair verloop van $v(z)$:

$$v(z) = (v^{*2}/\nu) \cdot z \quad 2.5$$

Dit is b.v. het geval in stroming nabij een gladde wand. In het geval van turbulente stroming wordt (2.3) gelijk gesteld aan het turbulent-viskeuze deel van (2.1):

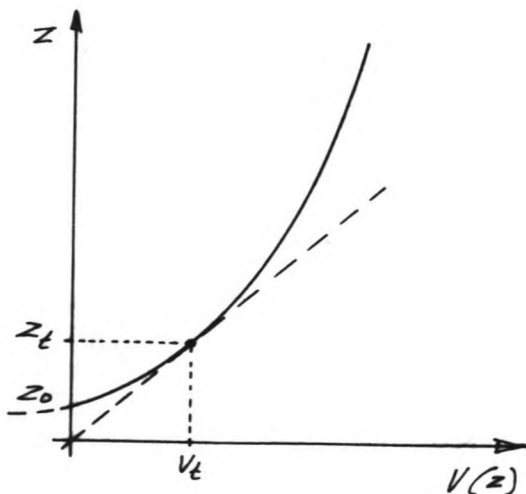
$$\tau = \rho \cdot (k \cdot z)^2 \cdot (\delta v/\delta z)^2 = \tau_b \quad 2.6$$

Integratie van deze uitdrukking levert een logaritmische verticale snelheidsverdeling:

$$v(z) = (v^*/k) \cdot \ln(z/z_0) \quad 2.7$$

Uit metingen is gebleken dat het lineaire en logaritmische deel elkaar snijden in het punt $z = 11,6 \cdot \nu/v^*$. Deze grootte staat bekend als δ , de dikte van de laminair-viskeuze sublaag. δ kan alleen bestaan in het geval van een gladde bodem. In het geval van een ruwe bodem kan δ niet bestaan, omdat de wandoneffenheden er doorheen zullen prikken. De stroming is dan geheel turbulent, en de verticale snelheidsverdeling wordt gegeven door vergelijking (2.7). De integratie-konstante z_0 in deze formule wordt volledig bepaald door de wandoneffenheden. Nikuradse definieerde de grootte van de wandoneffenheden als een equivalente zandruwheid. De weerstand van de wand is dan gelijk aan die welke is beplakt met uniforme zandkorrels met diameter r . Uit experimenten is gebleken dat $z_0 \approx r/33$, zodat voor de verticale snelheidsverdeling geldt:

$$v(z) = (v^*/k) \cdot \ln(33 \cdot z/r) \quad 2.8$$



afb.2.2

Bij de onderhavige experimenten wordt er van uitgegaan dat de bodem "hydraulisch ruw" is. Als dat waar is, dan zal r steeds groter dan δ moeten zijn (blijkt te kloppen).

De konsewentie van de konstante z_0 in formule 2.7 is, dat dit de hoogte boven de bodem aanduidt waar $v=0$ (zie afbeelding 2.2).

Tussen $z=0$ en $z=z_0$ zou de snelheid dan kleiner dan nul moeten zijn, hetgeen niet reeel is. Daarom wordt voor $z < z_t$ wel een rechtlijnige benadering van de stroomsnelheid voorgesteld, rakend aan het logaritmische profiel in $z=z_t$. Er kan dan worden afgeleid dat:

$$z_t = e \cdot r / 33 \quad 2.9$$

en $v_t = v^*/k \quad 2.10$

Hiermee is tussen $z=0$ en $z=z_t$ een hypothetische laminaire grenslaag in het leven geroepen. De snelheidsverdeling in de grenslaag wordt beschreven door vergelijking (2.5).

Uit de definiering van de snelheidsverdeling bij laminaire stroming volgt nu dat de schuifspanning in de gehele grenslaag gelijk is aan τ_b . Door combinatie van (2.4) en (2.10) is de bodemwrijving te schrijven als:

$$\tau_b = \rho \cdot k^2 \cdot v_t^2 \quad 2.11$$

Hieruit blijkt dat de bodemwrijving in de grenslaag kan worden opgevat als de schuifspanning op $z=z_t$. De schuifspanning in de gehele hypothetische grenslaag wordt hier dus gedefinieerd als de schuifspanning in het theoretische punt $z=z_t$ aan de rand van de grenslaag.

De bodemwrijving kan ook worden uitgedrukt als functie van de gemiddelde stroomsnelheid v . Daartoe wordt vergelijking (2.3) gekombineerd met de formule van chezy:

$$\tau_b = \rho \cdot (g/Cch^2) \cdot \bar{v}^2 \quad 2.12$$

Wanneer we nu een dimensieloze wrijvingscoëfficiënt definiëren, gerelateerd aan de Coëfficiënt van Chezy volgens:

$$C = g/Cch^2, \quad 2.13$$

dan kan (2.13) geschreven worden als:

$$\tau_b = \rho \cdot C \cdot \bar{v}^2 \quad 2.14$$

Het gebruik van de Coëfficiënt C in deze vergelijking, in plaats van de Chezy-coëfficiënt is aan te bevelen omdat:

- 1) C dimensieloos is terwijl Cch de dimensie [m²/s] heeft;
- 2) C toeneemt als de ruwheidsmaat r toeneemt (Cch neemt af bij toename van r).

Gebruik makend van de formule van White-Colebrook kan de volgende algemene formulering voor C worden afgeleid:

$$C = \left(\frac{k}{\ln(12 \cdot h / (r + \xi / 3, 2))} \right)^2 \quad 2.15$$

Afhankelijk of de bodem hydraulisch ruw dan wel hydraulisch glad is, kan r of ξ in deze vergelijking worden verwaarloosd.

2.2 BODEMWRIJVING ONDER GOLVEN

Voor de bodemwrijving bij alleen golven (op een ruwe bodem), vond Jonsson (1966) een soortgelijke formulering als (2.14):

$$\tau_b = (f_w/2) \cdot \rho \cdot u_b^2 \quad 2.16$$

Hierin is u_b de momentane orbitaalsnelheid nabij de bodem, en f_w een dimensieloze bodemwrijvingscoëfficiënt. Voor f_w leidde Jonsson een empirische relatie af, uitgedrukt in de bodemruwheid r en de amplitude van de horizontale waterbeweging nabij de bodem ab :

$$1/(4 \cdot \sqrt{f_w}) + \log(1/(4 \cdot \sqrt{f_w})) = -0,08 + \log(ab/r) \quad 2.17$$

Swart (1974), benaderde deze relatie met:

$$f_w = \exp[-5,977 + 5,213 \cdot (ab/r)^{-0,194}] \quad 2.18$$

Bij de hier behandelde theorie wordt voor de beschrijving van de golfbeweging gebruik gemaakt van de lineaire korte-golftheorie. Onderzoekingen (Le Mehaute c.a.) hebben aangetoond dat vooral de orbitaalbeweging nabij de bodem (waar het hier steeds om gaat), goed met deze theorie beschreven kan worden. De horizontale deeltjessnelheid volgens de lineaire korte-golftheorie is:

$$u(z) = \frac{\pi \cdot H}{T} \cdot \frac{\cosh(kz)}{\sinh(kh)} \cdot \cos(kx - \frac{2\pi t}{T}) \quad 2.19$$

waarin : H = golfhoogte
 T = golfperiode ($2\pi/T = \omega$ = fasesnelheid)
 k = golfgetal ($k = 2\pi/L$, met L = golflengte)
 z = hoogte boven de bodem

De orbitaalsnelheid nabij de bodem wordt gevonden door in (2.19) $z=0$ te kiezen:

$$u_b = u_m \cdot \cos(\omega t) \quad 2.20$$

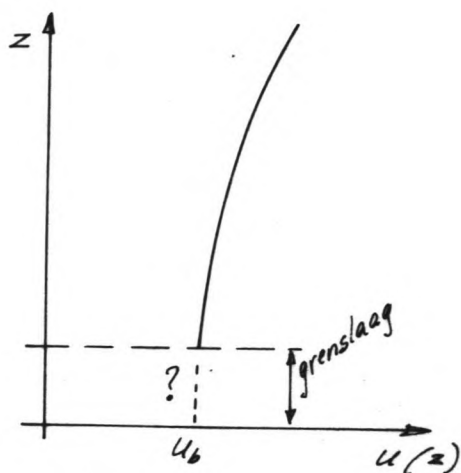
$$\text{waarin: } u_m = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{1}{\sinh(kh)} \quad 2.21$$

De amplitude van de horizontale waterbeweging nabij de bodem wordt gegeven door:

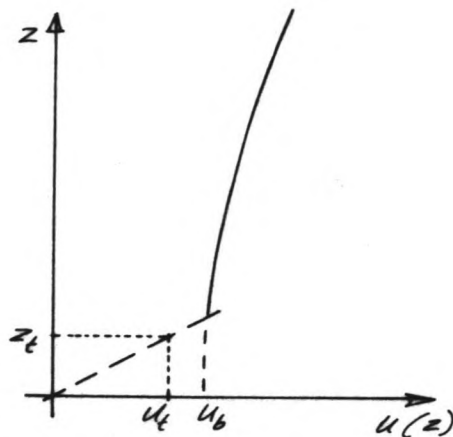
$$ab = \frac{u_m \cdot T}{2\pi} \quad 2.22$$

De lineaire golftheorie negeert grenslaageffekten. In werkelijkheid zal er wel zoiets als een grenslaag zijn, zodanig dat de snelheid voor $z=0$ naar nul gaat.

De vergelijkingen (2.20), (2.21) en (2.22) zijn daarom geldig voor een punt "nabij" de bodem, maar nog buiten een nader te definiëren grenslaag (zie afb.2.3a).



afb. 2.3 a



afb. 2.3 b

Bijker (1967), veronderstelde een snelheidsverloop door de grenslaag, overeenkomstig de snelheidsverdeling bij konstante stroming (zie afb. 2.3b). Analoog aan (2.9) kan dan in $z=z_t$ een snelheid u_t worden bepaald volgens:

$$u_t = P \cdot u_b \quad 2.23$$

Analoog aan (2.12) veronderstelde Bijker de schuifspanning op die hoogte maatgevend voor de bodemwrijving:

$$\tau_b = \tau_t = \rho \cdot k^2 \cdot (P \cdot u_b)^2 \quad 2.24$$

De faktor P zou volgens de theorie van Bijker een konstante moeten zijn: $P_{B,th.} = 0,39$. Experimenteel kwam Bijker op: $P_{B,exp.} = 0,45$. Swart vergeleek (2.24) met (2.16) en konkludeerde daaruit dat P een variabele moest zijn:

$$P_s = 1/k \cdot \sqrt{fw/2} \quad 2.25$$

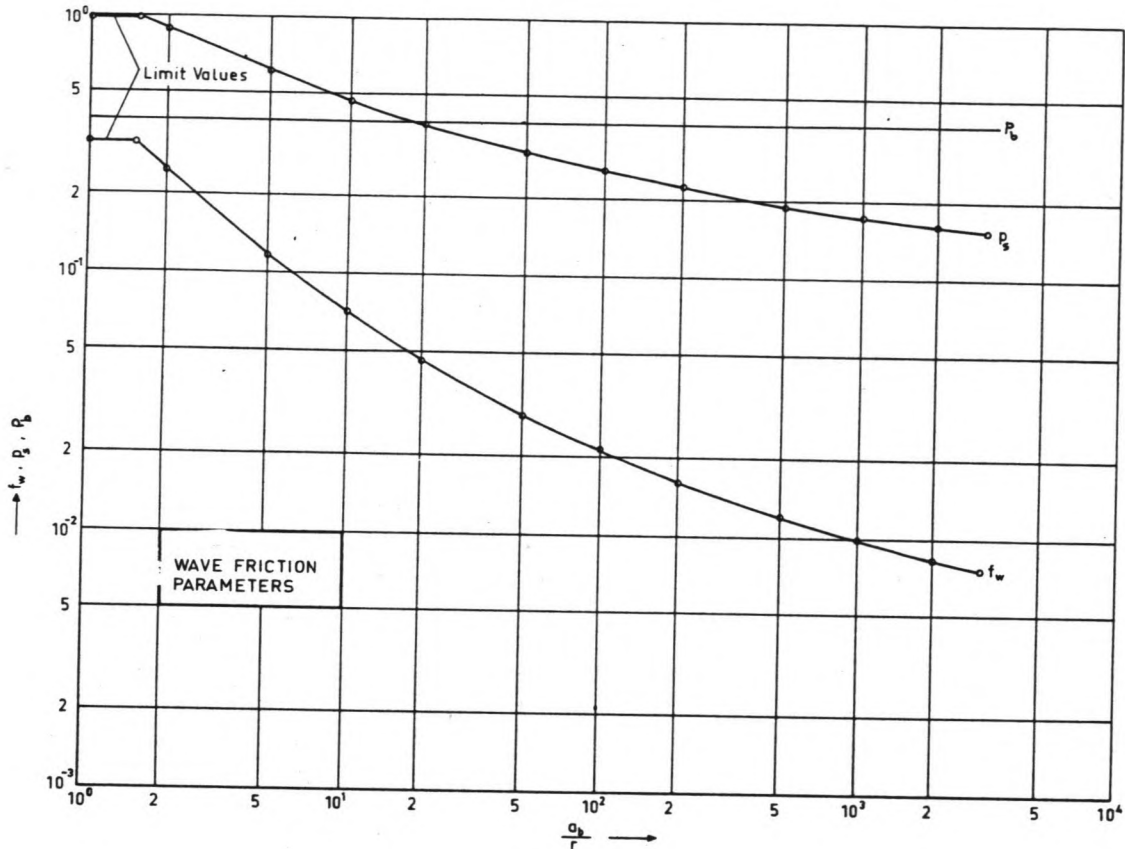
Afbeelding 2.4 toont fw , P_b en P_s als functie van ab/r .

Een gedetailleerder beschrijving van het snelheidsverloop in de grenslaag wordt gegeven door Bakker (1973, 1974). Bakker definieert een z.g "defect velocity" u_d , als de mate waarin de snelheid $u(z)$ nabij de bodem afwijkt van de snelheid volgens de lineaire golftheorie, u_b (vgl. 2.20).

$$u_d = u(z) - u_b \quad 2.26$$

De bewegingsvergelijking voor een rechthoekig vloeistof elementje wordt gegeven door:

$$\rho \cdot \delta u / \delta t = \delta \tau / \delta z - \delta P_r / \delta x \quad 2.27$$



afb. 2.4

waarin: $\delta Pr / \delta x$ = de drukgradient.
 Buiten de grenslaag, dus in het gebied waar $u(z) = u_b$ is de schuifspanning gelijk aan nul. Immers, u_b is (nagenoeg) onafhankelijk van z , zodat $\delta u_b / \delta z = 0$.
 Voor de bewegingsvergelijking geldt dan:

$$\rho \cdot \delta u_b / \delta t = -\delta Pr / \delta x \quad 2.28$$

Wanneer (2.28) wordt afgetrokken van (2.27), dan levert dat de volgende differentiaalvergelijking voor u_d :

$$\delta u_d / \delta t = 1 / \rho \cdot \delta \tau / \delta z \quad 2.29$$

Voor het geval van laminaire stroming nabij een gladde bodem, geldt dat de schuifspanning voornamelijk wordt bepaald door het laminair-viskeuze deel van de schuifspanning (verg. 2.1). De snelheidsverdeling volgt dan vrij gemakkelijk uit integratie van:

$$\delta u_d / \delta t = \nu \cdot \delta^2 u / \delta z^2 = \nu \cdot \delta^2 u_d / \delta z^2 \quad 2.30$$

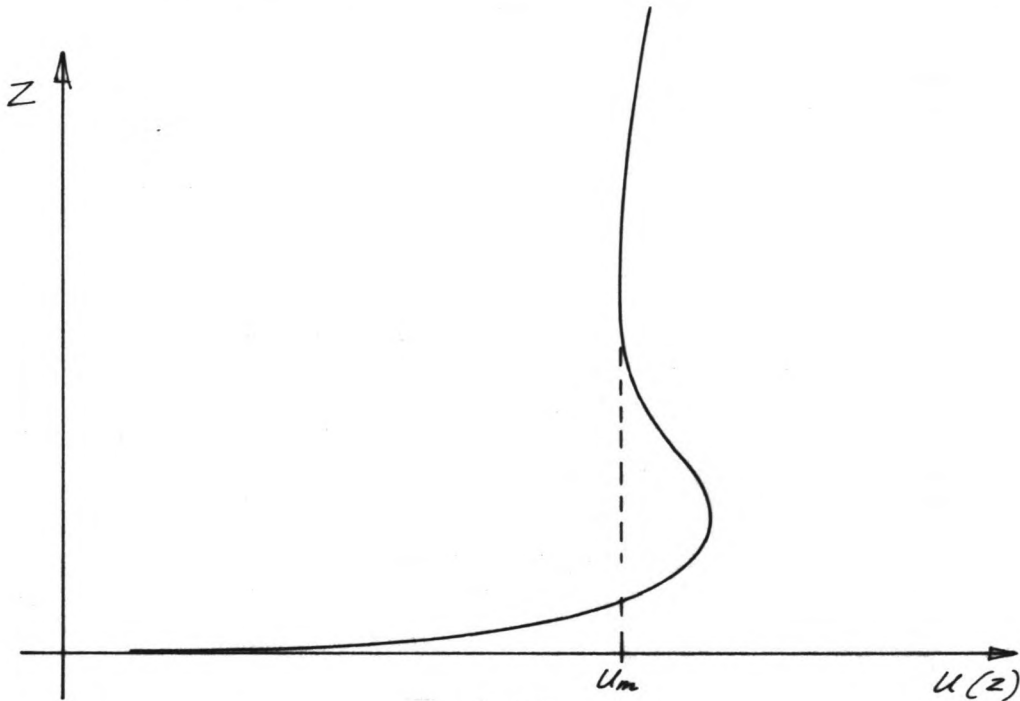
Deze d.v. staat bekend als de "lineaire diffusie vergelijking", met randvoorwaarden: $u = 0$, voor $z = 0$ (zodat $u_d = -u_b$)
 en $u = u_b$, voor $z > \delta$, met $\delta = \sqrt{(2 \cdot \nu / \omega)}$, de dikte van een

laminaire golf-grenslaag,
is de oplossing als volgt:

$$u_d = u_m \cdot [-\exp(-z/\delta) \cdot \cos(\omega t - z/\delta)] \quad 2.31$$

Met (2.26) kan hieruit eenvoudig de snelheid $u(z)$ worden afgeleid (zie ook afb. 2.5):

$$u(z) = u_m \cdot [\cos(\omega t) - \exp(-z/\delta) \cdot \cos(\omega t - z/\delta)] \quad 2.32$$



afb. 2.5

De hier gegeven oplossing is door andere onderzoekers verder uitgewerkt. Met een andere definiering van de grenslaag δ kan wellicht een nauwkeuriger formulering voor $u(z)$ gevonden worden. Hoe dan ook, de oplossingsvergelijking zal steeds de volgende algemene gedaante hebben:

$$u(z) = u_m \cdot [\cos(\omega t) - f_1(z) \cdot \cos(\omega t - f_2(z))] \quad 2.33$$

waarin: f_1 = snelheidsamplitude-functie (exponentieel)

f_2 = faseverschuivingsfunctie.

f_1 en f_2 kunnen empirisch worden bepaald.

Voor het geval van turbulente stroming, wat b.v. het geval is bij een ruwe bodem, wordt de schuifspanning bepaald door het turbulent-viskeuze deel van de schuifspanning. De differentiaalvergelijking voor u_d ziet er dan als volgt uit:

$$\delta u_d / \delta t = 1/\rho \cdot \delta / \delta z [\rho (kz)^2 \cdot \delta u_d / \delta z \cdot | \delta u_d / \delta z |] \quad 2.34$$

Deze differentiaalvergelijking is echter niet zo gemakkelijk op te lossen als (2.30). Het betreft hier namelijk niet een lineaire

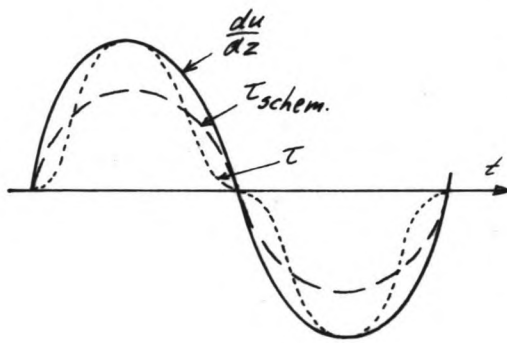
diffusie vergelijking, omdat νt een functie is van z . Om toch tot een analytische oplossing te komen, dient de d.v. middels schematisering te worden teruggebracht tot de bekende vorm van de lineaire diffusievergelijking. Bakker (1973) bereikt dit door de volgende kunstgrepen toe te passen:

- 1- Er wordt een geschematiseerde harmonische schuifspanning geïntroduceerd, zodanig dat de energiedissipatie gedurende een golfperiode gelijk blijft (zie afb 2.6):

$$\tau/p = 8/3\pi \cdot (kz)^2 \cdot (\hat{\xi u}/\xi z) \cdot |\xi u/\xi z| \quad 2.35$$

Hierin is $(\hat{\xi u}/\xi z)$ de amplitude van $\xi u/\xi z$. Vervolgens wordt weer een soort schuifspanningsnelheid geïntroduceerd:

$$p = \sqrt{8/3\pi} \cdot kz \cdot \xi u/\xi z \quad 2.36$$



afb. 2.6

In tegenstelling tot ν^* in hoofdstuk 2.1, is p niet slechts gedefinieerd nabij de bodem, maar is hij een functie van z .

Substitutie van (2.35) en (2.36) in de d.v. geeft, na enig herleiden:

$$\xi p/\xi t = \sqrt{8/3\pi} \cdot kz \cdot \xi^2 \hat{p} p/\xi z^2 \quad 2.37$$

- 2- Voor \hat{p} wordt een exponentieel verloop verondersteld volgens:

$$\hat{p} = \hat{p}_b \cdot \exp(-2\pi \cdot z/\lambda_p) \quad 2.38$$

waarin: \hat{p}_b = bodemschuifspanning
 λ_p = golflengte voor p .

Met behulp van de hulpvariabele q :

$$q = p \cdot \exp(-2\pi \cdot z/\lambda_p), \quad 2.39$$

vinden we nu de volgende differentiaalvergelijking:

$$\xi q/\xi t = [\sqrt{8/3\pi} \cdot \hat{p}_b \cdot kz \cdot \exp(-2\pi z/\lambda_p)] \cdot \xi^2 q/\xi z^2 \quad 2.40$$

- 3- Dit is nog steeds geen lineaire diffusie vergelijking, omdat de tussen haakjes geplaatste term ($=\nu t$) nog een functie is van z . Dit kan worden opgelost door voor νt het gemiddelde te nemen over λ_p :

$$\bar{\nu t} = 1/\lambda_p \int_0^{\lambda_p} \nu t(z) dz \approx \sqrt{8/3\pi} \cdot k\lambda_p/4\pi^2 \cdot \hat{p}_b \quad 2.41$$

n.b.: Deze laatste schematisatie betekent dat de snelheidsverdeling boven een ruwe bodem weer de gedaante van (2.33) zal hebben. Immers, νt is nu geschematiseerd tot een konstante, en de konstante ν was precies de voorwaarde voor het kunnen oplossen van d.v. (2.30).

Invullen van (2.41) in (2.40), geeft de volgende lineaire diffusievergelijking:

$$\xi q / \xi t = \bar{\nu} t \cdot \xi^2 q / \xi z^2 \quad 2.42$$

met randvoorwaarden:

$$p = p_b = \hat{p}_b \cdot \cos(\omega t) \rightarrow q = \hat{q}_b \cdot \cos(\omega t), \text{ voor } z=0$$

$$p = 0 \rightarrow q=0, \text{ voor } z > z_{\text{grens}}.$$

Dit resulteert uiteindelijk in de volgende oplossing voor $u(z)$:

$$u(z) = \sqrt{(3\pi/8)} \cdot \hat{p}_b / k \cdot \exp(i\omega t) \cdot [Ei(r/33 \cdot k \cdot (1+2i)) - Ei(zk \cdot (1+2i))] \quad 2.43$$

Waarin: $Ei(y) = \int_0^\infty \exp(-t)/t$, de exponentiële integraal (getabelleerd)
 en $k = 2\pi/\lambda$, met $\lambda = 4/\pi \cdot \sqrt{(8/3\pi)} \cdot k \cdot \hat{p}_b \cdot T$

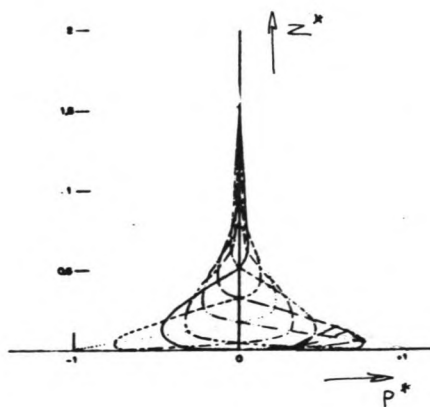
Het blijkt nu dat u_d en u_b in (2.43) zijn terug te vinden volgens:

$$u_d = -\sqrt{(3\pi/8)} \cdot \hat{p}_b / k \cdot \exp(i\omega t) \cdot Ei(zk \cdot (1+2i)) \quad 2.44$$

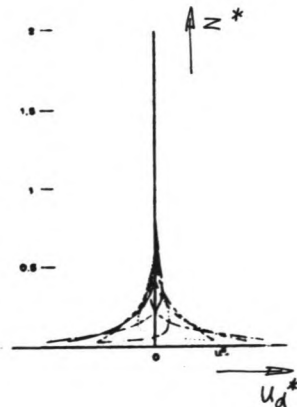
$$\text{en } u_b = u_m \cdot \cos(\omega t) = \sqrt{(3\pi/8)} \cdot \hat{p}_b / k \cdot \exp(i\omega t) \cdot Ei(r/33 \cdot k \cdot (1+2i)) \quad 2.45$$

Wanneer bedacht wordt dat alleen het reële deel van (2.43) een fysische betekenis heeft voor $u(z)$, dan blijkt inderdaad de algemene gedaante van (2.33) in de formule te zitten.

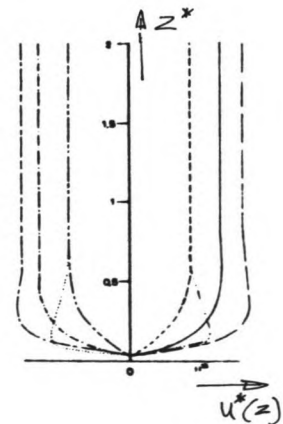
Differentiaalvergelijking (2.34) is door Bakker ook op numerieke wijze opgelost. Zonder op de gehanteerde oplossingsmethodiek in te gaan, wordt hier volstaan met te verwijzen naar de afbeeldingen 2.7, 2.8 en 2.9, waarin respectievelijk oplossingen van p , u_d en $u(z)$ te zien zijn (dimensieloos).



afb. 2.7



afb. 2.8

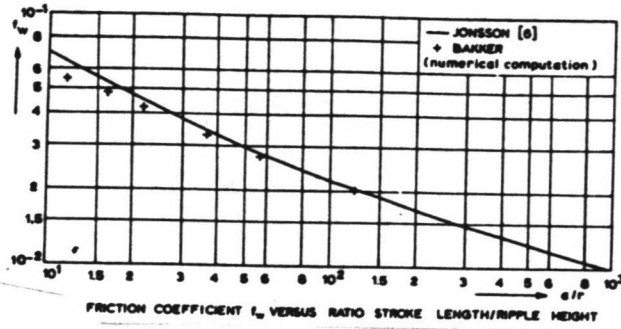


afb. 2.9

De hierboven beschreven theorie betreffende de verticale snelheidsverdeling $u(z)$, kan getoetst worden aan de hand van de bodemwrijvingscoëfficiënt van Jonsson, f_w . Doordat τ voor de analytische oplossing benaderd is volgens (2.35), geldt hier voor f_w (vergelijk ook 2.16):

$$f_w = 3\pi/8 \cdot (\hat{p}_b / k u_m)^2 \quad 2.46$$

Met behulp van (2.46) kan f_w worden bepaald als functie van a/r . Afbeelding 2.10 laat het aldus verkregen verband zien voor de numerieke en de analytische methode.



afb. 2.10

2.3 BODEMWRIJVING BIJ STROMING EN GOLVEN

Teneinde onderscheid te kunnen maken tussen bodemwrijving bij alleen stroming, alleen golven en stroming plus golven, zal in het vervolg worden gewerkt met de subscripten c (current) voor stroming, w (waves) voor golven en cw voor stroming plus golven.

De bodemwrijving bij alleen stroming en alleen golven werd beschreven door respectievelijk de vergelijkingen (2.12) en (2.16):

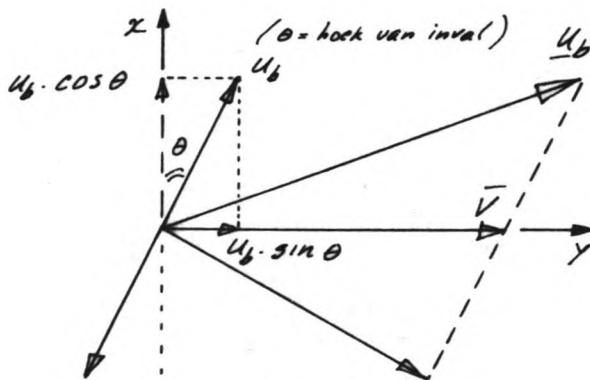
$$2.12 : \tau_{b,c} = \rho \cdot C \cdot \bar{v}^2 \quad 2.47$$

$$2.16 : \tau_{b,w} = \rho \cdot (\%fw) \cdot u_b^2 \quad 2.48$$

Analoog hieraan kan de momentane bodemwrijving bij stroming en golven geschreven worden als:

$$\tau_{b,cw} = \rho \cdot C^* \cdot \underline{u}_b \cdot |\underline{u}_b| \quad 2.49$$

Waarin: C^* = een dimensieloze bodemwrijvingscoëfficiënt;
 \underline{u}_b = de momentane snelheidsvektor in een punt nabij de bodem.



afb. 2.11

De momentane snelheidsvektor wordt gevonden door vectorieel optellen van u_b en \bar{v} uit (2.47) en (2.48) (zie Afb. 2.11):

$$\underline{u}_b = (u_b \cdot \cos \theta, u_b \cdot \sin \theta + \bar{v}) \quad 2.50$$

De absolute waarde van \underline{u}_b is:

$$|\underline{u}_b| = \sqrt{[u_b^2 + 2 \cdot u_b \cdot \bar{v} \cdot \sin \theta + \bar{v}^2]} \quad 2.51$$

Substitutie van (2.50) en (2.51) in (2.49) levert, na middeling over de golfperiode T:

$$\bar{\tau}_{b,cw} = \begin{pmatrix} \bar{\tau}_{b,cw,x} \\ \bar{\tau}_{b,cw,y} \end{pmatrix} = C^* \cdot \rho \cdot 1/T \cdot \int_0^T \sqrt{[u_b^2 + 2 \cdot u_b \cdot \bar{v} \cdot \sin \theta + \bar{v}^2]} \cdot \begin{pmatrix} u_b \cdot \cos \theta \\ u_b \cdot \sin \theta + \bar{v} \end{pmatrix} dt \quad 2.52$$

We zullen ons hier verder beperken tot de komponent in langsstroomrichting. Invullen van $u_b = u_m \cdot \cos(\omega t)$ (vgl. 2.21), alsmede $C^* = C$ (H.S. 2.1) levert dan:

$$\bar{\tau}_{b,cw} = C \cdot \rho \cdot \bar{v}^2 \cdot f(\theta, u_m/\bar{v}) \quad 2.53$$

$$\text{Waarin: } f(\theta, u_m/\bar{v}) = 1/T \cdot \int_0^T \frac{\sqrt{[1 + 2 \cdot u_m/\bar{v} \cdot \sin \theta \cdot \cos(\omega t) + (u_m/\bar{v})^2 \cdot \cos^2(\omega t)]}}{(1 + u_m/\bar{v} \cdot \sin \theta \cdot \cos(\omega t))} dt \quad 2.54$$

$f(\theta, u_m/\bar{v})$ is een elliptische integraal, die kan worden benaderd (zie Visser, 1982) met:

$$f(\theta, u_m/\bar{v}) = 1 + \% (u_m/\bar{v})^2 \cdot (1 + \sin^2 \theta) \cdot \exp(-1/6 \cdot u_m/\bar{v}), \text{ voor } u_m/\bar{v} < 1 \quad 2.55$$

$$f(\theta, um/\bar{v}) = (10 - um/\bar{v})/9 \cdot [1 + k(um)^2 \cdot (1 + \sin^2\theta) \cdot \exp(-1/6 \cdot um/\bar{v})] + (um/\bar{v} - 1)/9 \cdot [2/\pi \cdot um/\bar{v} \cdot (1 + \sin^2\theta)], \text{ voor } 1 < um/\bar{v} < 10 \quad 2.56$$

$$f(\theta, um/\bar{v}) = 2/\pi \cdot um/\bar{v} \cdot (1 + \sin^2\theta), \text{ voor } um/\bar{v} > 10 \quad 2.57$$

Bijker (1967), gebruikt niet de gekombineerde orbitaalsnelheid (u_b) en de gemiddelde langsstroomsnelheid (\bar{v}), zoals hierboven is uiteengezet, maar hij bepaalt de snelheidsvektor op een hoogte $z = z_t = r/33$, in de (hypothetische) grenslaag.

Vektoriele optelling van (2.10) en (2.23) levert:

$$\underline{u}(z_t) = (P \cdot um \cdot \cos\theta \cdot \cos(\omega t), P \cdot um \cdot \sin\theta \cdot \cos(\omega t) + \sqrt{C/k} \cdot \bar{v}) \quad 2.58$$

Analoog aan (2.15) en (2.24) geldt dan voor de schuifspanning in $z = z_t$:

$$\bar{\tau}_{b,cw} = \bar{\tau}_{t,cw} = \rho \cdot k^2 \cdot \underline{u}(z_t) \cdot |\underline{u}(z_t)| \quad 2.59$$

Substitutie van (2.58) in (2.59) en middeling over T levert:

$$\bar{\tau}_{b,cw} = C \cdot \rho \cdot \bar{v}^2 \cdot f(\theta, \xi um/\bar{v}) \quad 2.60$$

$$\text{Waarin: } f(\theta, \xi um/\bar{v}) = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{\sqrt{(1 + 2 \cdot \xi um/\bar{v} \cdot \sin\theta \cdot \cos(\omega t) + ((\xi um/\bar{v})^2 \cdot \cos^2(\omega t)) \cdot (1 + \xi um/\bar{v} \cdot \sin\theta \cdot \cos(\omega t)))}}{dt} \quad 2.61$$

$$\text{en } \xi = P \cdot k / \sqrt{C} \quad 2.62$$

Met de theorie van Bijker geldt dat $\xi = \xi_b \approx 0,16 / \sqrt{C}$.

Swart (1974), combineert a.h.w. de theorien van Bijker en Jonsson. Eerder zagen we dat $P_s = 1/k \cdot \sqrt{(f_w/2)}$. Wanneer we dit invullen in (2.62), dan levert dat:

$$\xi = \xi_s = \sqrt{(k f_w / C)}$$

Voor $um/\bar{v} = 0$, dat wil dus zeggen in de situatie zonder golven, gaat de elliptische integraal naar 1. Voor $um/\bar{v} > 0$ zal $f(\theta, um/\bar{v}) > 1$ en stijgend met um/\bar{v} zijn. Dit houdt in dat in de situatie met stroming plus golven de bodemwrijving zal toenemen ten opzichte van de situatie met alleen stroming. Hoeveel de bodemwrijving zal toenemen hangt af van de verhouding um/\bar{v} (hoe groter um/\bar{v} , des te groter wordt $\bar{\tau}_{cw}$). Bovendien maakt het nog uit hoe de twee snelheidscomponenten worden gekombineerd, tot uiting komend in de factor ξ . Met het toenemen van ξ zal ook de voorspelde bodemwrijving toenemen. Dit houdt in dat de door Bijker en Swart voorspelde bodemwrijving groter zal zijn dan wanneer gebruik wordt gemaakt van (2.53) (met $\xi = 1$).

Hoe ziet nu de gekombineerde snelheidsverdeling nabij de bodem er uit? De in hoofdstuk 2.1 en 2.2 behandelde theorien dienen daartoe te worden uitgebreid naar drie dimensies (Bakker en Van Kesteren, 1984). De drie-dimensionale schuifspanningsvektor kan geschreven worden als:

$$\underline{\tau} = \rho \cdot \nu_t \cdot \xi \underline{u} / \xi z \quad 2.64$$

$$\text{Waarin } \nu_t \text{ volgens Prandtl: } \nu_t = (kz)^2 \cdot |\xi \underline{u} / \xi z|, \quad 2.65$$

$$\text{en } |\xi \underline{u} / \xi z| = \sqrt{((\xi u_x / \xi z)^2 + (\xi u_y / \xi z)^2)} \quad 2.66$$

Voor de bewegingsvergelijking in het horizontale vlak geldt:

$$\xi_{\underline{u}}/\xi t = -1/\rho \cdot \text{grad}(\text{Pr}) + 1/\rho \cdot \xi \underline{\tau}/\xi z \quad 2.67$$

Wanneer nu \underline{u}_b en \underline{u}_d gedefinieerd worden volgens:

$$\underline{u}_d = \underline{u}(z) - \underline{u}_b, \quad 2.68$$

zodanig dat: $\xi_{\underline{u}_b}/\xi t = -1/\rho \cdot \text{grad}(\text{Pr})$, 2.69

dan levert dat, analoog aan (2.29), de volgende differentiaal vergelijking:

$$\xi_{\underline{u}_d}/\xi t = -1/\rho \cdot \xi \underline{\tau}/\xi z \quad 2.70$$

Hieruit kunnen de volgende vergelijkingen voor $\underline{\tau}$ en \underline{u}_d worden afgeleid:

$$\xi \underline{\tau} = \underline{S} \cdot \nabla t \cdot \xi^2 \underline{\tau}/\xi z^2 \quad 2.71$$

$$\xi_{\underline{u}_d}/\xi z = \kappa \cdot z \cdot \xi_{\underline{u}_d}/\xi z \cdot \underline{S} \cdot \xi/\xi z (\kappa \cdot z \cdot \xi_{\underline{u}_d}/\xi z) \quad 2.72$$

Waarin: $\underline{S} = \begin{vmatrix} 1+\cos^2\alpha & \cos\alpha \cdot \sin\alpha \\ \cos\alpha \cdot \sin\alpha & 1+\sin^2\alpha \end{vmatrix}$,

$$\cos\alpha = \frac{\xi_{\underline{u}_x}/\xi z}{|\xi_{\underline{u}}/\xi z|} \quad \text{en} \quad \sin\alpha = \frac{\xi_{\underline{u}_y}/\xi z}{|\xi_{\underline{u}}/\xi z|}$$

Randvoorwaarden: $\underline{u}_d=0$, voor $z=z_{\text{grens}}$
 $\underline{u}_d=-\underline{u}_b$, voor $z=z_0=r/33$

Vergelijking (2.72) is numeriek opgelost. In afb.2.12 worden profielen $u(z)$ getoond voor verschillende tijdstippen t (bron: Bakker en Van Kesteren, 1984).

Voor een analytische oplossing dient weer de differentiaal vergelijking gelinealiseerd te worden tot de bekende lineaire diffusie vergelijking. Daartoe wordt weer de schuifspanningssnelheid ingevoerd, echter nu als vektor \underline{p} :

$$\underline{\tau} = \rho \cdot \underline{p} \cdot |\underline{p}| \quad 2.73$$

Met behulp van (2.76) en (2.77) kan voor \underline{p} geschreven worden:

$$\underline{p} = \kappa \cdot z \cdot \xi_{\underline{u}}/\xi z \quad 2.74$$

Waarbij \underline{p} , evenals $\underline{\tau}$ is opgebouwd uit een konstant en een fluktuierend deel:

$$\underline{p} = \underline{\bar{p}} + \underline{\tilde{p}}, \quad \text{met} \quad \underline{\tilde{p}} = \hat{\underline{p}} \cdot \sin(\omega t + \phi) \quad 2.75$$

$$\underline{\tau} = \underline{\bar{\tau}} + \underline{\tilde{\tau}}, \quad \text{met} \quad \underline{\tilde{\tau}} = \hat{\underline{\tau}} \cdot \sin(\omega t + \phi) \quad 2.76$$

Uit de bewegingsvergelijking (2.67), met gebruikmaking van (2.74) is de volgende differentiaal vergelijking af te leiden :

2.12 Numerical computation 3 dim. velocity field (example)

2.12 a Direction of time averaged velocity and orbital motion far from the bottom; point 1 to 4 denotes the point of the velocity vector at the time corresponding to the dot in the sinecurve shown in Figure 3c to 3f.

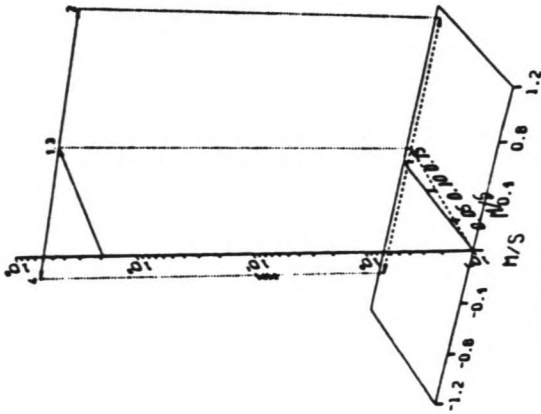
(N.B. scale of the horizontal coordinate perpendicular to orbital motion has been exaggerated; the same holds for Figure 3c to 3f).

2.12 b Time averaged velocity profile (\bar{u}) and amplitude of orbital motion (\bar{U}).

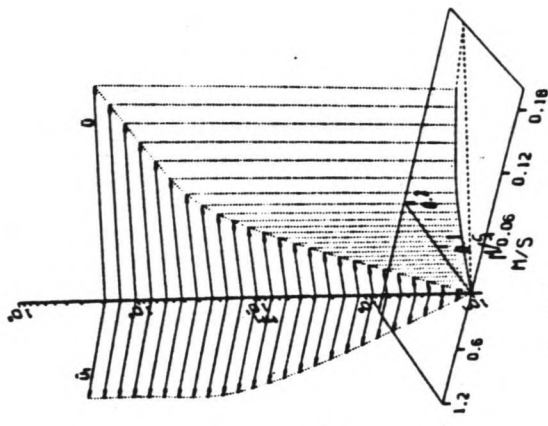
(N.B. scale for \bar{U} differs from \bar{u}).

2.12 c to 2.12 f

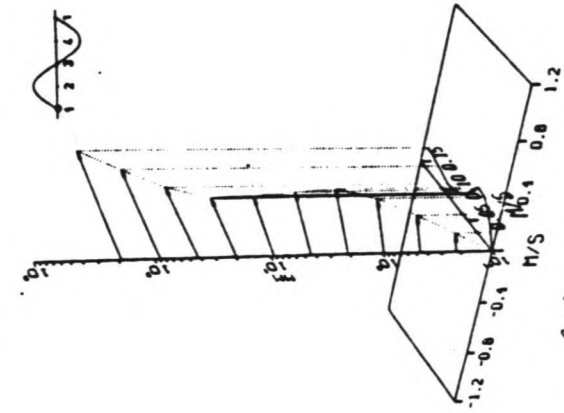
Momentaneous velocity profiles.



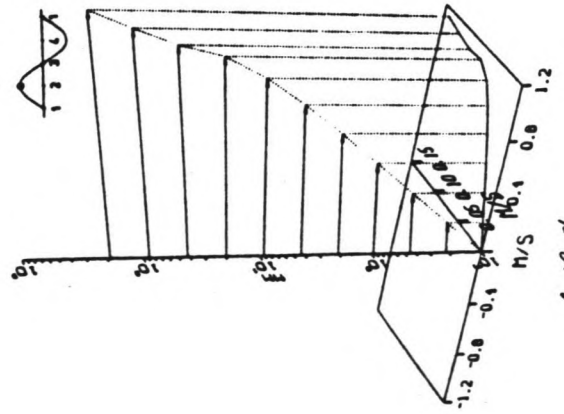
2.12 a



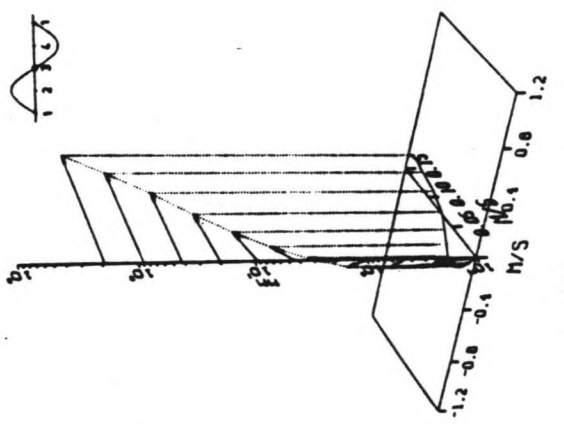
2.12 b



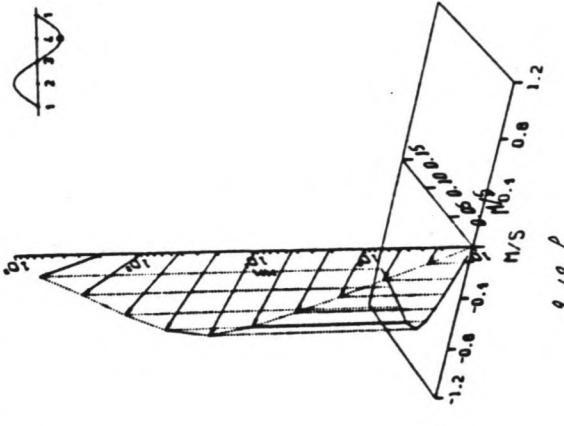
2.12 c



2.12 d



2.12 e



2.12 f

$$\delta \underline{p} / \delta t = 1 / \rho \cdot \kappa \cdot z \cdot \delta^2 \underline{\tau} / \delta z^2 \quad 2.77$$

Omdat $\underline{\tilde{p}}$ en $\underline{\tilde{\tau}}$ in fase zijn geldt, door (2.75) en (2.76) te differentieren naar t, en vervolgens op elkaar te delen:

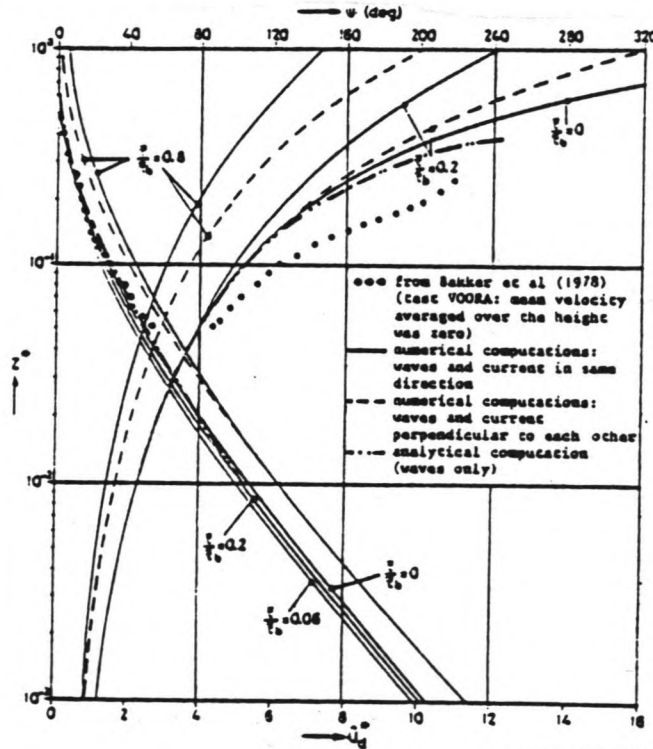
$$\delta \underline{\tilde{p}} / \delta t = \hat{p} / \hat{\tau} \cdot \delta \underline{\tilde{\tau}} / \delta t \quad 2.78$$

Invullen van (2.78) in (2.77), terwijl verondersteld wordt dat $\underline{\tilde{\tau}}$ konstant is in z-richting, levert de volgende vergelijking voor het oscillerende deel van $\underline{\tilde{\tau}}$:

$$\delta \underline{\tilde{\tau}} / \delta t = (\kappa \cdot z \cdot \hat{\tau} / (\rho \cdot p)) \cdot \delta^2 \underline{\tilde{\tau}} / \delta z^2 \quad 2.79$$

(De vektor-notatie kan achterwege blijven, omdat deze vergelijking alleen geldig is in het vlak van oscillatie.)

Vergelijking (2.79) is verder op te lossen door de tussen haakjes geplaatste term te benaderen als een konstante. Voor resulterende uitkomsten voor u zie afb. 2.13 (bron: Bakker en Van Kesteren, 1984).



afb. 2.13 Dimensionless amplitude and phase of the defect velocity

Vergelijking van afb. 2.13 met afb. 2.8 voor het 2-dimensionale geval, leert dat de orbitaalbeweging o.i.v. de langsstrooming niet wezenlijk verandert.

Hoe verandert nu de gemiddelde langsstroomsnelheid als gevolg van de golfbeweging? Teneinde meer inzicht daaromtrent te verkrijgen schrijven we (2.73) met behulp van (2.75) als:

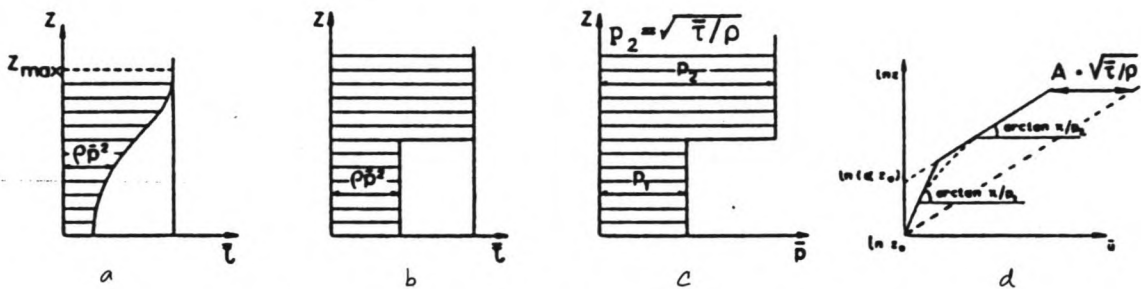
$$\underline{u} = \rho \cdot (\underline{\tilde{p}} + \underline{\tilde{p}}) \cdot |\underline{\tilde{p}} + \underline{\tilde{p}}| \quad 2.80$$

Het betreft hier een zelfde vektoriele optelling als eerder werd getoond in afb. 2.11. Evenals daar gebeurde, beperken we ons ook hier

tot de komponent in langstroomrichting. Middeling over de periode T levert dan:

$$\bar{\tau}_{cw,y} = \rho \cdot 1/T \cdot \int_0^T \sqrt{(\bar{p}^2 + 2 \cdot \bar{p} \cdot \tilde{p} + \tilde{p}^2)} \cdot (\bar{p} + \tilde{p}) dt \quad 2.81$$

Verder van de bodem wordt de invloed van het fluktuuerende deel van (2.81) geleidelijk kleiner. Dit wordt weergegeven in afb. 2.14a en vervolgens geschematiseerd in afb. 2.14b. In afb. 2.14c is niet $\bar{\tau}$ uitgezet op de horizontale as, maar \bar{p} .



Computation mean velocity schematically

afb. 2.14 (bron: Bakker en Van Kesteren, 1984)

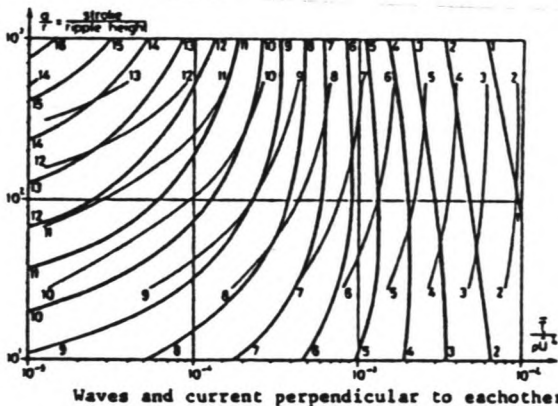
De tijd-gemiddelde stroomsnelheid $u(z)$ kan gevonden worden uit \bar{p} middels integratie van (2.74) over de diepte:

$$\bar{u}(z) = \int_{z_0}^z \bar{p} / (k \cdot z) dz \quad 2.82$$

Dit wordt schematisch weergegeven in afb. 2.14d. De karakteristieke "knik" in het snelheidsprofiel kwamen we eerder tegen in afb. 2.12. De helling van het bovenste deel van het profiel is theoretisch dezelfde als die voor stroming zonder golven. Het profiel ligt echter in zijn geheel hoger, wat dus wil zeggen dat de gemiddelde snelheid afneemt ten gevolge van de aanwezigheid van golven. Deze afname van de snelheid (bij een konstant verhang), korrespondeert met de eerder afgeleide toename van de bodemwrijving (en dus ook toename van het verhang), als bedacht wordt dat de gemiddelde stroomsnelheid hierbij konstant werd verondersteld.

Onder verwaarlozing van het onderste deel in afb. 2.14d, kan nu voor de tijd-gemiddelde snelheid $u(z)$ geschreven worden (Lundgren, 1972):

$$\bar{u}(z) = \sqrt{(\bar{\tau}/\rho)} \cdot (1/k \cdot \ln(z/z_0) - A) \quad 2.83$$



Afbeelding 2.15 toont de faktor A als functie van a/r en $\bar{\tau} / \rho u_m^2$ (bron: Bakker en Van Kesteren, 1984).

afb. 2.15

3: BESCHRIJVING VAN DE EXPERIMENTEN

3.1 DE TE METEN GROOTHEDEN

In hoofdstuk 2 is gebleken dat de bodemwrijving kan worden bepaald uit (zie vergelijking 2.60):

$$\tau_b = C \cdot \rho \cdot \bar{v}^2 \cdot f(\theta, \xi_{um}/\bar{v}) \quad 3.1$$

Bij dit onderzoek zijn we vooral geïnteresseerd in de invloed van golven op de bodemwrijving in langsstroomrichting. Die invloed komt tot uiting in de verhouding $\tau_{b,cw}/\tau_{b,c}$ (in het vervolg steeds aangegeven met τ_{cw}/τ_c).

Voor het geval van alleen stroming hebben we gezien dat de elliptische integraal $f(\theta, \xi_{um})$, gelijk wordt aan 1. Wanneer derhalve wordt verondersteld dat de langsstroming met of zonder golven hetzelfde blijft, dan geldt voor τ_{cw}/τ_c :

$$\tau_{cw}/\tau_c = f(\theta, \xi_{um}/\bar{v}) \quad 3.2$$

In hoofdstuk 2 hebben we ook gezien dat de bodemwrijving recht evenredig is met het verhang van de waterspiegel (vergelijking 2.3):

$$\rho \cdot g \cdot h \cdot i - \tau_b = 0 \quad 3.3$$

Hieruit volgt dat τ_{cw}/τ_c gerelateerd kan worden aan de verhouding van de verhangen bij respektievelijk stroming plus golven en alleen stroming:

$$\tau_{cw}/\tau_c = i_{cw}/i_c = f(\theta, \xi_{um}/\bar{v}) \quad 3.4$$

Dit is de theorie zoals hij werd toegepast door Bijker in 1967 en ook door mijn voorgangers op dit onderzoek, Van Leyen en Van der Vlerk. Bij de onderhavige proevenserie is echter gebleken dat in de situatie met stroming en golven er minder water over het talud stroomt dan in de situatie met alleen stroming. Dit heeft tot gevolg dat meer water over het konstant-diepte gedeelte stroomt en dus de gemiddelde stroomsnelheid (op het konstant-diepte gedeelte) groter is. De relatering van τ_{cw}/τ_c aan $f(\theta, \xi_{um}/\bar{v})$ en i_{cw}/i_c kan dus niet zonder meer geschieden, maar eerst nadat deze grootheden zijn "gewogen" met de bijbehorende waarden van h en \bar{v} . Dit gaat als volgt in zijn werk: Kombinatie van (3.1) en (3.3) levert voor de situatie met stroming en golven:

$$g \cdot h_{cw}/\bar{v}_{cw}^2 \cdot i_{cw} - C \cdot f(\theta, \xi_{um}/\bar{v}_{cw}) = 0 \quad 3.5$$

Voor de situatie met alleen stroming geldt dat $f(\theta, \xi_{um}/\bar{v})=1$, zodat we dan vinden:

$$g \cdot h_c/\bar{v}_c^2 \cdot i_c - C = 0 \quad 3.6$$

Uit (3.5) en (3.6) volgt nu een "gewogen" verband tussen $f(\theta, \xi_{um}/\bar{v})$ en i_{cw}/i_c :

$$f(\theta, \xi_{um}/\bar{v}_{cw}) = hcw/hc \cdot (\bar{v}_c/\bar{v}_{cw})^2 \cdot icw/ic = (icw/ic)_{\text{gewogen}} \quad 3.7$$

Bij het onderhavige onderzoek wordt de theoretisch voorspelde toename van de bodemwrijving (uitgedrukt als $f(\theta, \xi_{um}/\bar{v}_{cw})$) getoetst aan de gemeten toename (uitgedrukt als $(icw/ic)_{\text{gew.}}$).

De elliptische integraal $f(\theta, \xi_{um}/\bar{v})$ kan benaderd worden met (2.55) t/m (2.57). Verder zullen er drie verschillende waarden voor ξ worden toegepast, namelijk $\xi=1$, $\xi=\xi_b$ en $\xi=\xi_s$ (zie hoofdstuk 2.3).

Alle voor dit onderzoek benodigde parameters zijn terug te voeren op de volgende basisgrootheden:

- \bar{v} = gemiddelde langsstroomheid;
- u_m = amplitude van de orbitaalsnelheid nabij de bodem (buiten de grenslaag);
- T = golfperiode;
- H = gemiddelde golfhoogte;
- \bar{h} = gemiddelde waterdiepte;
- i = waterspiegelverhang in stromingsrichting.

3.2 BESCHRIJVING VAN HET MODEL.

De metingen zijn verricht in het golfbassin van het laboratorium voor vloeistofmechanika van de T.H. Delft. De afmetingen van het bassin bedragen $16,6 \times 34,1 \text{ m}^2$, maar een groot gedeelte hiervan wordt benut voor instroming, golfmachine, talud en uitstroming. Het overblijvende oppervlak voor het stromingsmodel is $6,5 \times 25,0 \text{ m}^2$ (zie afb. 3.1).

Het water wordt vanuit de pompenkamer opgepompt naar 2 hooggelegen bufferreservoirs, vanwaaruit het door 2 buizen (maximum debiet ca. 800 l/s), naar het stromingsmodel wordt gevoerd. Deze buizen zijn voorzien van een regelbare afsluitklep, zodat de instroming traploos is in te stellen van 0 tot maximaal. Het systeem biedt de mogelijkheid om het instroomgebied af te lezen door een kwikmanometer aan te sluiten op in de buizen geplaatste meetflenzen. Door allerlei oorzaken kon hier echter geen gebruik van gemaakt worden.

De buizen monden uit in een soort woelbak, bedoeld om de woestheid van het instromende water zo veel mogelijk teniet te doen.

Na de woelbak stroomt het water over twee overlatten; de eerste vast, als begrenzing van de woelbak en de tweede in hoogte verstelbaar middels ca. 2 m lange houten schotten. De overlatten hebben tot doel het instromende water zo goed mogelijk over de breedte van het bassin te verdelen.

Vervolgens wordt het water door twee rijen met holle gaten stenen geleid, teneinde de turbulentie na de instroming zoveel mogelijk te beperken. Met deze stenen kan gemakkelijk instroom-weerstand worden opgebouwd c.q. weggenomen, zodanig dat zich zo snel mogelijk in het model een uniforme stroming instelt. Omdat gebleken was dat het logaritmische snelheidsprofiel nabij de instroming flauwer verliep dan verderop in het model (waar mocht worden verondersteld dat het model zich volledig had ingesteld), is bij de tweede rij stenen onderaan gaas bevestigd, zodat de stroomsnelheid bij instroming nabij de bodem wat wordt afgeremd (zie ook afb. 3.2).

Aan rechterzijde wordt het model begrensd door de golfmachine. Met deze machine kunnen regelmatige golven met een golfperiode tussen $0,65$ en 6 seconden worden opgewekt. De hoek van inval kan naar wens worden gekozen; bij de onderhavige experimenten is echter uitsluitend gewerkt met haaks op de stroming staande golven.

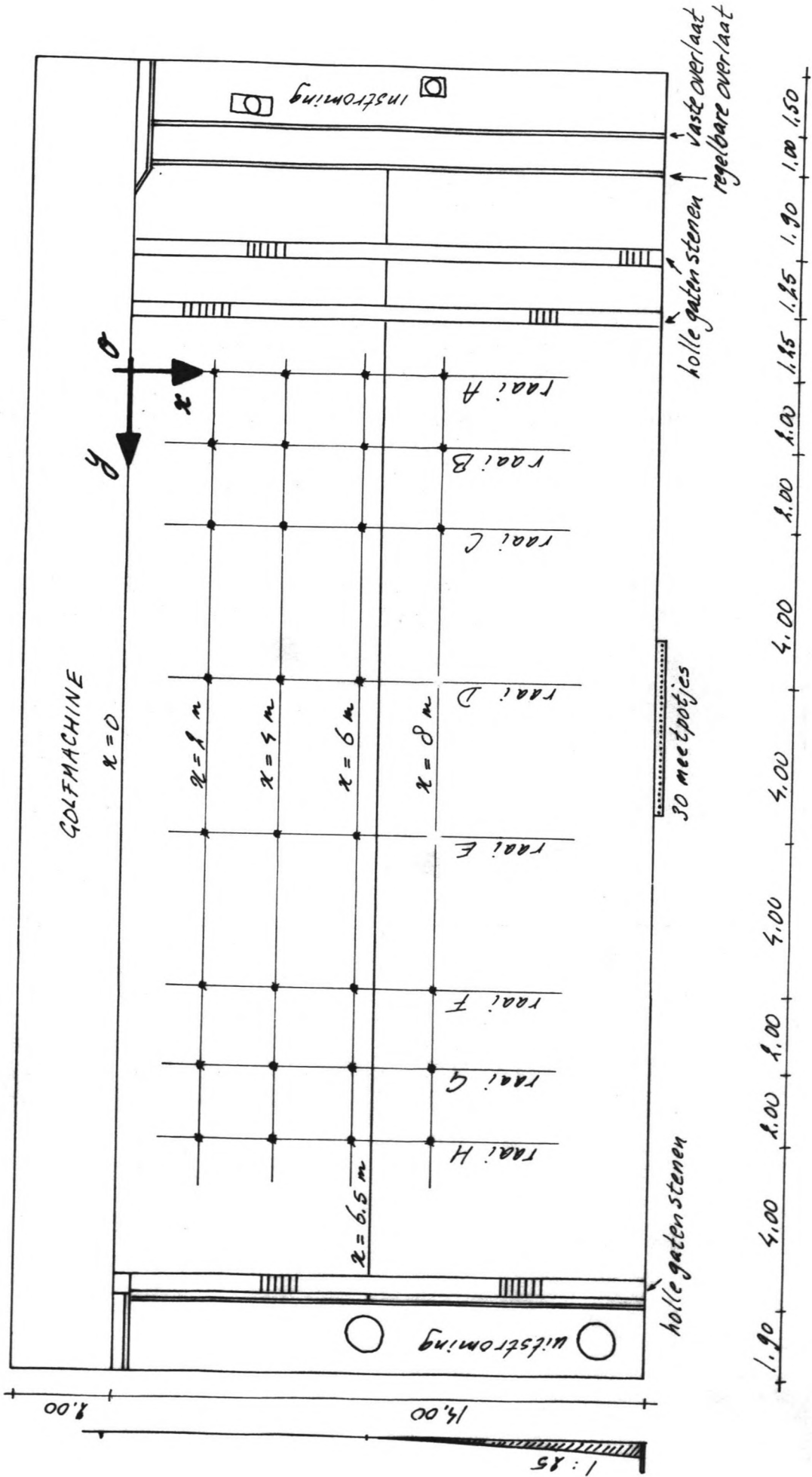
Het golfschot bestaat uit panelen met een breedte van $0,4 \text{ m}$. De beweging van het golfschot kan worden gevarieerd tussen een zuivere translatie (afb. 3.3a) en een volledig roterende beweging (afb. 3.3b). Afhankelijk van de waterdiepte en de golfperiode wordt aan de hand van een bij het golfbassin behorende grafiek een zodanige rotatie (=slaghoek) ingesteld, dat optredende stoorgolven worden geminiseerd. De slaglengte bepaalt vervolgens de golfhoogte.

Aan linkerzijde wordt het model begrensd door een talud van $1:25$. Dit talud is zo flauw gekozen om golfreflexie zoveel mogelijk te voorkomen.

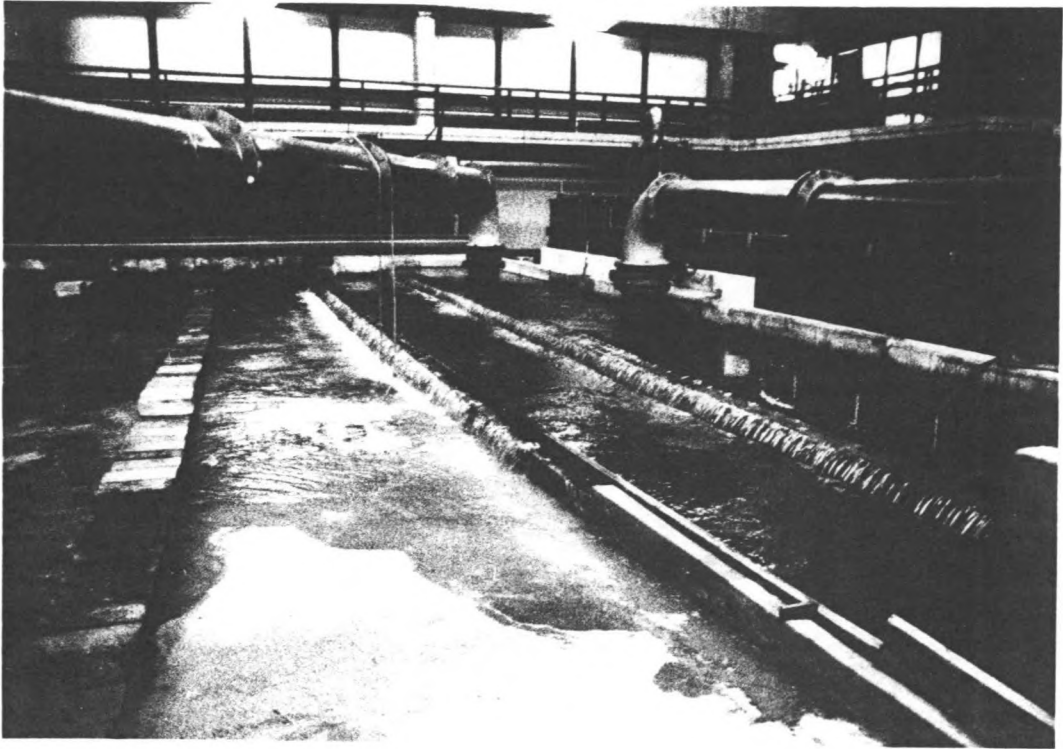
De uitstroming wordt gereguleerd door een enkele rij holle gaten stenen. Achter deze stenen is er een lage overlaat (ca. 10 cm), die de beëindiging vormt van het model.

Het water komt nu in een grote verzamelbak ($14 \times 2 \text{ m}^2$), waarin twee grote openingen (diameter ca. 1 m) voor de afvoer zorgen (zie afb. 3.5).

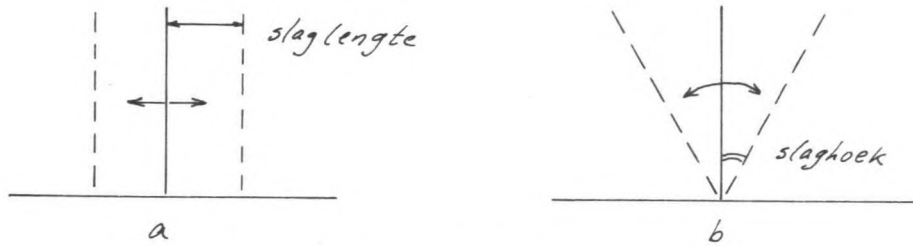
In het model is een coördinatenstelsel gekozen met de y-as in stro-



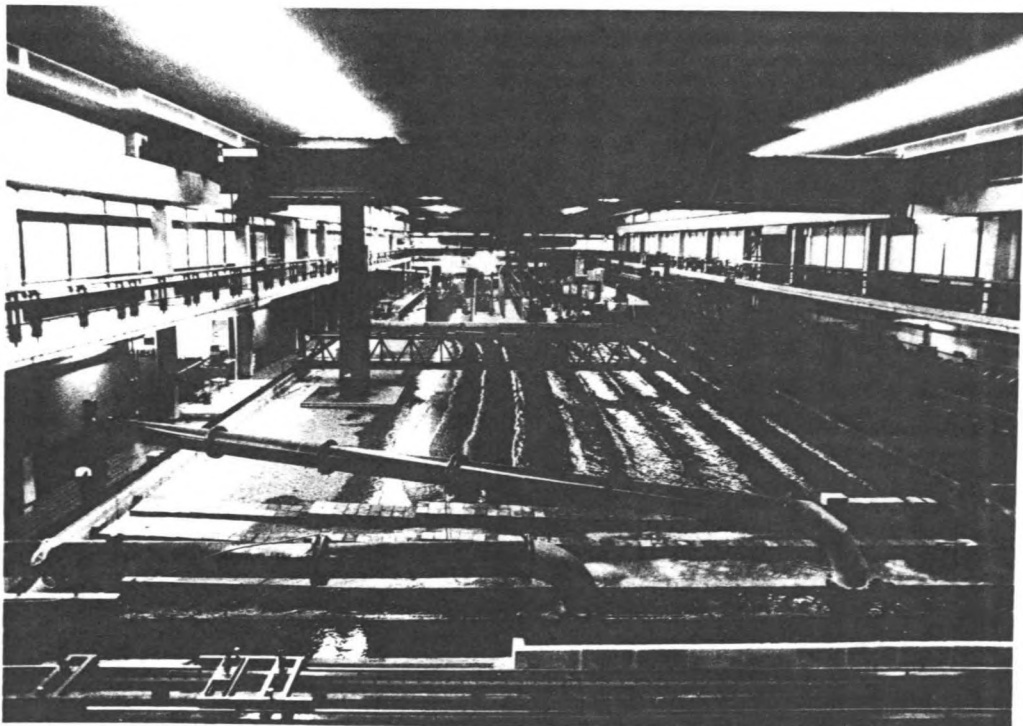
afb. 3.1 : golfbassin



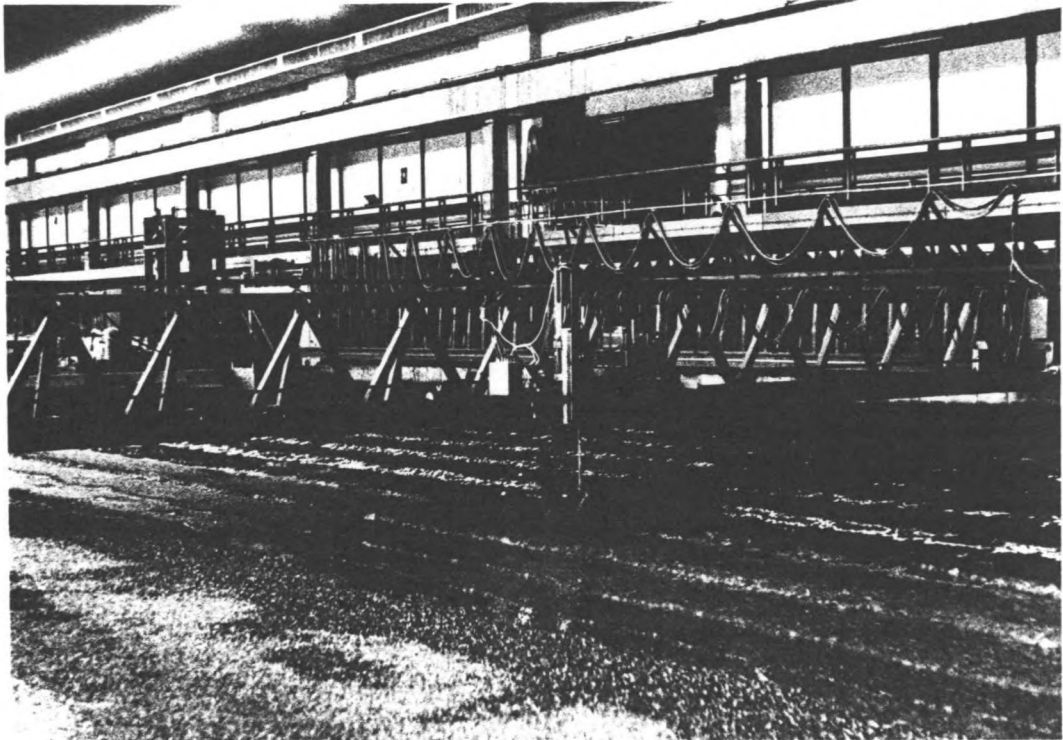
afb. 3.2 : instroming



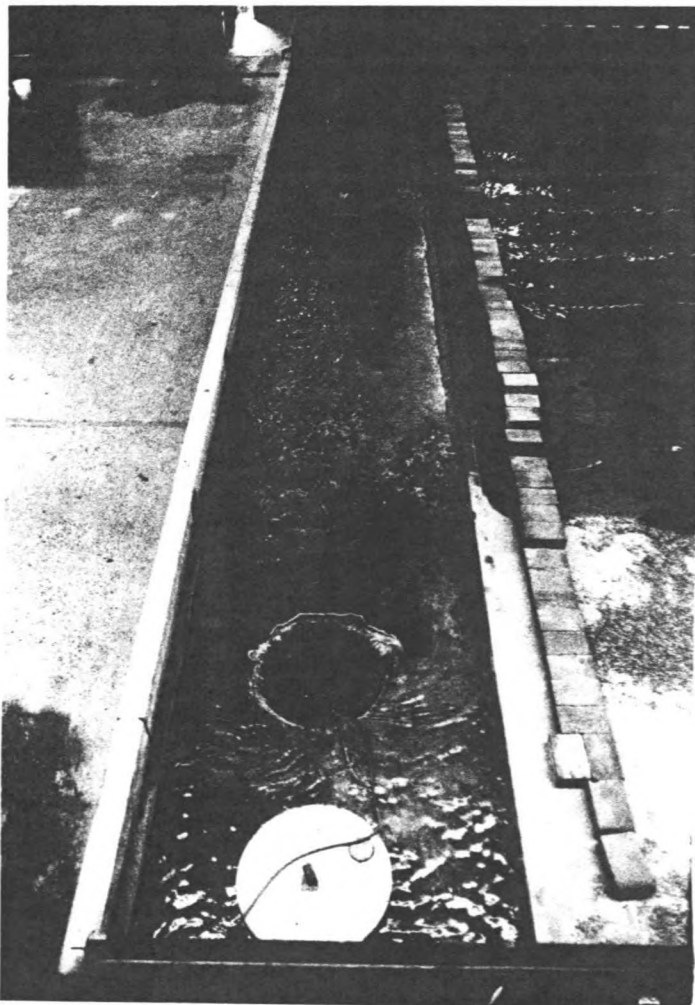
afb. 3.3 : golfmachine



afb. 3.4 : overzicht golfbassin



afb. 3.5 : meetbrug

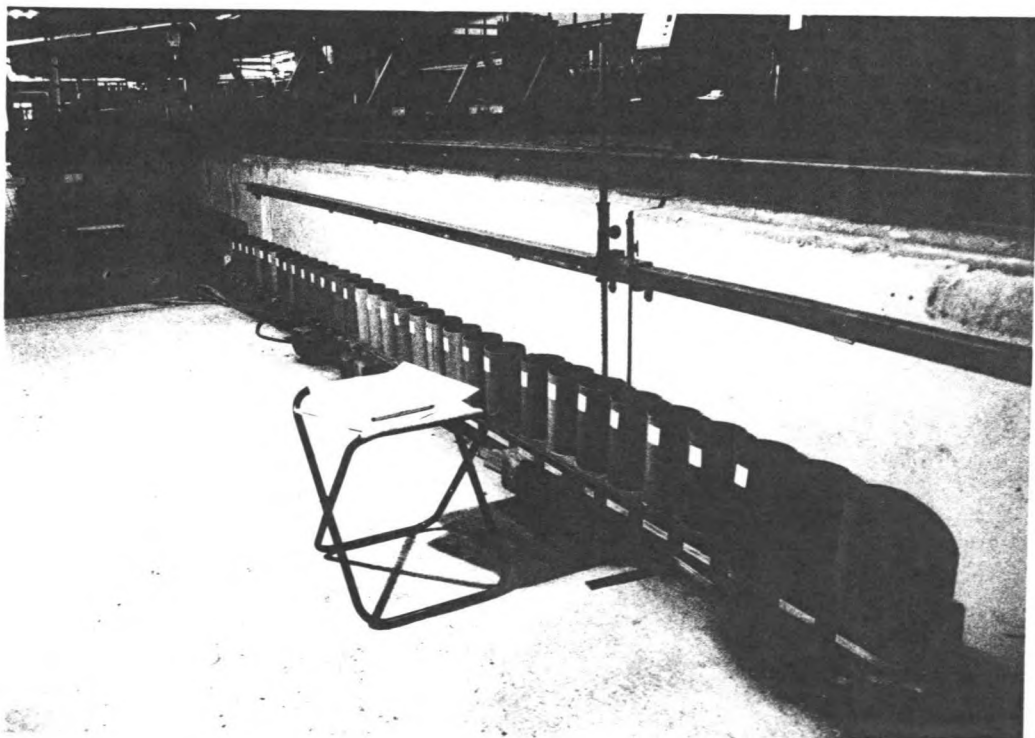


afb. 3.6 : uitstroming

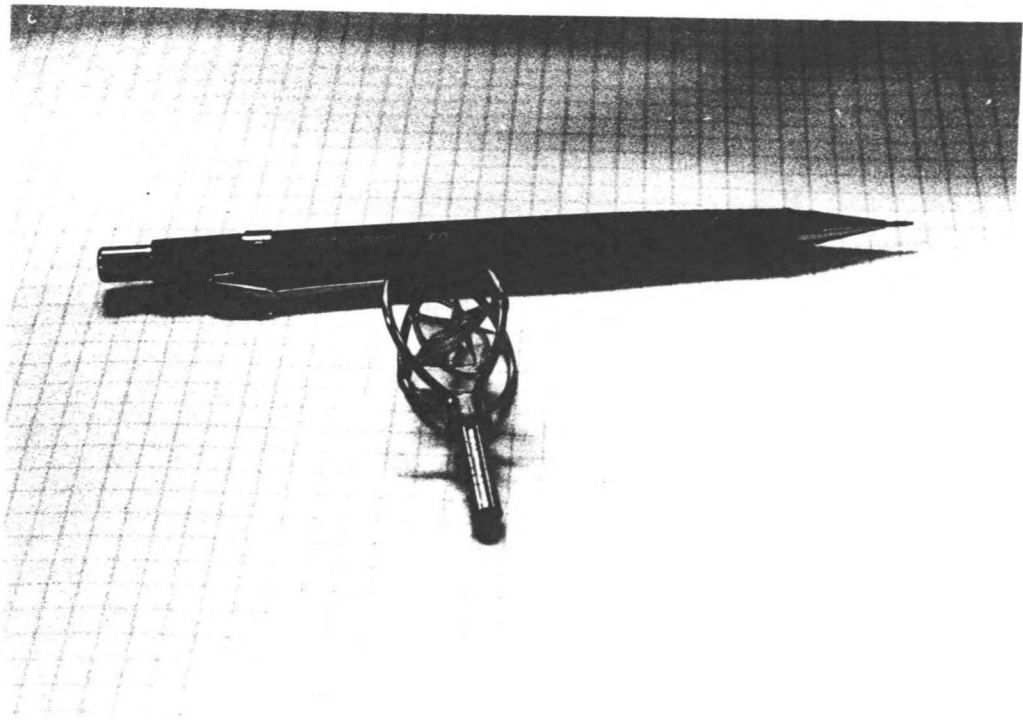
mingsrichting en de x-as loodrecht daarop. Er zijn acht meetraaien uitgezet evenwijdig aan de x-as (raai A t/m H), waarvan de eerste overeenkomt met het nulpunt van de y-as (= $\pm 1,25$ m vanaf de tweede rij stenen bij de instroming). De x-as heeft zijn oorsprong in de nulstand van het gofschot.

Over het golfbassin heen staat een verrijdbare brug, met daarop een meetwagen. Zowel de brug als de wagen zijn vanaf de kant te besturen, door eenvoudig een x- en een y-koordinaat in te toetsen. Op de meetwagen geïnstalleerde meetapparatuur kan zo naar ieder punt in het model worden gedirigeerd. De elektronische meetsignalen worden dan via een gesloten circuit naar registratie-apparatuur op de vaste wal geleid. Op deze wijze kunnen de metingen worden uitgevoerd zonder deze te behoeven te verstoren (zie afb. 3.6).

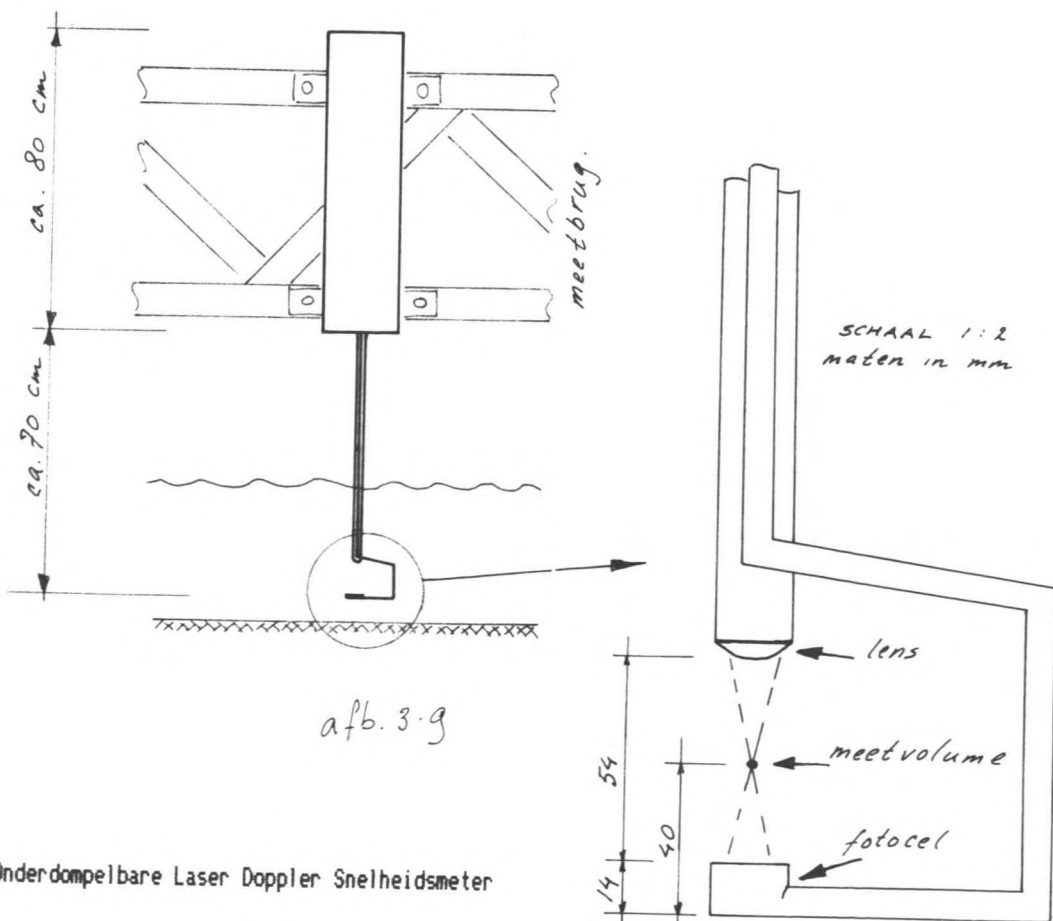
Vanwege het grote belang voor dit onderzoek van het verhang, moet op verschillende punten in het model het waterpeil worden gemeten. Hiervoor zijn er op 30 plaatsen in het vlak van de bodem, vierkante plaatjes aangebracht met in het midden een gaatje met een diameter van ongeveer 1 mm. In elke raai zijn er zo 4 meetpunten ($x=2$, $x=4$, $x=6$, $x=8$ m), behalve in de twee middelste raaien (D en E), waar er slechts 3 per raai zijn. Ieder meetpunt is via een dun slangetje, onder de bodem van het bassin door, aangesloten op meetpotjes buiten het bassin (zie afb. 3.7). In deze meetpotjes kan dan met behulp van een peilnaald, die bevestigd zit op een rail, het waterpeil worden afgelezen.



afb. 3.7 : meetpotjes



afb. 3.8 : mikromolen



afb. 3.9 : Onderdompelbare Laser Doppler Snelheidsmeter

3.3 BESCHRIJVING VAN DE METINGEN.

3.3.1 Meting basisgrootheden.

In hoofdstuk 3.1 zijn een aantal basisgrootheden geïntroduceerd waar alle andere van belang zijnde grootheden van kunnen worden afgeleid. In deze paragraaf wordt uiteengezet hoe de basisgrootheden zijn gemeten.

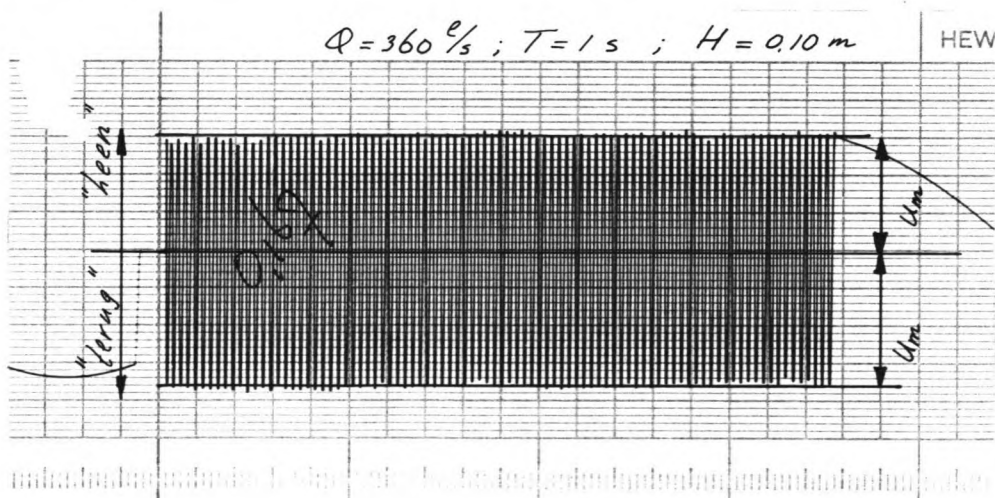
3.3.1.1 Snelheidsmetingen

Voor het meten van snelheden is gebruik gemaakt van Mikromolens (zie afb. 3.8) en van een z.g. Onderdompelbare Laser Doppler Snelheidsmeter (zie afb. 3.9).

De mikromolen is in feite een kleine propellor. Van die propellor wordt een reeks stroompulsjes afgeleid die vervolgens wordt omgezet in een fluktuerende spanning. Uit die spanning kan middels een bij de mikromolen behorende ijkformule de stroomsnelheid worden afgeleid.

Voor de registratie van de langsstroomsnelheid is gebruik gemaakt van een integrator. Door de integratietijd voldoende lang te nemen (100 sec.), kan uit de turbulente stroming een tijd-gemiddelde langsstroomsnelheid worden afgeleid.

Bij de orbitaalsnelheid zijn we met name geïnteresseerd in de snelheidsamplitude nabij de bodem u_m . Registratie van deze grootheid gebeurt via een schrijver (zie afb. 3.10) met een verticale schaal in Volts/mm.



afb. 3.10: orbitaal-snelheid

Door de schrijver een bepaalde tijd te laten registreren (1 min.) kan een gemiddelde waarde voor u_m worden bepaald, gebruik makend van de ijkformule.

Door de mikromolen steeds een stukje omhoog te draaien kan op deze wijze een snelheidsprofiel in kaart worden gebracht. Gezien de afmetingen van de molen (diameter 3 cm) kan tot op 1,5 cm van de bodem gemeten worden.

Het grote nadeel van de mikromolen is dat hij slechts snelheden in 1 richting tegelijk kan meten, waarbij deze richting ook nog konstant moet zijn. Dat wil zeggen dat in de situatie met stroming en golfveld de mikromolen niet toegepast kan worden. Daarom wordt met de mikromolen eerst in de situatie zonder golven op verschillende punten

in het model de langsstroomsnelheid gemeten. Hierna wordt zonder stroming (de afvoer-gaten zijn dan dichtgemaakt), bij een overeenkomend gemiddeld waternivo de orbitaalsnelheid gemeten.

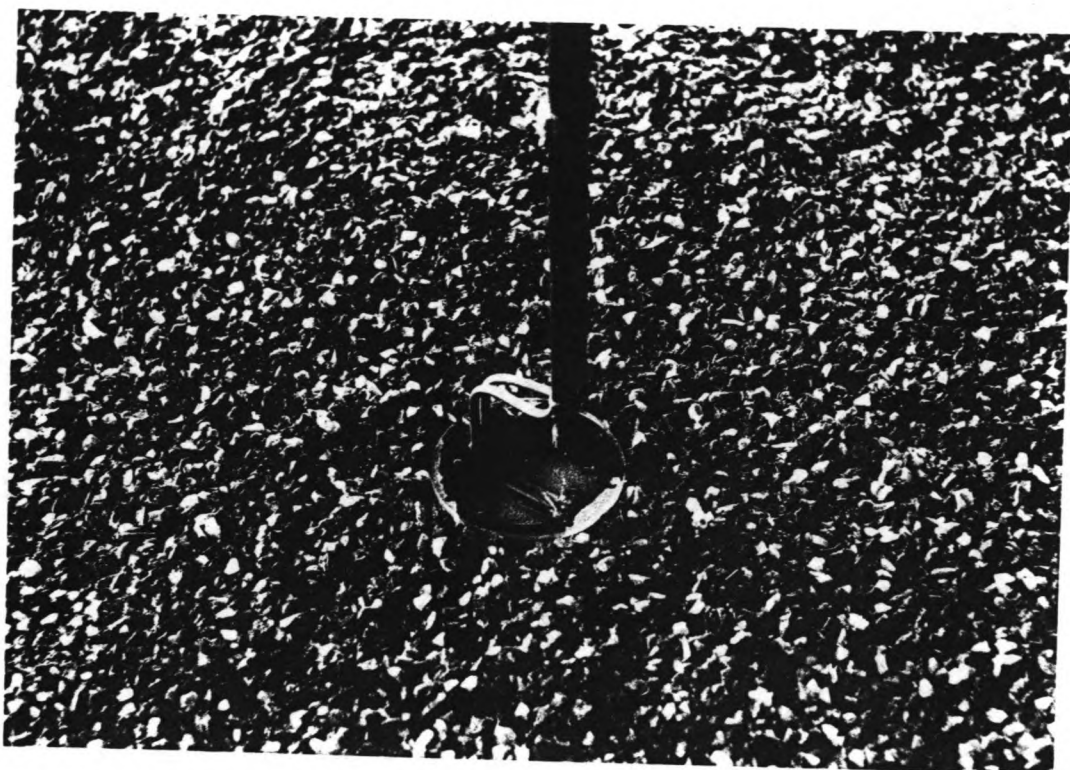
Omdat we bij dit onderzoek mede geïnteresseerd zijn in de invloed van een golfveld op de langsstroomsnelheid, is het van belang de twee snelheidskomponenten tegelijkertijd te kunnen meten. Daarom is voor de snelheidsmetingen ook gebruik gemaakt van de Onderdompelbare Laser Doppler Snelheidsmeter (O.L.D.S.).

Het betreft hier een prototype van een apparaat dat door het W.L. Delft speciaal is ontwikkeld om turbulente snelheden te kunnen meten in grote stroommodellen. De werking van de O.L.D.S. is (net als konventionele L.D. snelheidsmeters) gebaseerd op de afbuiging die een laserstraal ondervindt van met het stromende water meegevoerde mikroskopische deeltjes. Daartoe wordt een laserstraal met een bekende golflengte gefocussed met een referentiestraal. In het brandpunt ontstaat dan een voor het verschil in golflengte karakteristiek interferentiepatroon (het Doppler-effekt). Ten gevolge van een zich door het brandpunt bewegend deeltje worden de laserstralen afgebogen en zal het interferentiepatroon zich wijzigen. De mate waarin dit gebeurt wordt geregistreerd door een fotocel en is een maat voor de stroomsnelheid. Door nu 2 verschillende laserstralen te focussen met de referentiestraal kunnen 2 snelheidskomponenten loodrecht op elkaar worden gemeten.

De O.L.D.S. onderscheidt zich van de konventionele L.D.S., doordat de laserstralen door een smalle buis worden geleid, aan het eind waarvan ze (onder water) door middel van een lensje gefocussed worden. In ondergedompelde toestand ligt het brandpunt ca. 11 cm onder het lensje. De fotocel bevindt zich hier weer 2,5 cm onder (afb. 3.9). De opbouw van de O.L.D.S. is vertikaal, zodat hij aan de meetbrug bevestigd, op iedere gewenste plaats in het water gestoken kan worden.

Het meetvolume ligt in het focuspunt en heeft een doorsnede van ca. 1 mm. Het bevindt zich 4 cm boven de onderkant van de fotocel. Dit heeft als consequentie dat niet dichter dan 4 cm nabij de bodem gemeten kan worden. Omdat we juist geïnteresseerd zijn in de snelheden vlak bij de bodem is een meetopstelling verzonden waarbij de O.L.D.S. een stukje in de bodem zakt. Daartoe zijn op verschillende plaatsen in de bodem putjes aangebracht van dusdanige afmetingen, dat het beugeltje met daaraan bevestigd de fotocel, erin geplaatst kan worden. Vervolgens wordt het putje met een doorzichtig (perspex) plaatje weer afgedekt, teneinde ongewenste turbulenties te voorkomen (zie afb. 3.11). De dikte van het perspex plaatje is ongeveer gelijk aan de gemiddelde doorsnede van de ruwheidselementen ($d_{90}=8$ mm), zodat mag worden verondersteld dat de stroomlijnen niet of nauwelijks door dit plaatje worden beïnvloed. Het meetvolume kan nu tot vlak boven het perspex oppervlak, en dus tot vlak boven de bodem worden laten zakken.

De output van de O.L.D.S. is, net als bij de M.M. een fluktuerende spanning die via een ijkformule kan worden herleid tot een stroomsnelheid. De O.L.D.S. levert echter twee signalen, een voor de langsstroomsnelheid en een voor de orbitaalsnelheid. Voor de registratie is gebruik gemaakt van de schrijver (voor de langsstroomsnelheid) en van de integrator (voor de orbitaalsnelheid). De O.L.D.S. is twee maal, gedurende een periode van 2 weken op uitleenbasis door het W.L. beschikbaar gesteld.



afb. 3.11: metingen nabij de bodem

3.3.1.2 Golfperiode en Golfhoogte.

Bij de golfmachine zijn 3 variabelen in te stellen: de periode, de slaglengte en de slaghoek. Met het instellen van de periode ligt meteen de golfperiode T in het model vast. De golfhoogte wordt ingesteld middels de slaglengte van de golfmachine. Met de slaghoek kan de vorm van de golf worden geoptimaliseerd, in die zin dat zo min mogelijk stoorgolven zullen optreden.

Het golfveld in het model ligt nu dus vast. De feitelijke waarde van de golfhoogte is echter nog niet bekend, die moet n.l. in het model worden opgemeten. Daartoe is gebruik gemaakt van een op de meetwagen bevestigde golfhoogtemeter. Het signaal van de golfhoogtemeter wordt geregistreerd op een schrijver.

Bij het opwekken van de golven ontstaan er tevens hoger harmonische termen van de gewenste golf. De tweede harmonische, dat wil zeggen de golf met periode $\frac{1}{2}T$, is het duidelijkst aanwezig, vooral wanneer wordt gewerkt met lange golfperiodes (b.v. $T=2s$). Om de invloed van de tweede harmonische te beperken, dient in een raai over een lengte van $n \times \frac{1}{2}L$ gemeten te worden (waarin L =golflengte). De invloed van de tweede harmonische kan dan worden uitgemiddeld.

Het is gebleken dat de golfhoogte behoorlijk varieert over het model. Naast de eerder genoemde variaties ten gevolge van hogere orde stoorgolven, treden er op het talud duidelijke shoaling-effekten op. Langs de in- en uitstroming treedt het verschijnsel golf-diffractie op. Om die reden zijn de golfhoogten steeds in het midden van het model (raai D, raai E en soms ook een raai daar tussenin), op het konstant-diepte gedeelte gemeten.

Het belang van het kennen van de golfhoogten gaat overigens niet verder dan dat deze variabele samen met de golfperiode het golfveld

eenduidig karakteriseert.

3.3.1.3 Waterdiepte en Verhang

De waterdiepten op verschillende punten in het model zijn gemeten door gebruik te maken van de 30 meetpotjes, die in verbinding staan met punten in de bodem van het golfbassin (zoals beschreven in hoofdstuk 3.2). Door de combinatie van een klein gaatje, dat via een lange dunne leiding aan een meetpot met een relatief grote doorsnede (ca. 15 cm) gekoppeld is, bezit het meetsysteem voldoende traagheid om kort periodieke verschijnselen uit te dempen. Zo is het mogelijk om ook onder een golfveld konstante gemiddelde waterstanden te meten. Door de grote traagheid moet echter vrij lang gewacht worden voor het waterpeil in de meetpotjes zijn evenwichtsstand bereikt heeft.

Om het waterpeil in de potjes te kunnen meten, is boven de potjes een vaste rail aan de muur bevestigd, waarop een peilnaald gemonteerd kan worden. De peilnaald kan horizontaal over de rail verplaatst worden (zie afb. 3.7). Omdat het vrijwel onmogelijk is om de rail precies waterpas te bevestigen, zijn aan het begin van het onderzoek de waterpeilen in alle potjes gemeten, terwijl het water in het bassin in volledige rust was. Deze nulstands-metingen dienen als referentienivo voor alle volgende metingen, waarbij ieder potje zijn eigen nulstand heeft. Door bij een meting de nulstand van de gemeten waarde af te trekken, kan het waterpeil boven het nulstands-referentievlak worden bepaald.

Per raai zijn er 4 meetpunten (behalve in raai D en E, waar er slechts 3 zijn). De waterdiepten per raai kunnen worden gemiddeld tot een representatieve waterstand voor die raai. Als gemiddelde waterstand voor het gehele model wordt het gemiddelde over raai D en E genomen.

Het verhang in langsstroomrichting wordt bepaald door de lineaire regressie methode los te laten op de gemiddelde waterstanden uit de 8 meetraaien.

Het blijkt nu dat de in- en uitstroming een storende invloed hebben op de verhangmetingen, door plaatselijke niet-uniformiteit en turbulenties. Op het vlakke gedeelte van raai C tot en met raai F zijn deze invloeden het minst merkbaar, zodat de verhangen steeds bepaald worden uit de meetresultaten van raai C t/m F.

Elke serie verhangmetingen begon steeds met een meting bij alleen stroming. Vervolgens werd dan de golfmachine aangezet en werd bij de situatie stroming plus golven het verhang bepaald.

Werden de verhangmetingen bij alleen stroming gestoord door de in- en uitstroming, bij stroming plus golven werden de metingen ook gestoord door de invloed van de golven. In de eerste plaats was er de golfdiffractie bij de in- en uitstroming die een duidelijke invloed had op het stromingsbeeld ter plaatse. Dit verschijnsel is een reden te meer om de raaien A,B en G,H niet in de verhangberekening te betrekken. In de tweede plaats trad er een duidelijke wave set-down op bij het talud. Het vierde meetpunt in iedere raai ($x=8$), lag in de invloedssfeer van de wave set-down, reden waarom de meetresultaten van deze punten niet worden meegenomen in de berekening van de gemiddelde waterstand per raai. Tenslotte was ook nog de invloed van de tweede harmonische op de waterstandsmetingen merkbaar. De tweede harmonische heeft n.l. een ^{kleinere} grotere voortplantingssnelheid dan de eerste. De twee golven versterken en verzwakken elkaar op regelmatige afstand. De maxima en minima zullen steeds op dezelfde plaats in het model optreden. Hierdoor kunnen de waterstandsmetingen in een

raai een tamelijk grote spreiding te zien geven. De invloed hiervan verschilt per debiet- en per golfinstelling. Daarom wordt ook per geval beoordeeld of een te extreme waarde al dan niet in de berekening kan worden meegenomen.

3.3.2 Het meetprogramma.

De basisgrootheden uit paragraaf 3.3.1 zijn gemeten bij verschillende instellingen van het debiet en verschillende instellingen van de golfmachine. Op deze wijze is getracht de bodemwrijving te bepalen bij verschillende waarden van um/\bar{v} en ξ .

Hierbij is voortgeborduurd op de onderzoeksresultaten van Van Leyen en Van der Vlerk (zie hoofdstuk 1). Hun voornaamste konklusie was dat geen toename van de bodemwrijving kon worden gekonstateerd.

Dit kan drie dingen betekenen:

- 1- De theorie die zo'n toename voorspelt klopt niet.
Hier wordt voorlopig niet van uitgegaan, temeer daar andere experimenten (waaronder die van Bijker) reeds een toename hebben aangetoond.
- 2- De toename van de bodemwrijving is zo klein, dat deze bij de afmetingen van het model slechts een onmeetbare toename van het verhang tot gevolg heeft.
Deze reden is niet onwaarschijnlijk, omdat het gaat om verhangen in de orde van grootte van $7 \cdot 10^{-5}$, wat betekent dat bij een meetlengte van 12 m (= afstand raai C - raai F), waterstandsverschillen van $\pm 0,8$ mm gemeten moeten worden. Met de in 3.3.1 geschetste verstoringen levert dat de nodige problemen op.
- 3- Zoals in hoofdstuk 2.1 is uiteengezet worden er Kondities gesteld aan de langsstroming. Wanneer niet (voldoende) wordt voldaan aan deze Kondities, dan heeft dat tot gevolg dat de termen $\partial v/\partial t$, $v \cdot \partial v/\partial y$ en $u \cdot \partial v/\partial x$ in de bewegingsvergelijking niet gelijk aan nul verondersteld mogen worden. Vergelijking (3.3) is dan niet geldig. Aan de Konditie "stationaire stroming" wordt voldaan door een konstant instroom-debiet in te stellen.
Een uniforme stroming kan worden verkregen door het instroomdebiet zo gelijkmatig mogelijk over de breedte van het model te verdelen, er van uitgaande dat de bodem horizontaal en vlak is, en als zodanig geen verstoringen in de stroomverdeling tot gevolg heeft.
Het is niet onwaarschijnlijk dat de uniformiteit van de stroming bij Van Leyen en Van der Vlerk te wensen heeft overgelaten, temeer daar gekonstateerd is dat er meer water vlak langs het golfschot en over het talud stroomde dan op grond van uniformiteit mocht worden verwacht.

Van Leyen en Van der Vlerk hebben dus waarschijnlijk met een combinatie van 2- en 3- te maken gehad. Om die reden is er bij de huidige experimenten naar gestreefd:

- 1) De te verwachten toename van de bodemwrijving zo groot mogelijk te maken. Er is getracht dit te bereiken door te werken met zo groot mogelijke waarden van um/\bar{v} (immers, $f(\theta, \xi um/\bar{v})$ is dan het grootst). Dit houdt in dat de stroomsnelheid v , laag genomen moest worden (klein debiet). Dit had echter als konsekwentie dat de optredende verhangen dermate klein zouden worden, dat ze vrijwel niet meer te meten zouden zijn. Om die reden is tevens de

- bodemruwheid vergroot, middels het aanbrengen van een laagje grind ($5\text{mm} < d < 9\text{mm}$, $d_{90}=8\text{mm}$).
- 2) De uniformiteit van de stroming zo goed mogelijk in te stellen. Het verruwen van de bodem onder 1) bevordert al reeds de uniformiteit, doordat de weerstand hierdoor groter, en versneling-c.q. vertragingstermen relatief kleiner worden. De uniformiteit van de stroming is bovendien verbeterd door plaatselijk instroomweerstand weg te nemen, dan wel extra weerstand toe te voegen. Dit kon worden bewerkstelligd door het weghalen of toevoegen van elementen in de rijen met holle gaten-stenen. Hierbij is ernaar gestreefd de horizontale snelheidsverdeling reeds kort na de instroming (raai C en D), gelijkvormig te doen zijn aan de snelheidsverdeling aan het einde van het model (raai G en H, waarvan mocht worden verondersteld dat de uniforme stroming volledig tot ontwikkeling gekomen was). Daartoe zijn in beide raaien, om de 40 cm op ongeveer $2/3$ van de hoogte de stroomsnelheden gemeten.

De uitgevoerde experimenten vallen in twee series uiteen (ook in de tijd bezien), te weten een waarbij de metingen zijn uitgevoerd op de gladde betonbodem, en een waarbij de bodem is verruwd door middel van een laagje grind.

Er is begonnen met de metingen op de gladde beton bodem zodat, aansluitend op de metingen van Van Leyen en Van der Vlerk, de invloed van een zorgvuldiger ingestelde uniforme stroming kon worden nagegaan. Deze metingen zijn uitgevoerd bij een debietinstelling van ca. $1/2.Q_{\text{max}}$ (≈ 410 l/s, Van Leyen en Van der Vlerk voerden hun proeven uit bij $1/2.Q_{\text{max}}$, $3/4.Q_{\text{max}}$ en Q_{max}). Teneinde later steeds hetzelfde debiet te kunnen reproduceren is op de afsluiter een schaalverdeling aangebracht waarop redelijk nauwkeurig (naar later zal blijken niet nauwkeurig genoeg) het debiet kon worden ingesteld. De golfmachine is ingesteld op golven met perioden van 1 en 2 seconden. Voor beide perioden een lage- ($H \approx 4\text{cm}$) en een hoge golf ($H \approx 8\text{cm}$), zodat in totaal 5 situaties zijn doorgemeten (inklusief de situatie zonder golven; Voor een totaal overzicht van de uitgevoerde proeven zie tabel 3.1 aan het eind van dit hoofdstuk). Voor de hoge golf is de golfmachine zodanig ingesteld dat de golven net nog niet breken. De factor u_m/v is dan maximaal. De lage golf is steeds ongeveer de helft van de hoge gekozen.

De verhangen bij de vijf gemeten situaties zijn ieder 2 tot 3 keer gemeten en tot een gemiddelde waarde verwerkt.

De langsstroomsnelheden zijn gemeten in raai C, D, E, G, en H, in 12 punten per raai (om de 40cm) en 10 hoogten per punt. De orbitaal-snelheden zijn gemeten in raai C, D, E, F en G, in 7 punten per raai en zo dicht mogelijk bij de bodem (ca. 3cm).

Dit alles geldt voor snelheidsmetingen met de mikromolen. Een aantal van deze metingen zijn in kort tijdsbestek over gedaan met de O.L.D.S., teneinde na te gaan hoe u_m en v zich verhouden wanneer ze tegelijkertijd worden gemeten. Met de O.L.D.S. zijn de volgende instellingen gemeten:

$T=1\text{s}$ plus $H \approx 4\text{cm}$ en $H \approx 8\text{cm}$; $T=2\text{s}$ plus $H \approx 8\text{cm}$. In totaal dus 3 verschillende instellingen. Er is hierbij gemeten in raai D, E, F en G, in 3 tot 7 punten per raai en 7 hoogten per punt (zie tabel 3.1). Vervolgens is de bodem verruwd en zijn ook de meetputjes voor snelheidsmeting vlak boven de bodem aangebracht. Bij deze toestand van de bodem zijn in totaal 13 verschillende situaties doorgemeten,

verdeeld over 3 verschillende debiet-instellingen:

- 1- $Q=1/2.Q_{max} \approx 360$ l/s, respektievelijk zonder golven, T=1s plus $H \approx 6$ cm, T=1s plus $H \approx 10$ cm, T=2s plus $H \approx 5$ cm, T=2s plus $H \approx 11$ cm.
- 2- $Q=1/6.Q_{max} \approx 135$ l/s, respektievelijk zonder golven, T=1s plus $H \approx 5$ cm, T=1s plus $H \approx 8$ cm, T=2s plus $H \approx 5$ cm, T=2s plus $H \approx 8$ cm
- 3- $Q=1/8.Q_{max} \approx 95$ l/s, respektievelijk zonder golven, T=1s plus $H \approx 7$ cm, T=2s plus $H \approx 7$ cm

(zie ook tabel 3.1)

Bij de eerste twee debiet-instellingen is zowel met de M.M. als met de O.L.D.S. gemeten. De derde instelling (de kleinst) is op de allerlaatste dagen van het onderzoek nog aan het meetprogramma toegevoegd, omdat gebleken was dat de kleinste debiet-instellingen de beste resultaten te zien gaven. Dat bleek ook nu weer het geval te zijn, hoewel deze stroomsituatie door tijdgebrek niet zo grondig is doorgemeten als de andere twee. Er zijn alleen snelheden met de O.L.D.S. gemeten.

Omdat bij de eerste serie metingen gebleken was dat de verhangen een zekere spreiding vertoonden, zijn bij de tweede serie meer verhangmetingen verricht. Vooral ook vanwege het grote belang hiervan voor dit onderzoek.

De verhangen bij alleen stroming zijn 5 ($Q=95$ l/s) tot 10 ($Q=360$ l/s) keer gemeten, de verhangen bij stroming en golven 2 tot 5 keer. Het kleinste debiet is gebleken de uiterste instelling te zijn waarbij nog een verhang te meten was. Bij nog kleinere debieten verdween het verhang in de meeton nauwkeurigheid.

De langsstroomsnelheden gemeten met de M.M. zijn gemeten in raai D en F, in 6 punten per raai en 9 tot 10 hoogten per punt. De orbitaalsnelheden (u_m) met de M.M. zijn gemeten in raai D en E, alsmede een raai daar tussenin, en wel in 4 punten per raai en 1 tot 3 hoogten per punt, in hoogte variërend van 1,5 tot 4cm boven de bodem.

Hierna is gedurende een periode van 3 weken gemeten met de O.L.D.S. Allereerst zijn de instellingen $Q=135$ l/s, T=1s plus $H \approx 8$ cm en T=2s plus $H \approx 9$ cm nog eens dunnetjes overgedaan, teneinde weer te kunnen nagaan hoe u_m en v zich verhouden wanneer ze tegelijkertijd gemeten worden. Bovendien is toen besloten een nog kleinere debiet-instelling aan het meetprogramma toe te voegen ($Q=95$ l/s). Er is hierbij gemeten in raai D en F, in 6 punten per raai, 7 hoogten per punt, zowel de langsstroom- als de orbitaalsnelheden.

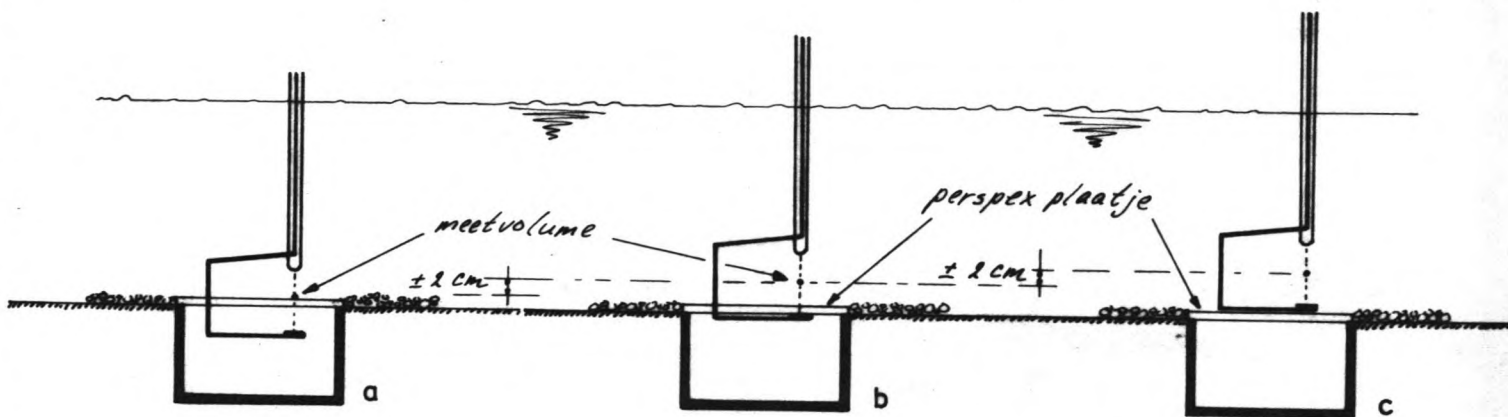
Vervolgens is begonnen met een geheel nieuw onderdeel van het onderzoek, namelijk het doormeten van verticale snelheidsprofielen, waarbij gebruik gemaakt is van de in de bodem aangebrachte meetputjes.

Tot dusver was het onderzoek er op gericht zoveel mogelijk punten in breedte richting door te meten, teneinde te kunnen middelen tot karakteristieke waarden voor \bar{v} en u_m . Bij het meten van de snelheidsprofielen ging het er juist om zoveel mogelijk punten in de vertikaal te meten. In de breedte zijn door tijdgebrek steeds slechts twee punten ($x=3$ en $x=5$) op deze wijze geprofileerd, zodat middeling tot karakteristieke waarden voor \bar{v} en u_m slechts met de nodige voorzichtigheid kan geschieden.

De stapgrootte waarmee in de vertikaal gemeten is, varieerde van 1mm aan de bodem tot 2 cm aan het oppervlak. Voor het meten van snelheden aan de bodem is de fotocel op de in paragraaf 3.3.1 beschreven wijze

in het meetputje geplaatst waarna met het perspex plaatje het putje weer is afgedekt. Het meetvolume is vervolgens tot op het perspex oppervlak gebracht. Hiervanaf zijn stapsgewijs de verticale snelheidsprofielen in kaart gebracht (zie afb. 3.12a).

Op een zeker ogenblik echter, raakte de fotocel de onderzijde van het perspex plaatje (zie afb. 3.12b). Dit plaatje moest nu verwijderd, de O.L.D.S. omhooggedraaid en het plaatje weer terug op het meetputje gelegd worden. De metingen konden nu worden voortgezet met de fotocel boven het perspex plaatje. Vanwege de afmetingen van plaatje plus fotocel, is zo echter een "gat" van 2cm in de metingen ontstaan (afb. 3.12c).



afb. 3.12 : O.L.D.S. metingen nabij de bodem

Op deze wijze zijn stromingsprofielen gemaakt bij de volgende instellingen:

- 1) $Q=360$ l/s, $T=1s$ en $H\approx 6cm$
- 2) $Q=360$ l/s, $T=2s$ en $H\approx 11cm$
- 3) $Q=135$ l/s, $T=1s$ en $H\approx 8cm$
- 4) $Q=95$ l/s, $T=2s$ en $H\approx 7cm$

Bij de bovenstaande 4 instellingen zijn snelheidsprofielen gemeten bij alleen stroming, stroming plus golven en alleen golven. Zoals gezegd is hierbij gemeten in 2 punten per raai (raai F), en wel op 13 tot 16 hoogten in de vertikaal.

Tabel 3.1 geeft een totaal-overzicht van alle verrichte metingen. Alle proeven worden hierin aangeduid met een nummer, dat ook in het vervolg van dit rapport zal worden gehanteerd.

Deze proefnummering bestaat uit een getal van drie cijfers: abc, waarin:

- a = debietaanduiding: 1 : ± 410 l/s, gladde beton bodem
2 : ± 360 l/s, ruwe grind bodem
3 : ± 135 l/s, ruwe grind bodem
4 : ± 95 l/s, ruwe grind bodem
- b = golfveld aanduiding: 0 : geen golfveld
1 : $T=1s$, H "klein"
2 : $T=1s$, H "groot"
3 : $T=1,8s$ of $2s$, H "klein"
4 : $T=1,8s$ of $2s$, H "groot"

proef abc	bo- dem	Q (l/s)	T (s)	H (m)	i n	MM OLDS	V				U			
							raai	pnt. P raai	afst. (m)	h pht	raai	pnt. P raai	afst. (m)	h pht
101	gladde beton bodem	410	-	-	-	MM	C, D, E G, H	12	0,40	10	-	-	-	-
110		-	1	0,046	-	MM	-	-	-	-	C, D, E G, H	7	0,40	1
111		410	1	0,046	2	OLDS	D, F	5	0,60	7	D, F	5	0,40	7
120		-	1	0,073	-	MM	-	-	-	-	C, D, E F, G	7	0,40	1
121		410	1	0,073	3	OLDS	D, F	7,6	0,60	7	D, F	7,6	0,60	7
130		-	1,8	0,045	-	MM	-	-	-	-	C, D, E F, G	7	0,40	1
131		410	1,8	0,045	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
140		-	1,8	0,077	-	MM	-	-	-	-	C, D, E F, G	7	0,40	1
141		410	1,8	0,077	2	OLDS	E, G	3	0,60	13	E, G	3	0,60	13
201 (p)		met grind verruwde bodem	360	-	-	10	MM OLDS	D, F F	6 2	1,00 2,00	10 16	-	-	-
210 (p)	-		1	0,056	-	MM OLDS	-	-	-	-	D, D/E E F	4 1	0,60	1 15
211 (p)	360		1	0,056	3	OLDS	F	2	2,00	15	F	2	2,00	15
220	-		1	0,100	-	MM	-	-	-	-	D, D/E E	4	0,60	1
221	360		1	0,100	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
230	-		2	0,049	-	MM	-	-	-	-	D, D/E E	4	1,38	1
231	360		2	0,049	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
240 (p)	-		2	0,106	-	MM OLDS	-	-	-	-	D, D/E F	4 1	1,38	1 18
241 (p)	360		2	0,106	3	OLDS	F	1	-	14	F	1	-	14
301 (p)	135		-	-	7	MM OLDS	D, F F(p)	6 2	1,00 2,00	9 13	-	-	-	-
310	-		1	0,049	-	MM	-	-	-	-	D, E	4	0,55	3
311	135		1	0,049	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
320 (p)	-		1	0,080	-	MM OLDS	-	-	-	-	D, E F	4 1	0,55	3 16
321 (p)	135		1	0,080	5	OLDS	D, F F(p)	6 2	0,80 2,00	7 13	D, F F(p)	6 2	0,80 2,00	7 13
330	-		2	0,045	-	MM	-	-	-	-	D, E	4	1,19	3
331	135		2	0,045	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
340	-		2	0,081	1	MM	-	-	-	-	D, E	4	1,19	3
341	135		2	0,091	5	OLDS	D, F	6	0,80	7	D, F	6	0,80	7
401 (p)	95		-	-	5	OLDS	D, F	2	2,00	15	-	-	-	-
-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
421	95	1	0,066	2	OLDS	D, F	6	0,80	7	D, F	6	0,80	7	
440 (p)	-	2	0,068	-	OLDS	-	-	-	-	F	1	-	15	
441 (p)	95	2	0,068	5	OLDS	D, F F(p)	6 2	0,80 2,00	7 15	D, F F(p)	6 2	0,80 2,00	7 15	

tabel 3.1: overzicht metingen

c = aanduiding met of zonder stroming: 0 = zonder
1 = met

De nauwkeurige profiel-metingen met de O.L.D.S. worden in de tabel
aangegeven met de toevoeging (p).

4: PRESENTATIE MEETRESULTATEN

4.1 METINGEN OP GLADDE BODEM

4.1.1 Instelmelingen

Zoals in paragraaf 3.3.2 is beschreven worden Kondities gesteld aan de stroming in het model. Een van deze Kondities is dat de stroming uniform moet zijn. De proevenserie op de gladde beton bodem wordt dan ook begonnen met het zo goed mogelijk instellen van een uniforme stroming. Dit gebeurt door het instroom-debiet zo goed mogelijk over de breedte van het model te verdelen, middels het toevoegen dan wel wegnemen van instroomweerstand. Daartoe wordt op 2/3 van de waterdiepte (waar de stroomsnelheid ongeveer gelijk is aan de gemiddelde stroomsnelheid) over de gehele stroomvoerende breedte (om de 40cm) de snelheid gemeten. De stroomverdeling aan het begin van het model wordt nu vergeleken met die aan het eind, waar de uniformiteit wordt verondersteld zich volledig te hebben ingesteld. Afbeelding 4.1 toont op deze wijze verkregen stromingsprofielen voor raai A, C en H, gemeten bij maximaal debiet (± 800 l/s). Duidelijk is te zien, dat de stroming in raai H beter over de breedte is verdeeld dan in raai C en zeker beter dan in raai A. Raai A ligt blijkbaar te dicht bij de instroming om daar al een uniform stromingsbeeld te mogen verwachten. Voor de instelmelingen is raai A dan ook verder buiten beschouwing gelaten, en is alleen gemeten in raai C en raai H. Voor de eigenlijke instelmelingen is de stroming teruggebracht tot het debiet waarbij ook de verdere experimenten zullen worden uitgevoerd ($Q = \pm 1/2 \cdot Q_{max}$).

Afb. 4.2a en 4.2b tonen de gemeten stromingsprofielen in raai C en raai H. Hierin is te zien dat in raai C te veel water over het talud en langs het golfschot stroomt, terwijl het vlakke gedeelte, tussen $x=4$ en $x=8$ een kleinere stroming te zien geeft. In cijfers uitgedrukt, tussen $x=0,8$ en $x=9,2$:

raai C: $\bar{v}=0,211$ m/s , $\sigma/\bar{v}=9,6$ %

raai H: $\bar{v}=0,230$ m/s , $\sigma/\bar{v}=3,1$ %

Er is getracht dit te verbeteren door tussen $x=0$ en $x=2$ alsmede tussen $x=8$ en $x=12$ extra instroomweerstand aan te brengen. Het uiteindelijke resultaat (na enkele pogingen) is te zien in afb. 4.2c.

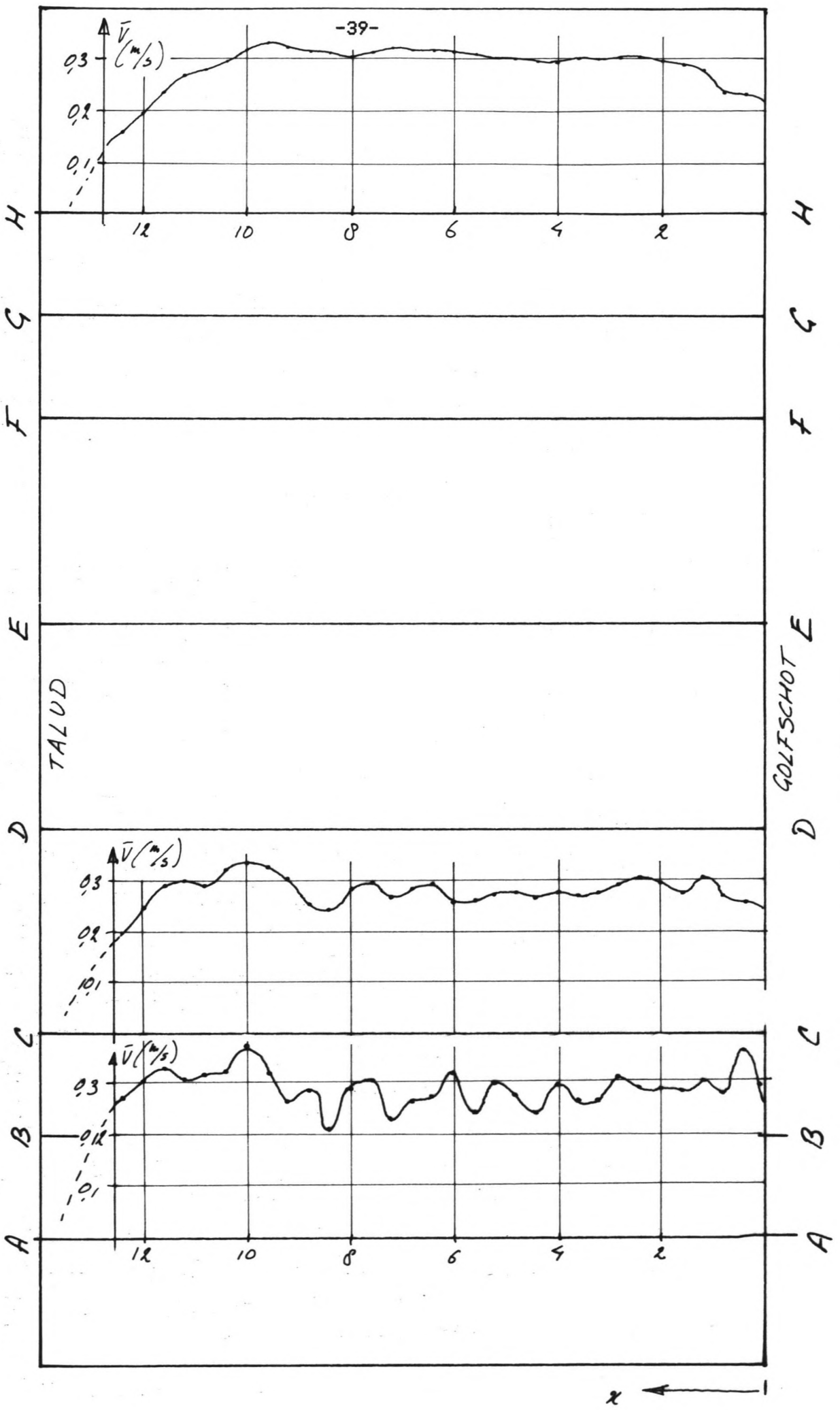
Raai C-verbeterd: $\bar{v}=0,216$ m/s , $\sigma/\bar{v}=5,1$ %

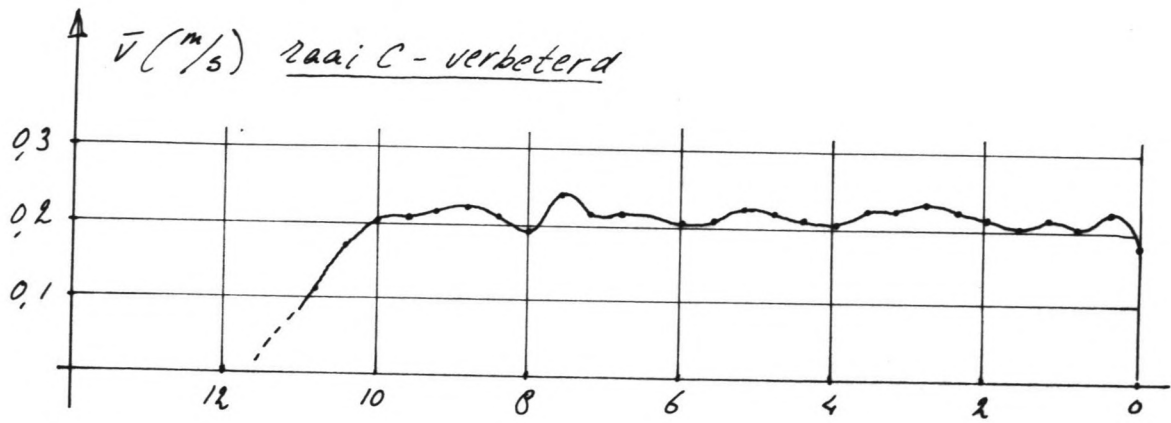
Hierna is niet meer getracht deze instroming nog te verbeteren, omdat het iteratieve proces van meten-veranderen-meten etc., zeer tijdrovend is en de nu bereikte variatie van 5,1% in raai C nauwelijks nog lijkt te verbeteren.

Merk overigens op dat v in stromingsrichting niet konstant is, maar blijkt toe te nemen van C naar H. De hier gevonden toename van 6,5% is mede toe te schrijven aan het feit dat is gemeten op een vrij grof ingestelde hoogte van 2/3.h. Een geringere toename van de snelheid zullen we echter nog vaker bij deze experimenten tegenkomen, en kan overigens ook verklaard worden. Zoals uit afb. 4.3 blijkt, is het bij een bodem die geheel waterpas ligt, in principe niet mogelijk dat er een uniforme stroming is. Immers, bij aanwezigheid van een kracht $F_w (=l \cdot \tau_b)$ moet F_1 groter zijn dan F_2 , wil het water stromen. Dit impliceert dat $h_2 < h_1$ en dus $\bar{v}_2 > \bar{v}_1$ moet zijn.

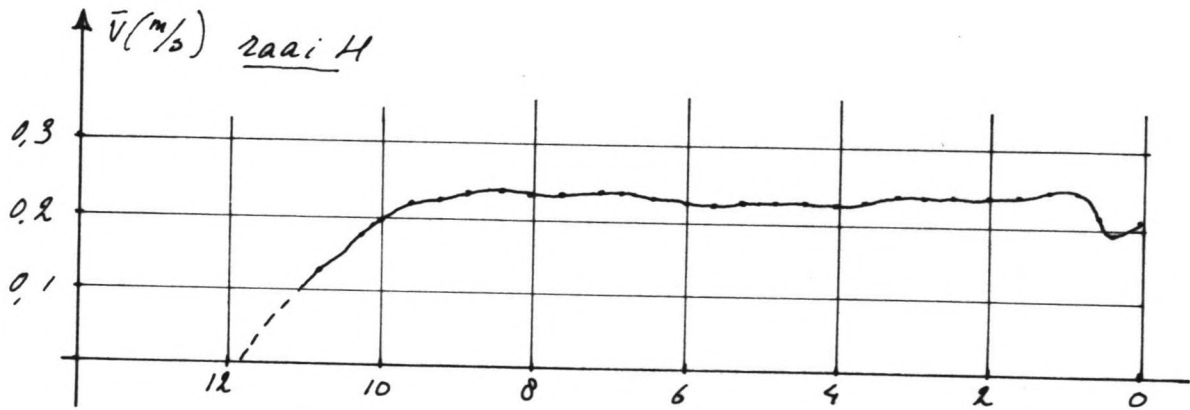
Dit heeft ook gevolgen voor de bodemwrijving. Wanneer de impulsverge-

afb. 4.1: snelheidsmetingen op 2/3-hoogte bij max. debiet

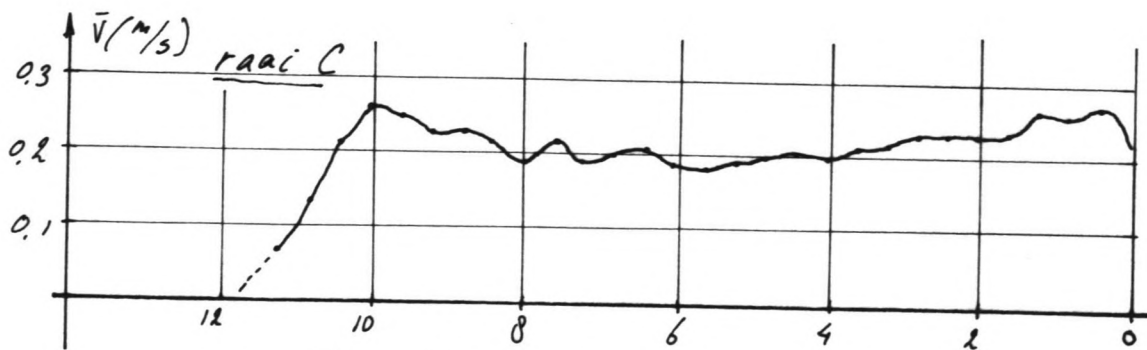




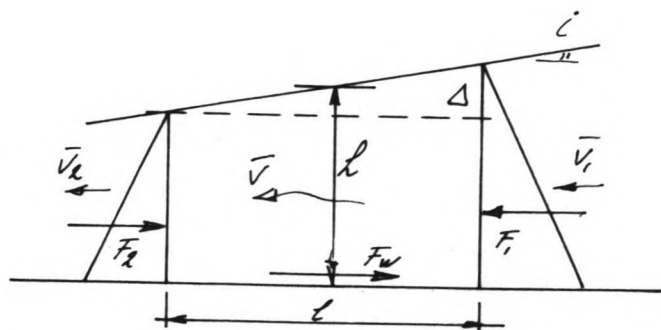
afb. 4.2 c



afb. 4.2 b



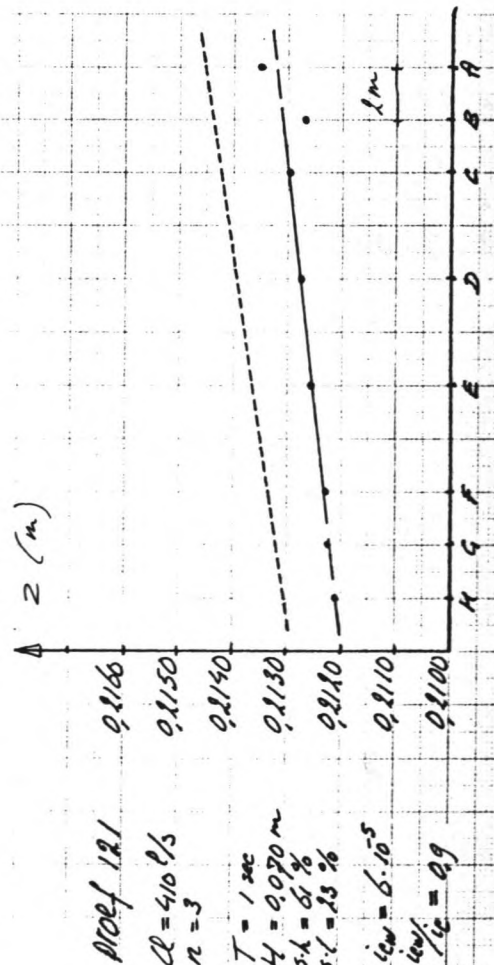
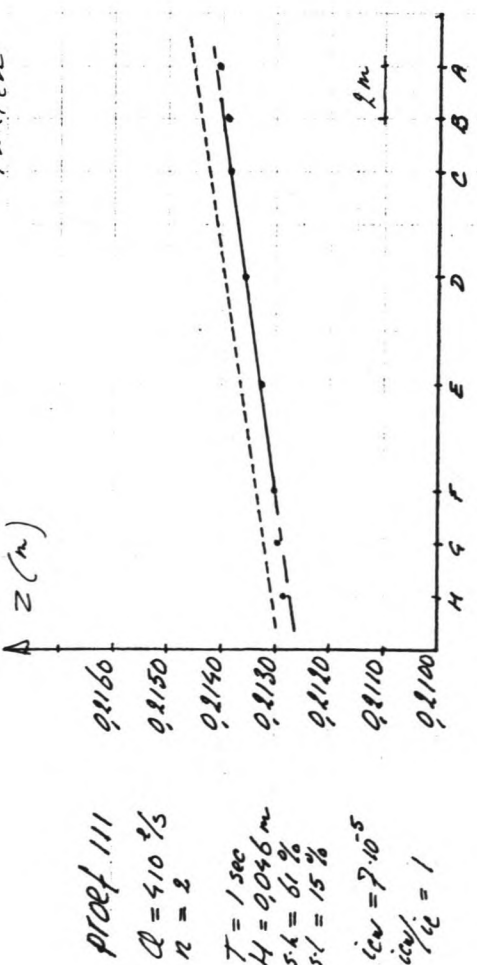
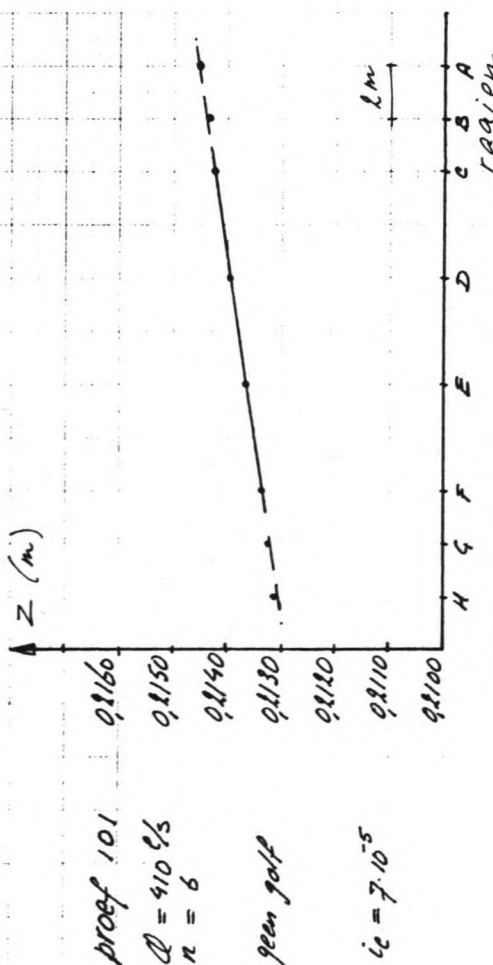
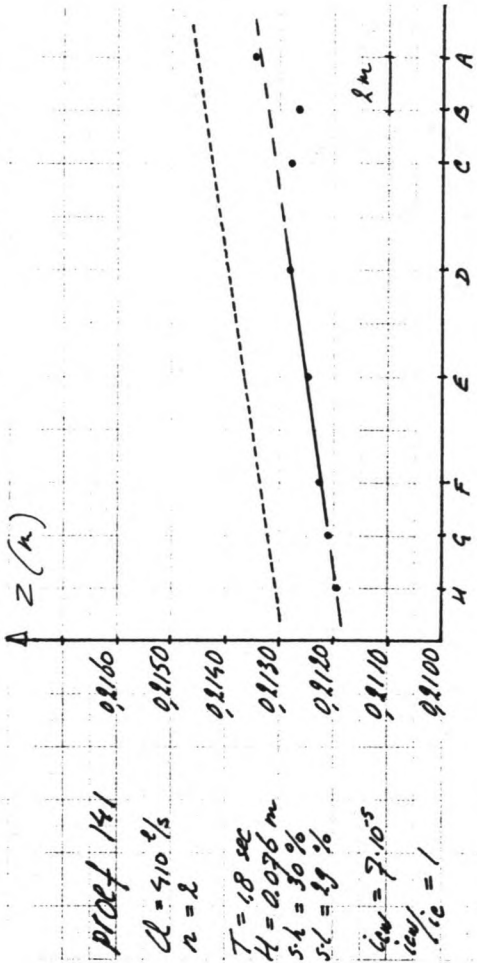
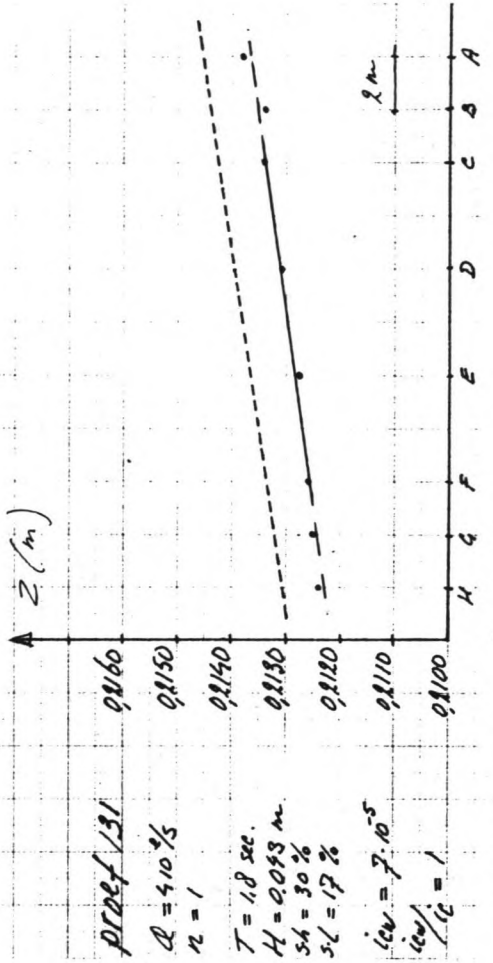
afb. 4.2 a : snelheids metingen op 2/3-hoogte bij halfmax. debiet



afb. 4.3 : impuls-balans

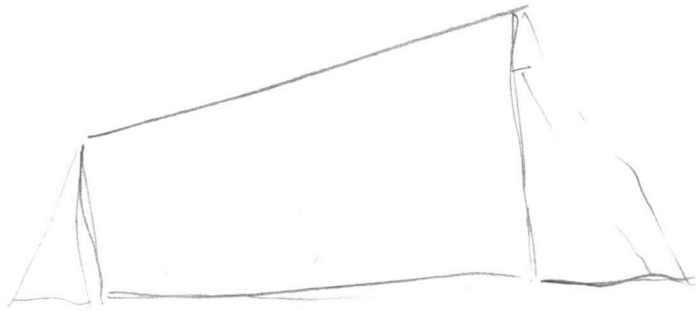
proef.	101	111	121	131	141
Q (l/s)	410	410	410	410	410
T (s)	-	1	1	1,8	1,8
H (m)	-	0,046	0,070	0,043	0,076
hA (m)	0,2145	0,2141	0,2135	0,2138	0,2135
hB (m)	0,2143	0,2139	0,2127	0,2134	0,2127
hC (m)	0,2142	0,2386	0,2130	0,2134	0,2128
hD (m)	0,2140	0,2136	0,2127	0,2131	0,2128
hE (m)	0,2136	0,2133	0,2126	0,2128	0,2125
hF (m)	0,2134	0,2130	0,2123	0,2126	0,2123
hG (m)	0,2133	0,2130	0,2122	0,2125	0,2121
hH (m)	0,2131	0,2129	0,2121	0,2124	0,2120
hDE (m)	0,2138	0,2134	0,2127	0,2129	0,2126
n (-)	6	2	3	1	2
i (10 ⁻⁵)	7,2	6,7	6,0	6,8	7,1
σ _i /i (%)	5,6	6,0	14,5	-	5,6
icw/ic	-	0,93	0,83	0,94	0,99

tabel 4.1



afb. 4.4 : verhangen

$$\frac{1}{2} m v^2$$



→ T₆

lijking wordt toegepast op afb. 4.3, dan vinden we, na enig rekenwerk:

$$\tau_b = \rho \cdot g \cdot h \cdot i - \rho \cdot h \cdot v \cdot (\sqrt{2} - \sqrt{1}) / 1 \quad 4.1$$

Later zullen we echter zien dat $\sqrt{2}/\sqrt{1}$ dermate klein is (orde van grootte ca. 3%), dat de gemiddelde snelheid voor het hele model rustig konstant mag worden verondersteld. Vergelijking (4.1) reduceert dan tot de bekende vergelijking (2.3).

4.1.2 Verhangmetingen

Ter Bepaling van de verhangen zijn waterstanden gemeten in 30 punten in het model, gebruik makend van de meetpotten aan de rand van het golfbassin. Voordat dit kon gebeuren zijn eerst de individuele nulstanden van de meetpotten bepaald (zie paragraaf 3.3.1).

Omdat de te meten waterstandsverschillen zeer gering waren, zijn per proefnummer meerdere verhangmetingen verricht. Vervolgens is hieruit een gemiddeld verhang bepaald. Een middelingsprocedure was eens te meer nodig, omdat de verhangen van dag tot dag een zekere spreiding bleken te vertonen.

De verhangen zijn steeds met behulp van lineaire regressie berekend uit de waterdiepten in raai C, D, E en F (meetlengte 12m). Tabel 4.1 geeft een overzicht van de gemiddelde waterstanden en de daaruit berekende verhangen. In afb. 4.4 wordt een en ander grafisch weergegeven.

Uit de tabel blijkt dat op grond van deze meetresultaten vooralsnog geen toename van de bodemwrijving kan worden gekonstateerd. De gemiddelde spreiding in de meetresultaten bedraagt ca. 6%, voor proef 121 zelfs 14,5%. Dit betekent dat een eventuele toe- of afname van het verhang zo klein is dat hij verdwijnt in de meeton nauwkeurigheid.

4.1.3 Snelheidsmetingen met de mikromolen

4.1.3.1 Langsstromsnelheden

Bij de instelmelingen zijn snelheden gemeten op 2/3 hoogte. Voor het berekenen van een gemiddelde snelheid zijn deze metingen echter niet nauwkeurig genoeg, en bovendien verschaffen ze geen informatie over de snelheidsverdeling in de vertikaal. Daarom handelt deze paragraaf over metingen van verticale profielen van met name langsstromsnelheden.

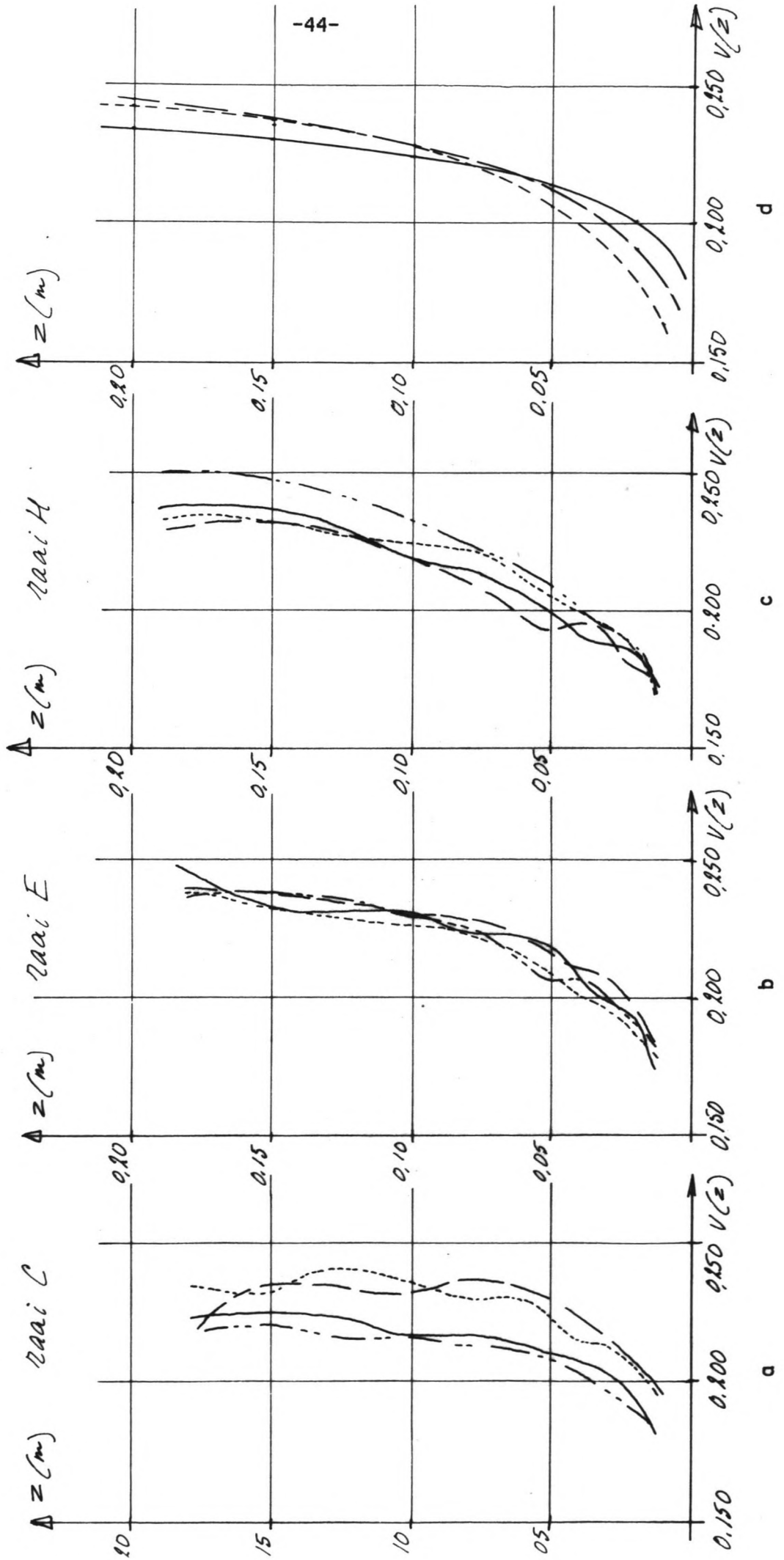
Er zijn snelheidsprofielen gemeten in twee series. De eerste serie betrof metingen in raai C, E en H, in de punten $x=2,0$, $x=2,8$, $x=5,6$ en $x=6,4$. Het doel van deze serie was een indruk te krijgen van de mate waarin de profielen zouden variëren in x-richting (per raai), en in y-richting (stromingsrichting).

De bedoelde eerste serie metingen is op een dag en dus bij dezelfde instelling van het debiet verricht. Hierna was het de bedoeling de 4 meetpunten uit te breiden tot 12 punten per raai en bovendien ook te gaan meten in raai D en raai G. Toen hiermee echter de volgende dag werd begonnen bleek al snel dat de snelheden integraal lager waren. Hoewel op het oog de afsluiters waarmee het debiet werd geregeld in dezelfde stand stonden, bleek nu toch dat de stroming niet gelijk

— $\alpha = 2,0$
 - - $\alpha = 1,8$
 - · - $\alpha = 1,6$
 - - - $\alpha = 1,4$

afb. 4.5 : snelheidsprofielen

— 2aai C
 - - 2aai E
 - - - 2aai H



was. Er is daarom besloten een tweede serie metingen te verrichten, los van de eerste serie. Deze tweede serie betreft metingen in raai C, D, G en H, en wel in 12 punten per raai ($x=0,8$ t/m $x=6,4$ om de $0,4m$).

In afb. 4.5a t/m 4.5c worden de resultaten getoond van de eerste serie profielmetingen. Per raai kunnen de snelheden op gelijke hoogte nu worden gemiddeld tot een representatief snelheidsprofiel voor de betreffende raai. Uit deze middeling blijkt dat de snelheidsprofielen en raai C, E, en H een gemiddelde spreiding vertonen van respectievelijk 3,7%, 1,6% en 2,1%. Gemiddeld dus ca. 2,5%.

Met behulp van lineaire regressie kan nu uit de meetresultaten een gemiddeld logaritmisch snelheidsprofiel worden afgeleid. De snelheidsverdeling in de vertikaal wordt daartoe uitgedrukt als:

9
v(z) = A.ln(z)+B, met A = v*/k en B = A-ln(1/z0) 4.2

Het resultaat hiervan is te zien in afb. 4.5d. Hieruit blijkt dat het gemiddelde snelheidsprofiel van C naar H "kantelt". De stroming nabij de bodem wordt als het ware afgeremd; dv/dz nabij de bodem neemt dus af in stromingsrichting. Dit betekent dat de bodemwrijving in het model niet konstant is, maar met dv/dz afneemt in stromingsrichting. De gemiddelde snelheid kan uit (4.2) bepaald worden volgens:

v̄ = A.ln(h)+(B-A) 4.3

waarin: h=waterdiepte;
en A en B m.b.v. lineaire regressie bepaalde konstanten.

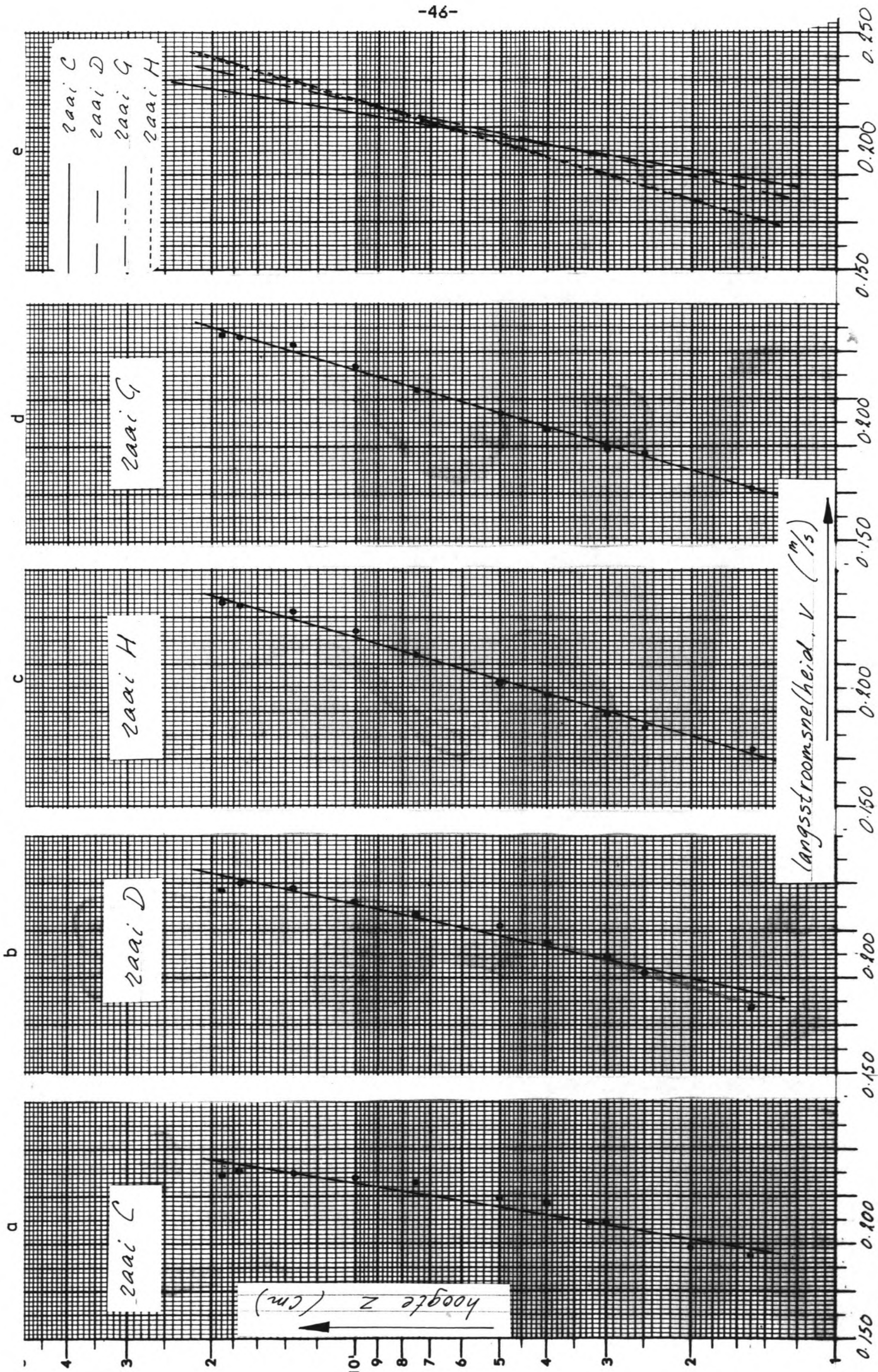
In tabel 4.2 zijn de karakteristieke waarden A, B, h en v̄ voor de drie gemeten raaien in de eerste serie metingen te zien. Het blijkt nu dat een toename van de snelheid in stromingsrichting inderdaad te verwaarlozen is, zoals in paragraaf 4.1.1 reeds werd verondersteld.

serie 1	raai C	raai E	raai H
A	0,01438	0,02322	0,02602
B	0,2572	0,2815	0,2839
h(m)	0,2142	0,2136	0,2131
v̄(m/s)	0,221	0,223	0,218

tabel 4.2

serie 2	raai C	raai D	raai G	raai H
A	0,01428	0,01947	0,02639	0,02613
B	0,2484	0,2654	0,2829	0,2815
h (m)	0,2142	0,2140	0,2132	0,2131
v̄ (m/s)	0,212	0,216	0,216	0,215

tabel 4.3



afb. 4.6 : snelheidsprofielen

Afb. 4.6a t/m 4.6d tonen de gemiddelde snelheidsprofielen in de raaien C, D, G en H uit de tweede serie metingen, deze keer op logaritmische schaal. De tweede serie metingen onderscheidt zich van de eerste, doordat zoals gezegd het debiet iets kleiner was, en bovendien doordat in 12 punten per raai gemeten is, tegen slechts 4 punten bij de eerste. Tabel 4.3 toont de karakteristieke waarden voor de tweede serie metingen.

Uit afb. 4.6e, waarin de gemiddelde snelheidsprofielen over elkaar zijn afgebeeld en uit de tabel (de waarden voor A), blijkt weer dat het snelheidsprofiel kantelt van C naar H. Wat echter opvalt is dat deze kanteling het sterkst is aan het begin van het model (met name raai c en D), en dat het profiel vrijwel konstant is aan de uistroomzijde van het model. Dit leidt tot de konklusie dat het hier gaat om een instelverschijnsel; de stroming heeft een zeker traject nodig om zich uniform in te stellen. Dit rechtvaardigt de veronderstelling dat de bodemwrijving over het gehele model konstant is. Voor de karakterisering van die bodemwrijving zal echter gebruik worden gemaakt van de snelheidsmetingen over het traject raai D-raai G. De gemiddelde snelheid over het hele model blijkt ook nu weer nagenoeg konstant te zijn.

Hoe groot was nu het verschil in debiet tussen serie 1 en serie 2?

Het debiet kan worden berekend uit de gemeten gemiddelde snelheden. Daartoe moet echter een veronderstelling worden gedaan ten aanzien van de debietverdeling over het talud. Wanneer we kijken naar de snelheidsverdeling in x-richting in raai H bij de instelmetingen (afb. 4.3a), dan blijkt dat de gemiddelde snelheid vrijwel konstant is van $x=0$ tot ca. $x=8,5$. Daarna gaat de gemiddelde snelheid ongeveer parabolisch naar nul. In afb. 4.7 is dit geschematiseerd weergegeven voor \bar{v} en h. Voor het debiet Q kan dan worden afgeleid:

$$Q = (6,5 \cdot h \cdot \bar{v}) + 2 \cdot (h - 1/2 \cdot 2/25) \cdot \bar{v} + 1/2 \cdot (h - 2/25)^2 \cdot 25 \cdot 2/3 \cdot \bar{v} \quad 4.4$$

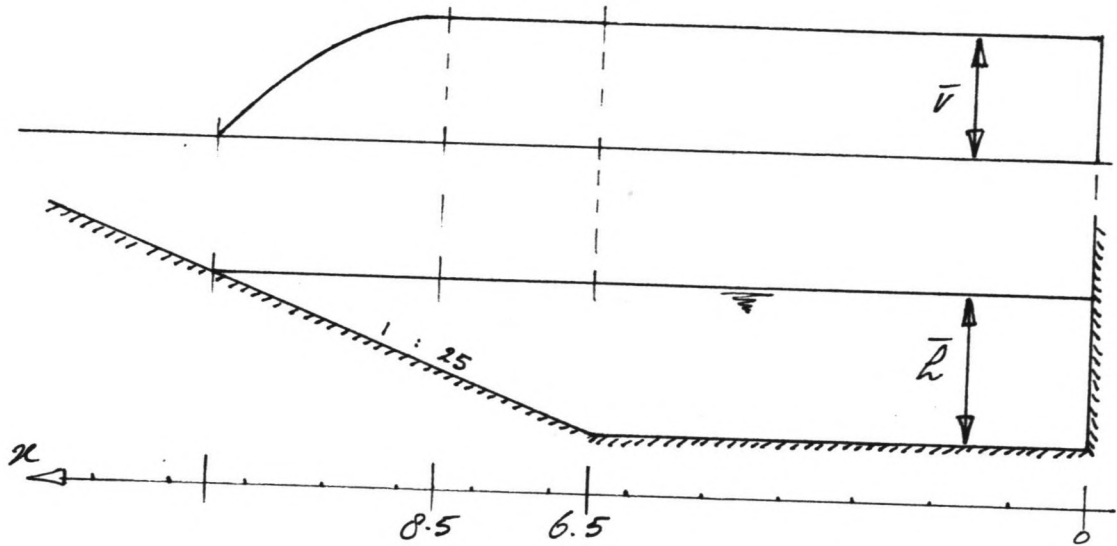
Bij de eerste serie was $\bar{v} = \bar{v}(E) = 0,223$ m/s en $h = 0,214$ m. Dat levert een debiet op van 421 l/s. Bij de tweede serie was $\bar{v} = 0,216$ m/s en $h = 0,214$ m. Het debiet was nu 408 l/s, een verschil derhalve van ongeveer 3%. Achteraf blijkt dit dus nogal mee te vallen, de spreiding van de stroomsnelheden in een raai bedroeg immers ook al ca. 2,5%. Vergeleken met de spreiding van de gemiddelde snelheden per raai echter (ca. 1%) is de 3% variatie in het debiet hinderlijk te noemen. Van grote invloed op de berekeningen waar het in dit rapport uiteindelijk om gaat, n.l. die van de bodemwrijving, is de variatie in de debietinstelling echter zeer waarschijnlijk niet. In het vervolg van dit hoofdstuk zullen de meetresultaten uit de tweede serie worden aangehouden.

Met behulp van de gemeten verhangen uit paragraaf 4.1.2 kan nu een gemiddelde bodemweerstandskoefficient worden berekend. Achtereenvolgens zullen worden bepaald de Chezy-Koefficient (Cch), de dimensieloze Koefficient (C) en de equivalente laminaire grenslaag bij hydraulisch gladde bodem (δ). Hierbij wordt gebruik gemaakt van de volgende relaties:

$$C_{ch} = \bar{v} / \sqrt{gh_i} \quad 4.5$$

$$C = g / C_{ch}^2 \quad 4.6$$

$$\delta = 11,6 \cdot \nu / \sqrt{gh_i}, \text{ met } \nu = 10^{-6} \quad 4.7$$



afb. 4.7 : snelheidsverdeling over de breedte

	gem. D-G	raai D	raai G
$i (10^{-5})$	7,2	7,2	7,2
$h (m)$	0,2138	0,2140	0,2132
$\bar{v} (m/s)$	0,216	0,216	0,216
A	-	0,01947	0,02639
B	-	0,2654	0,2829
Cch ($m^{0.5}/s$)	55	70	62
C (10^{-3})	3,2	2,0	2,6
$\xi (10^{-3}m)$	0,9	0,9	0,9
$r (10^{-3}m)$	2,0	0,04	0,7
ruw/glad	hydr. ruw	hydr. glad	hydr. glad

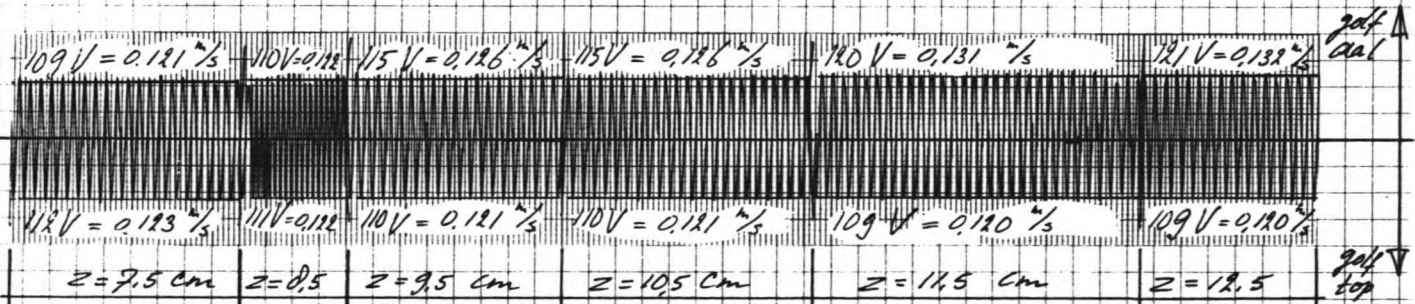
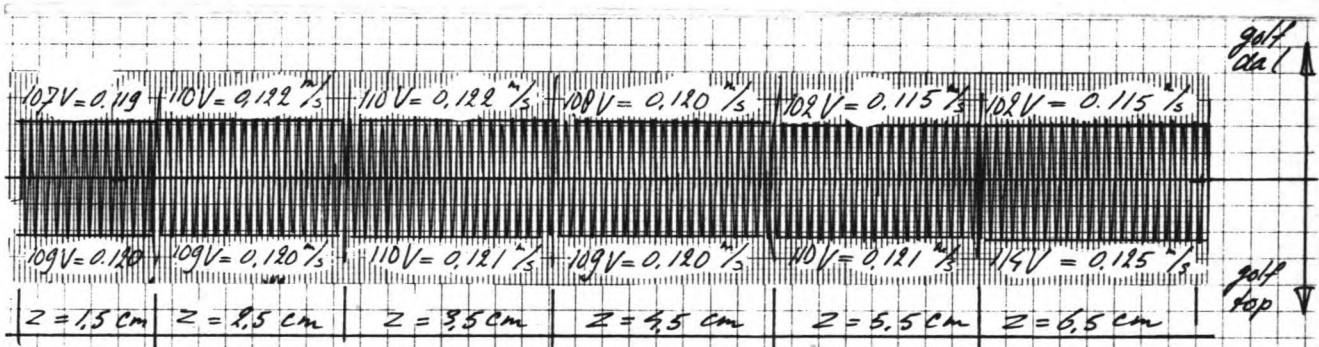
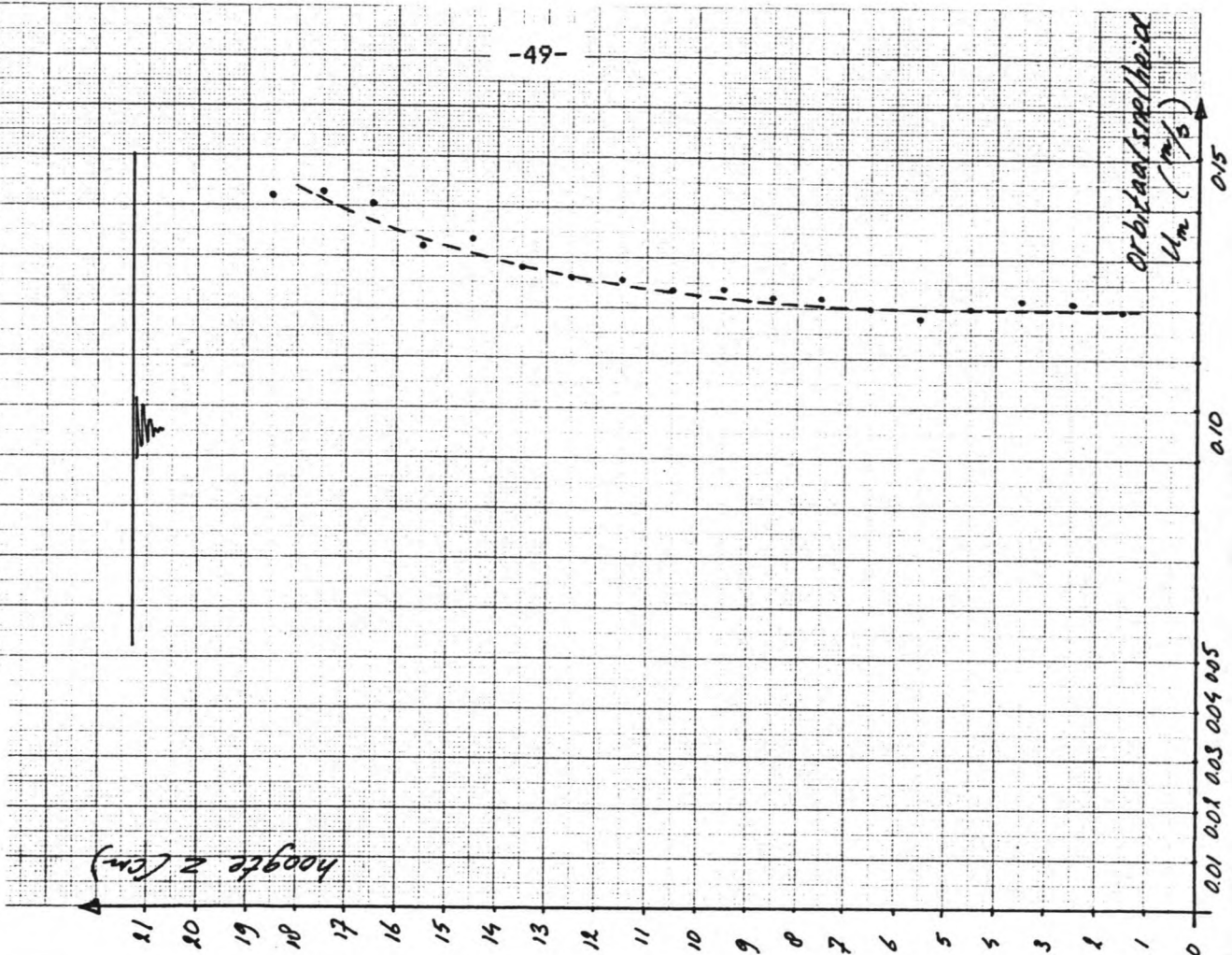
tabel 4.4

$$V = C \sqrt{h i}$$

$$C = \frac{V}{\sqrt{h i}}$$

$$\frac{V_*}{0.4}$$

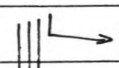
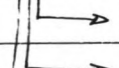

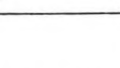
afb. 4.8 - a : orbitaalsnelheids-signaal
 b : orbitaalsnelheids-profiel



golftop: $v(\frac{1}{s}) = 0.0009047 \cdot S(V) + 0.0217$; golfdal: $v(\frac{1}{s}) = 0.0008718 \cdot S(V) + 0.0262$

proef nr.	110		120		130		140	
periode T	1 sec.		1 sec.		1,8 sec.		1,8 sec.	
slaghoek	61 %		61 %		30 %		30 %	
slaglengte	15 %		23 %		17 %		29 %	
gem.diepte	0,213 m		0,210 m		0,214 m		0,212 m	
golflengte	1,25 m		1,25 m		2,50 m		2,50 m	
	H (m)	Um (m/s)	H (m)	Um (m/s)	H (m)	Um (m/s)	H (m)	Um (m/s)
raai C	0,046	0,115	0,070	0,183	0,046	0,129	0,081	0,197
raai D	0,047	0,122	0,075	0,187	0,045	0,130	0,076	0,177
raai E	0,047	0,121	0,069	0,176	0,042	0,126	0,076	0,195
raai F	-	-	0,069	0,176	0,040	0,120	0,075	0,185
raai G	0,047	0,121	0,069	0,171	0,040	0,121	0,074	0,183
raai H	0,045	0,116	-	-	-	-	-	-
	H (m)	Um (m/s)	H (m)	Um (m/s)	H (m)	Um (m/s)	H (m)	Um (m/s)
	0,046	0,119	0,070	0,179	0,043	0,125	0,076	0,188

tabel 4.5

proef nr.	\bar{U}	Um	Um/ \bar{U}
101	0,216	-	-
110		0,119	0,55
120		0,179	0,83
130		0,125	0,58
140		0,188	0,87

tabel 4.6

$$r = 12.h/\exp(k/\sqrt{C}) - \xi/3,2 \quad 4.8$$

r en C kunnen ook worden afgeleid uit de factoren A en B in vergelijking (4.2), daar deze gerelateerd zijn aan zo volgens:

$$z_0 = r/33 = 1/\exp(B/A) \quad 4.9$$

Een en ander is uitgewerkt in tabel 4.4.

De waarden voor r en C bepaald uit A en B blijken niet erg overeen te komen met de waarden bepaald met Chezy. Sterker nog, de bodem blijkt plotseling hydraulisch glad geworden te zijn.

Dit verschijnsel zal het gevolg zijn van een te grove berekeningswijze. Immers, de factoren A en B behoren bij een logaritmische benadering van het snelheidsprofiel. Het werkelijke profiel zal vooral aan de bovenzijde toch wellicht iets hiervan afwijken. Het gevonden verschil in ruwheid geeft echter aan dat de bodemruwheid moeilijk in een getal is uit te drukken; het theoretische model is blijkbaar moeilijk te meten.

Voor de verdere berekeningen zal worden uitgegaan van de ruwheidswaarden berekend uit de Chezy-faktor en dus van een hydraulisch ruwe bodem.

4.1.3.2 Orbitaalsnelheden

Voor het meten van de orbitaalsnelheden zijn de beide afsluiters geheel dicht gedraaid en zijn de deksels op de afvoerputten aangebracht (zie afb. 3.1). Vervolgens is een konstant waternivo ingesteld, overeenkomend met het gemiddelde waternivo onder golven plus stroming. In deze toestand zijn bij verschillende instellingen van de golfmachine golfhogten en orbitaalsnelheden gemeten.

Hoewel we feitelijk geïnteresseerd zijn in orbitaalsnelheden bij een combinatie van langsstroming en golven, worden de orbitaalsnelheden dus gemeten bij stilstaand (niet stromend) water. Dit vanwege het feit dat met mikromolens slechts snelheidskomponenten in een richting tegelijkertijd gemeten kunnen worden. Hierbij wordt er dan wel van uitgegaan dat de orbitaalsnelheden niet zullen veranderen wanneer de langsstroming er bij komt.

Bij de onderhavige proevenserie gaat het er om de maximale orbitaalsnelheid nabij de bodem (u_m) te bepalen. In hoofdstuk 2.2 hebben we echter gezien dat ten gevolge van grenslaag effecten de orbitaalsnelheid vlak boven de bodem groter is dan volgens de lineaire kortegolf-theorie mocht worden verwacht. De vraag is nu dus op welke hoogte we met de mikromolen moeten gaan zitten om u_m te kunnen meten.

Daartoe worden eerst in een aantal punten de orbitaalsnelheden in de vertikaal gemeten. In afb. 4.8a en 4.8b is de uitkomst te zien van een vertikaal snelheidsprofiel-meting (voor $t=1s$, $H \approx 5cm$). Het blijkt nu dat de maximale orbitaalsnelheid vrij konstant is over het traject $z=1,5$ (de laagst mogelijke MM-instelling) tot ca. $z=8cm$. u_m is daarom steeds gemeten op hoogte $z=3cm$ boven de bodem, en wel in 7 punten per raai, om de 40 cm. In tabel 4.5 worden de meetresultaten gepresenteerd.

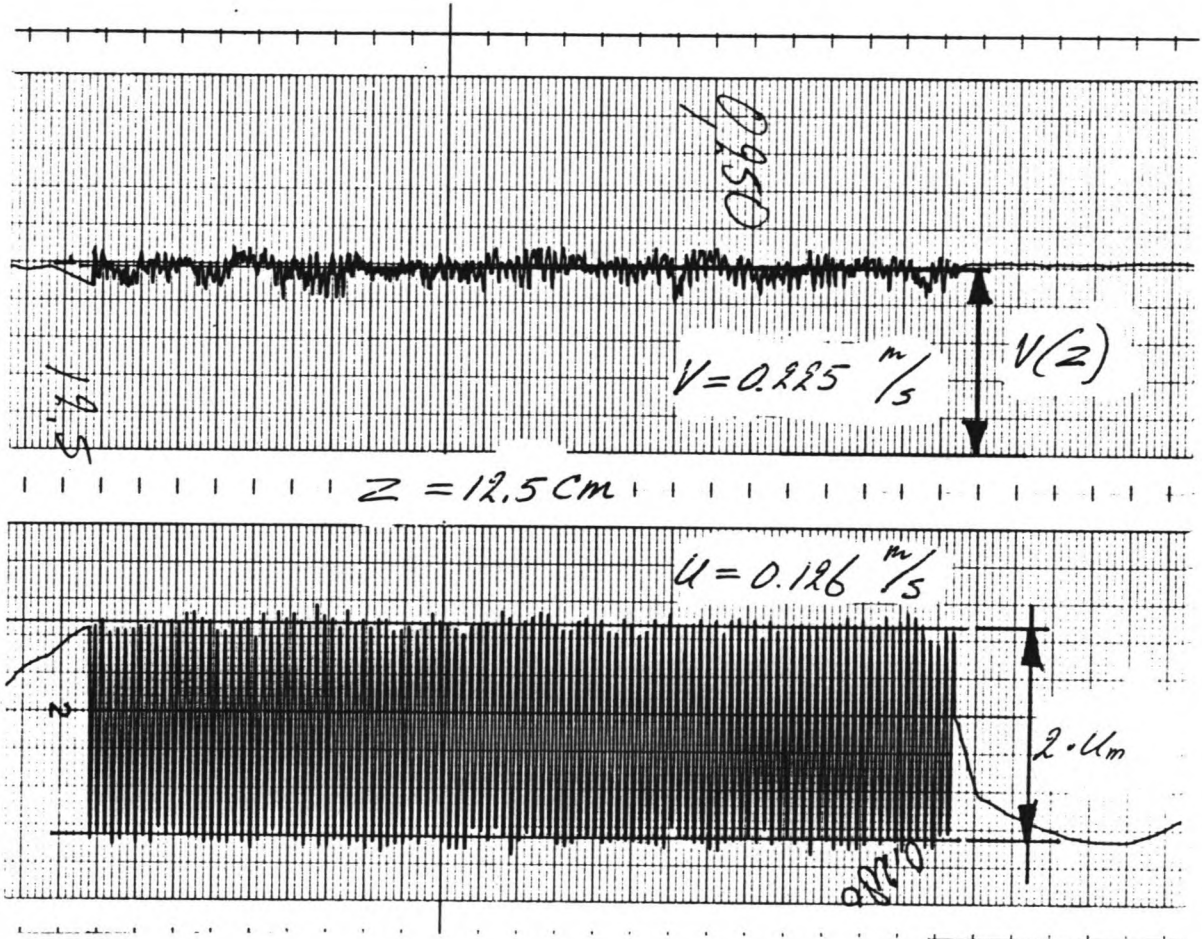
Uit afb. 4.8a bleek al dat de heen en teruggaande orbitaalsnelheden niet steeds gelijk waren. Volgens de lineaire kortegolf-theorie echter, moeten de beide snelheden aan elkaar gelijk zijn. De in afb. 4.8b en in tabel 4.5 gepresenteerde waarden betreffen dan ook steeds

laat dat zien

kan golfh?

u_m

een gemiddelde van de heen- en de teruggaande beweging. Met deze proefresultaten, gekombineerd met de resultaten uit 4.1.3.1, zijn we nu in staat de factor u_m/\bar{v} te bepalen (zie tabel 4.6).



afb. 4.9: O.L.D.S-output

4.1.4 Snelheidsmetingen met de O.L.D.S.

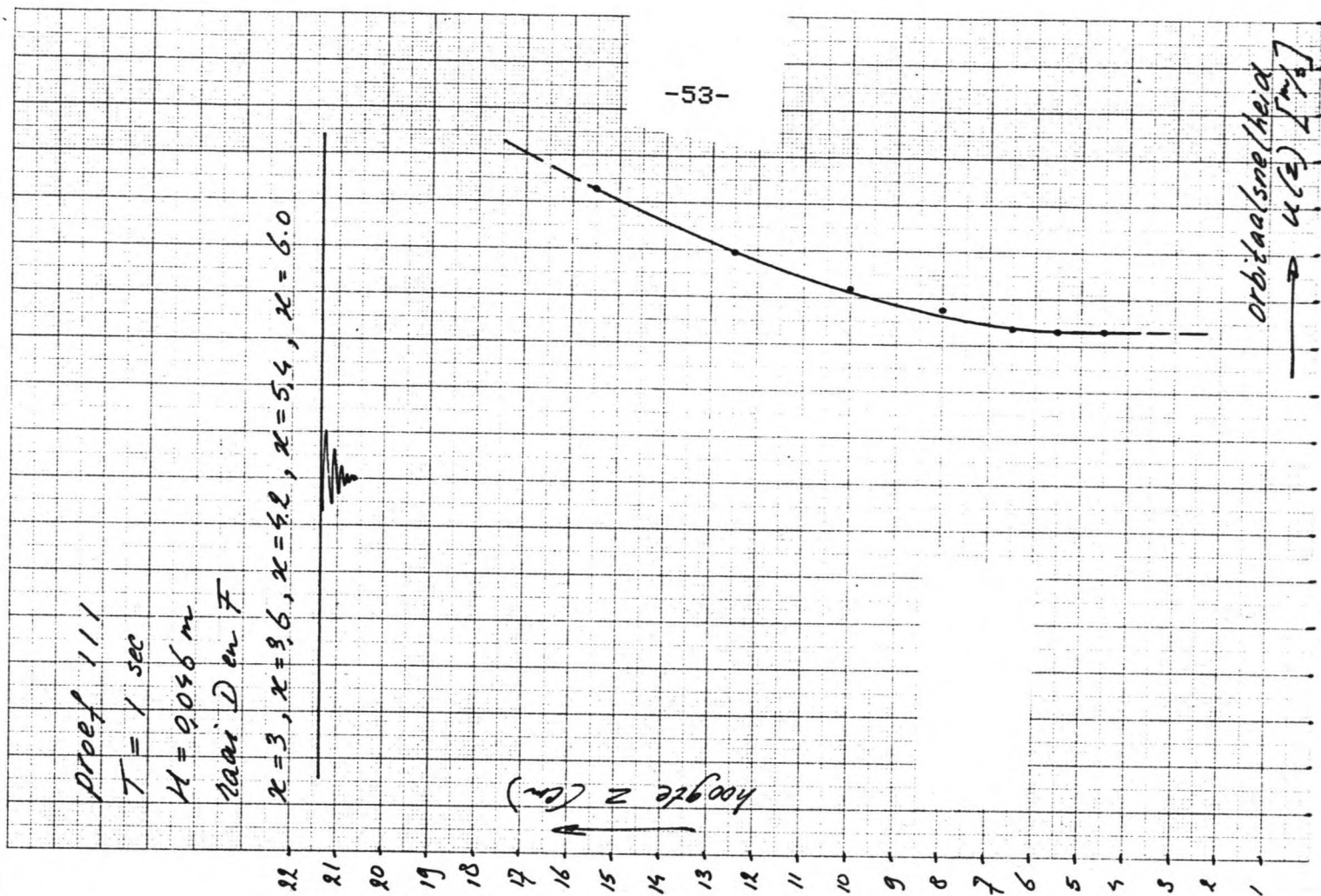
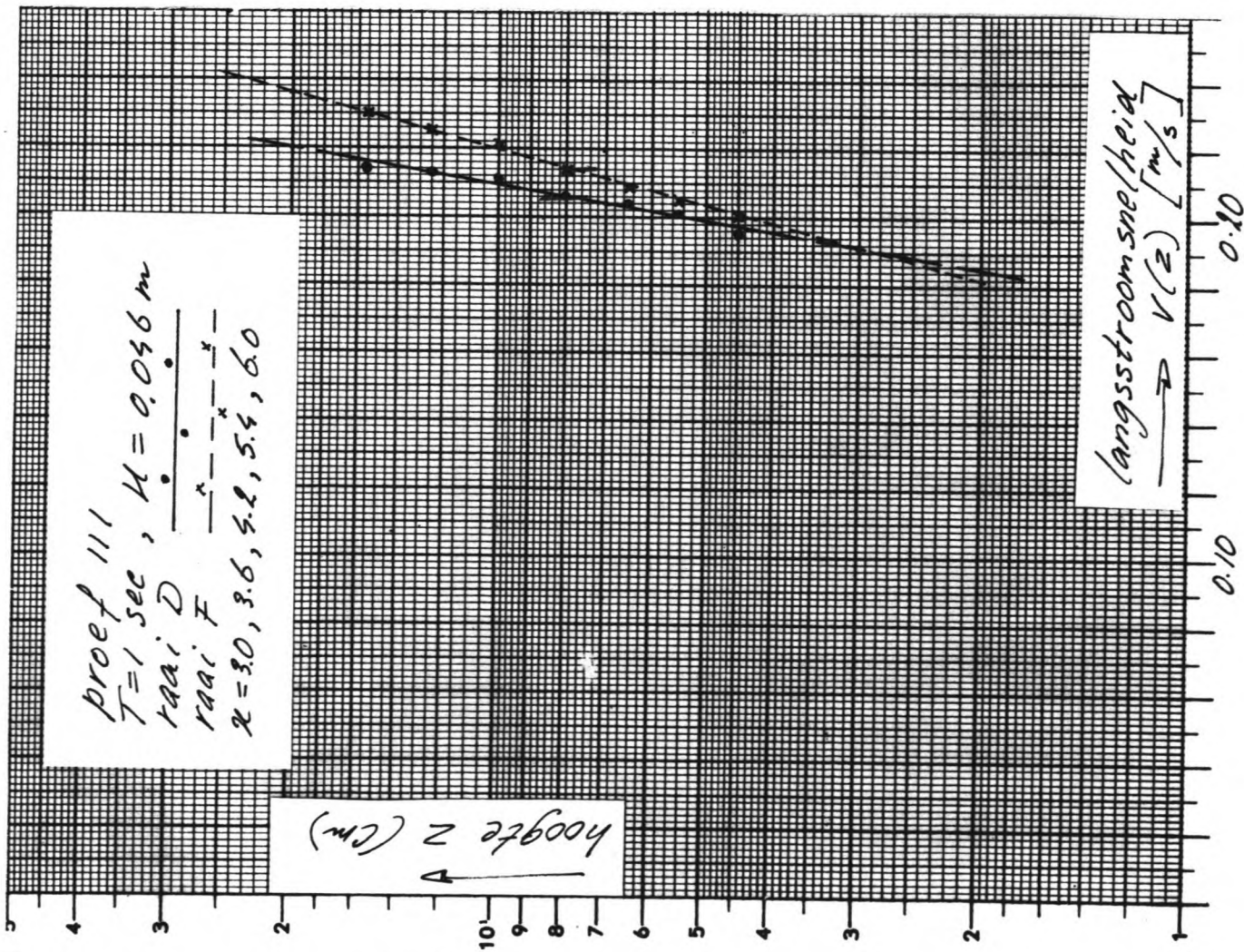
Met de O.L.D.S. zijn tegelijkertijd langsstroom- en orbitaalsnelheden gemeten bij een debiet van ca. 410 l/s (zie paragraaf 4.1.3.1), gekombineerd met 3 verschillende golfvelden, te weten:

T=1s en H=0,046m (proef 111), T=1s en H=0,070m (proef 121), T=1,8s en H=0,076m (proef 141).

Doel van deze proevenserie was de werkelijke factor u_m/\bar{v} (met u_m en \bar{v} tegelijkertijd optredend), te kunnen vergelijken met u_m/\bar{v} gemeten met de MM.

Bij alledrie de proeven is gemeten in twee raaien, steeds meerdere punten per raai. Een meting duurde ca. 100s, gedurende welke het signaal op de integrator (\bar{v}) en op de schrijver (u en \bar{v}) werd afgelezen. Afbeelding 4.9 toont een karakteristiek voorbeeld van een meting (proef 111, raai F, x=5,4m, z=12,5cm).

De resultaten van de 3 proefnummers zijn grafisch weergegeven in afb. 4.10, 4.11 en 4.12. De langsstroomsnelheden zijn hierin per raai

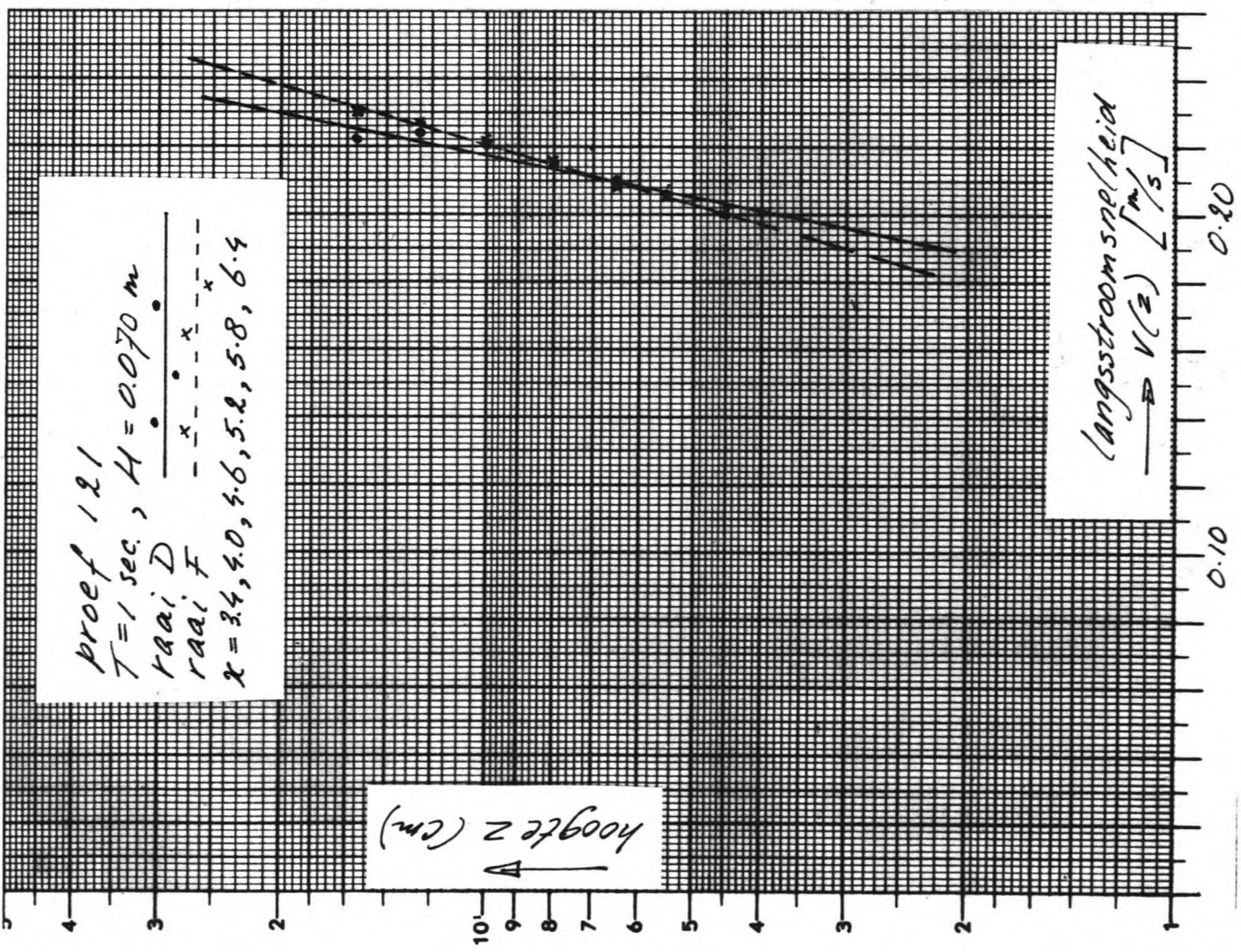


proef 121
 $T = 1$ sec
 $H = 0.070$ m
 Raai D en F

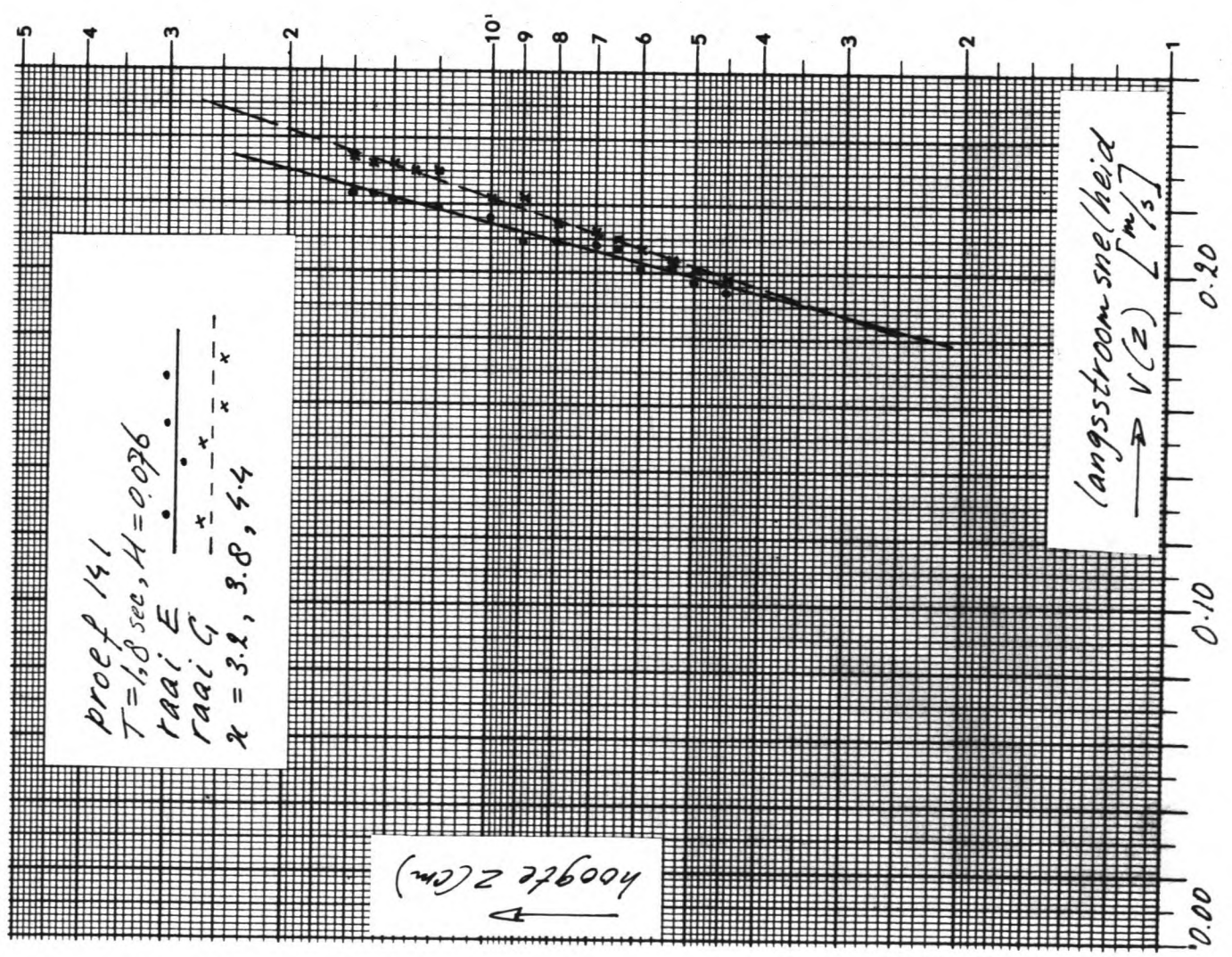
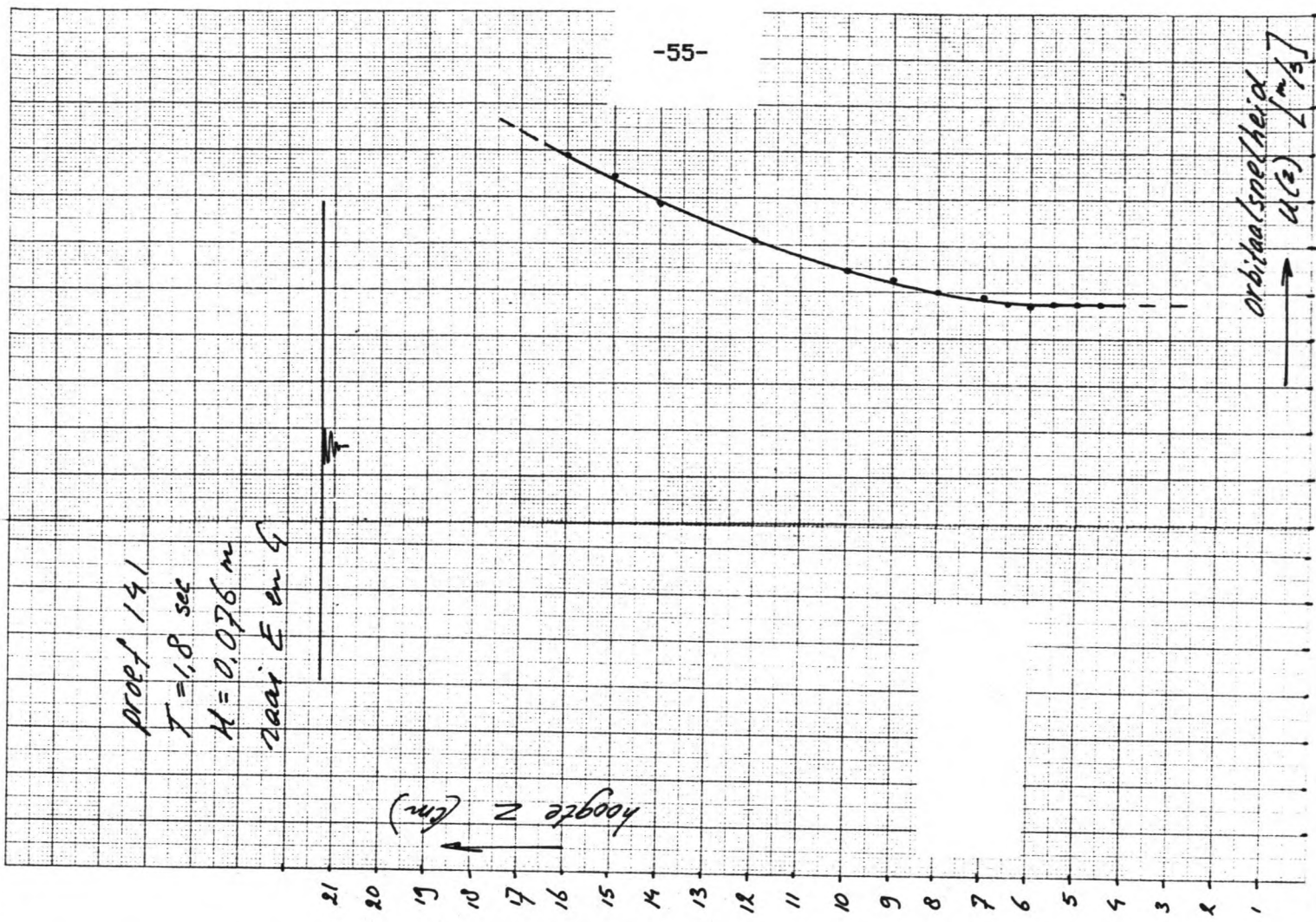
hoogte z (cm)

21
20
19
18
17
16
15
14
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1

orbitaal snelheid
 u_m (m/s)



afb. 4.11 : snelheidsprofielen proef 121



afb. 4.12: snelheidsprofielen proef 141

afzonderlijk afgebeeld, omdat ook hier weer tot uiting kwam dat de stroomsnelheid in y-richting toeneemt. De orbitaalsnelheidsprofielen bleken over beide raaien nauwelijks verschillen te vertonen, en zijn daarom gemiddeld tot een representatief profiel.

Een overzicht van de meest relevante gegevens uit de proevenserie met de O.L.D.S. is gegeven in tabel 4.7.

proef nr.	111		121		141	
	D	F	D	F	E	G
A (1/s)	0,01512	0,02404	0,01824	0,02557	0,02266	0,029263
B (m/s)	0,2441	0,2751	0,2596	0,2794	0,2661	0,2894
h (m)	0,2136	0,2130	0,2127	0,2123	0,2125	0,2121
\bar{v} (m/s)	0,206	0,214	0,213	0,214	0,208	0,215
\bar{v}_{gem} (m/s)	0,210		0,213		0,212	
u_m (m/s)	0,113		0,173		0,187	
u_m/\bar{v}	0,54		0,81		0,88	

tabel 4.7

Een vergelijking van tabel 4.7 met tabel 4.6, leert dat zowel u_m en \bar{v} als u_m/\bar{v} vrij goed overeenkomen. Blijkbaar was dus de veronderstelling dat de snelheidsprofielen van $v(z)$ en $u(z)$ niet noemenswaardig zouden veranderen wanneer ze onafhankelijk van elkaar gemeten worden (paragraaf 4.1.3), gerechtvaardigd. Dit houdt tevens in dat de "weging" van icw/ic met $hcw/hc \cdot (\bar{v}_c/\bar{v}_{cw})^2$, waarover gesproken wordt in hoofdstuk 3.1, hier niet hoeft plaats te vinden.

4.1.5 Bodemwrijving

Alle meetgegevens uit de vorige 3 paragrafen zullen nu worden samengevoegd, teneinde de invloed van een golfveld op de bodemwrijving te kunnen nagaan. Zie hiervoor tabel 4.8, alsmede voor een overzicht van alle verrichte metingen (dus ook de metingen op de verruwde bodem) de tabel die als bijlage achterin dit rapport is opgenomen. Alvorens tot een bespreking van de resultaten over te gaan, eerst een paar opmerkingen bij de tabel:

- 1- De waarde voor het debiet is berekend uit de gemeten snelheden volgens vergelijking 4.4. Met een andere stroomverdeling over het talud kan een enigszins gewijzigd debiet gevonden worden.
- 2- Bij de proefnummers die stroming plus golven aanduiden, zijn achter MM (=mikromolen) toch snelheidsmetingen vermeld. Het moge inmiddels duidelijk zijn dat het hier snelheidsmetingen betreft die in de afzonderlijke situaties (alleen stroming en alleen golven) zijn verricht.
- 3- Voor h en v zijn steeds de gemiddelde waarden over het traject raai D- raai F vermeld.
- 4- De waarden voor C en r zijn berekend uit de resultaten van proef 101. Er is verondersteld dat de ruwheid bij een andere instelling

proef nr.	basis grootheden										afgeleide grootheden						
	ρ (1/s)	MM/OLDS	T (s)	H (m)	h (m)	\bar{U} (m/s)	U_m (m/s)	(10^{-5})	C (10^{-3})	$(10^{-3}m)$	ξ_b	ξ_s	U_m/\bar{U}	fb	fs	$f\xi=1$	icw/ic
101	410	MM	-	-	0,214	0,216	-	7,2	3	2	-	-	-	-	-	-	-
110	-	MM	1	0,046	0,213	-	0,119	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
111	410	MM OLDS	1	0,046	0,213	0,216 0,210	0,119 0,113	6,7	3	2	2,9	3,5 3,6	0,55 0,54	1,46 1,44	1,63 1,64	1,07 1,07	0,93
120	-	MM	1	0,070	0,210	-	0,179	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
121	410	MM OLDS	1	0,070	0,213	0,216 0,213	0,179 0,173	6,0	3	2	2,9	3,1 3,1	0,83 0,81	1,90 1,87	2,00 1,96	1,15 1,14	0,83
130	-	MM	1,8	0,043	0,214	-	0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
131	410	MM	1,8	0,043	0,213	0,216	0,125	6,8	3	2	2,9	2,9	0,58	1,50	1,50	1,08	0,94
140	-	MM	1,8	0,076	0,212	-	0,188	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
141	410	MM OLDS	1,8	0,076	0,213	0,216 0,212	0,188 0,187	7,1	3	2	2,9	2,6 2,6	0,87 0,88	1,97 1,99	1,82 1,83	1,16 1,18	0,99

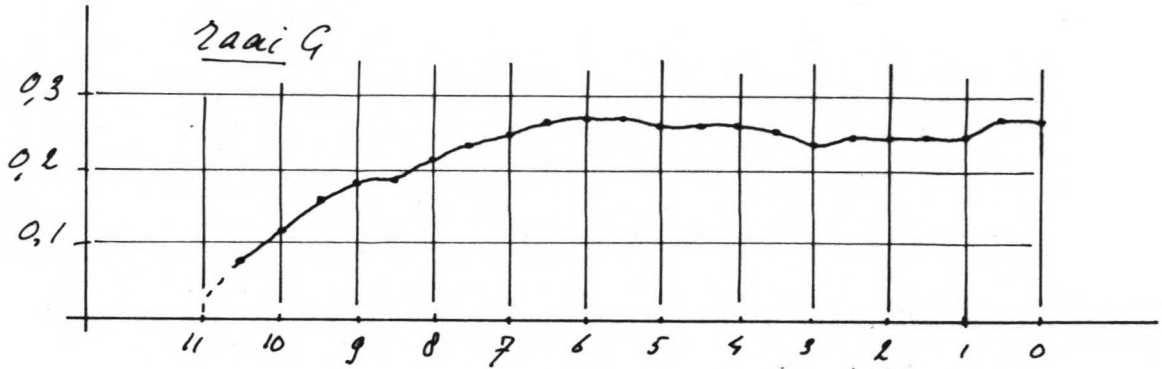
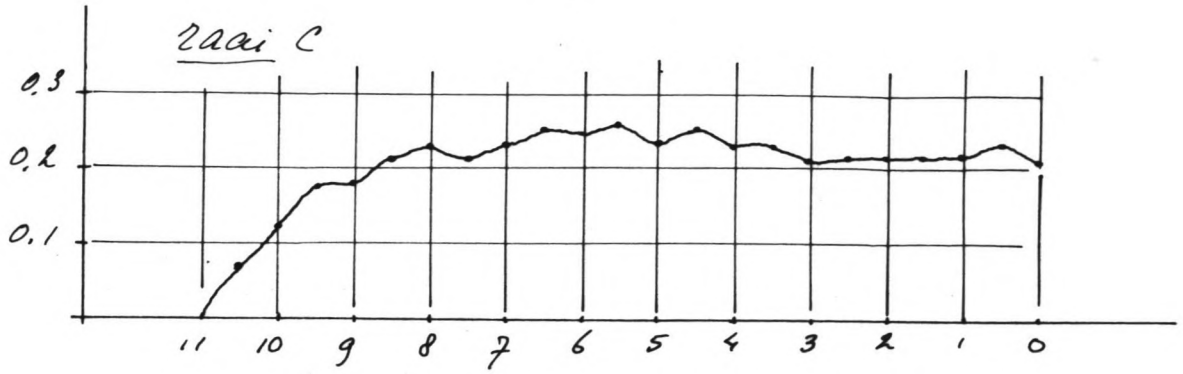
tabel 4.8

(stroming plus golven) niet verandert.

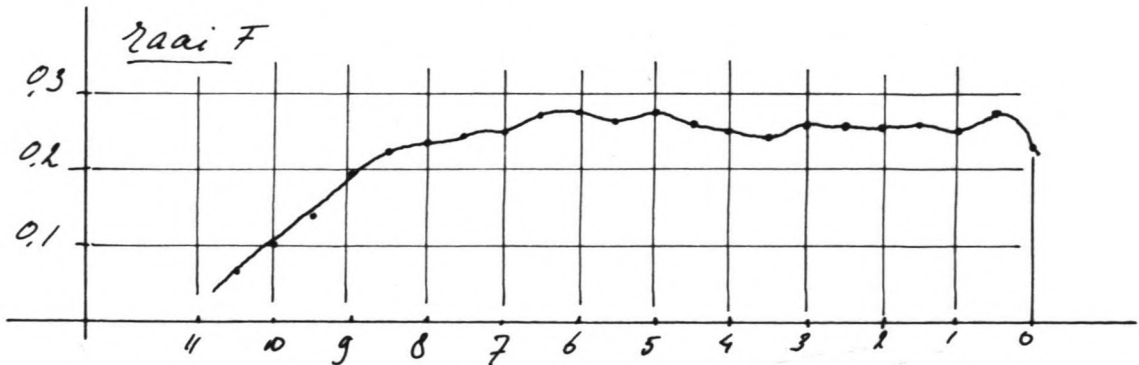
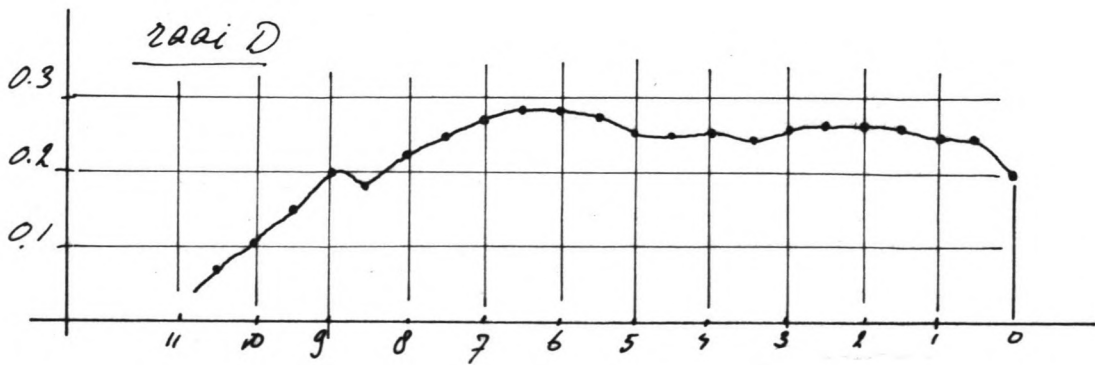
Uit tabel 4.8 blijkt duidelijk dat zowel het model van Bijker als dat van Swart de bodemwrijvingstoename behoorlijk overschatten. Uit de verhangmetingen is duidelijk de tendens waar te nemen dat de toename van de bodemwrijving zeer klein moet zijn. De theorie waarbij gewerkt wordt met $\xi=1$ sluit hierbij nog het beste aan. Helemaal overeenstemmen doen de proefresultaten echter nog niet, daarvoor zijn met name de verhangmetingen te onnauwkeurig (zie paragraaf 4.1.1). De toename van de bodemwrijving is zo klein (als er al een toename is), dat de bijbehorende toename van het verhang verdwijnt in de meet-onnauwkeurigheid.

De vraag is nu dus, hoe een eventuele toename van de bodemwrijving aantoonbaar gemaakt kan worden? Volgens de theorie moet dan de faktor u_m/\bar{v} zo groot mogelijk zijn. u_m kan echter niet groter (anders gaan de golven breken), zodat de stroming verminderd zal moeten worden. Dit betekent echter dat het verhang kleiner zal worden en derhalve dus moeilijker te meten. Om deze reden zal gekombineerd met de vergroting van u_m/\bar{v} de bodem van het model verruwd worden. In hoofdstuk 4.2 zal hier uitgebreid op worden ingegaan.

Afsluitend kan gekonkludeerd worden dat het niet kunnen aantonen van een toename van de bodemwrijving hier waarschijnlijk niet het gevolg is van niet-uniforme stroming in het model. De vrij goede overeenkomst tussen \bar{v}_c en \bar{v}_{cw} duidt er verder op dat de stroomverdeling tussen konstant-diepte gedeelte en talud zich niet al te zeer wijzigt wanneer er een golfveld op de stroming gesuperponeerd wordt (bij de gladde beton bodem althans).



afb. 4.13 : snelheidsmetingen op 2/3-hoogte bij halfmax. debiet (oorspronkelijk)



afb. 4.14 : snelheidsmetingen op 2/3-hoogte bij halfmax. debiet (verbeterd)

4.2 METINGEN OP RUWE BODEM.

4.2.1 Instelmetingen.

Evenals de metingen op de gladde betonbodem wordt ook op de verruwde bodem begonnen met instelmetingen, teneinde een uniforme stroming te bewerkstelligen.

Afb. 4.13 toont op 2/3 hoogte, om de 50cm gemeten, horizontale snelheidsprofielen in raai C en raai G. In cijfers:

raai C: $\bar{v}=0,229$ m/s , $\sigma/\bar{v}=6,7$ %

raai G: $\bar{v}=0,254$ m/s , $\sigma/\bar{v}=4,4$ %

Uit de afbeelding blijkt dat er minder water stroomt tussen $x=0$ en $x=3,5$ m. Er is getracht dit te verbeteren door tussen $x=1$ en $x=3$ instroomweerstand weg te nemen. Afb. 4.14 toont de uiteenlijke snelheidsprofielen in raai D en raai F, de twee raaien waarin ook verticale snelheidsprofielen gemeten zullen worden. In cijfers:

raai D: $\bar{v}=0,254$ m/s , $\sigma/\bar{v}=4,9$ %

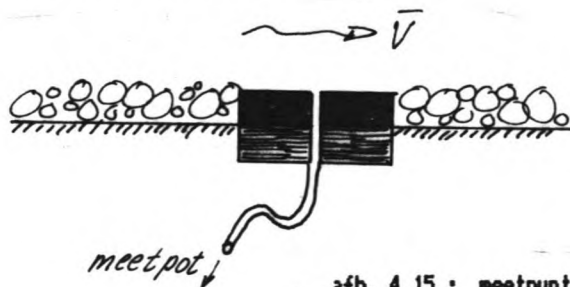
raai F: $\bar{v}=0,259$ m/s , $\sigma/\bar{v}=4,4$ %

Het blijkt nu dat de stroming over het gehele konstant-diepte gedeelte ($x=0$ tot $x=6,5$) redelijk konstant is, en dat de twee raaien vrij goed overeenkomen. Wanneer we het snelheidsprofiel vergelijken met het profiel gemeten op de gladde beton bodem (paragraaf 4.1.1), dan blijkt dat de gemiddelde stroomsnelheid direkt vanaf de teen van het talud begint terug te lopen, m.a.w. dat hier minder water over het talud stroomt dan bij de gladde bodem.

Een opmerking tot slot: De schijnbare diskontinuiteit in het snelheidsverloop t.p.v. $x=8,5$ in raai D, is vermoedelijk het gevolg van een niet helemaal juist ingestelde meethoogte van $2/3h$.

4.2.2 Verhangmetingen

Evenals dat bij de proeven op de gladde bodem gebeurt is, zijn ook hier weer verhangen gemeten, gebruik makend van de meetpotten aan de rand van het bassin. Omdat nu op de betonbodem een laagje grind is aangebracht ($d_{90}=8$ mm), zijn ook de meetopeningen in de bodem evenredig omhoog gebracht, ter voorkoming van wervelingen. Dit is eenvoudig gebeurd door het aanbrengen van een vierkant plaatje van 8×8 cm en dikte ca. 5mm (zie afb. 4.15)

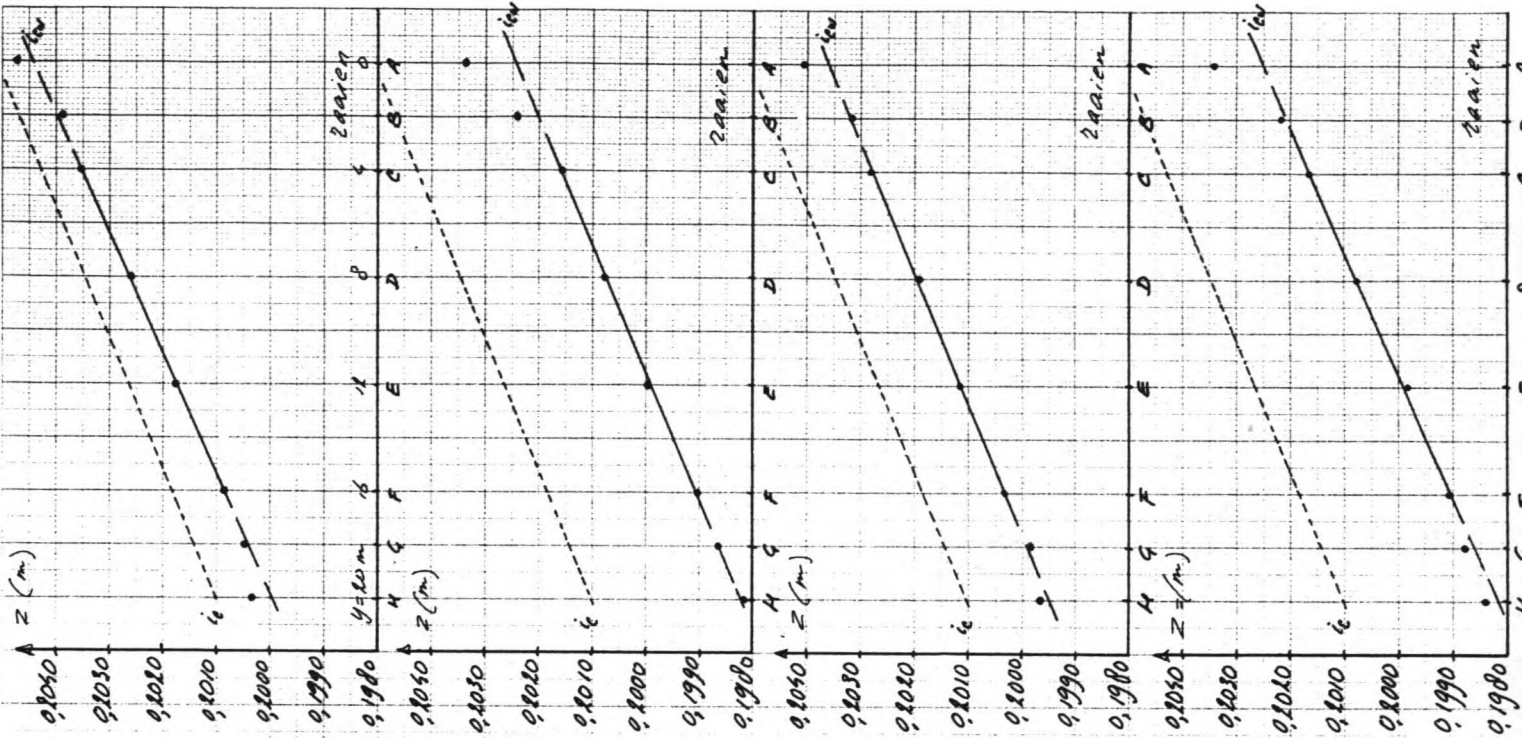


afb. 4.15 : meetpunt in de bodem

In afwijking van de proeven op de gladde beton bodem is nu gemeten bij 3 verschillende instellingen van het debiet (plus gesu-
perponeerde golfvelden). Er is met name gemeten bij kleinere debie-
ten. Ook is er naar gestreefd meer verhangmetingen te doen, teneinde
door middeling van de uitkomsten een grotere nauwkeurigheid te kunnen
bewerkstelligen.

proef nr.	Q (l/s)	T (s)	H (m)	hA (m)	hB (m)	hC (m)	hD (m)	hE (m)	hF (m)	hG (m)	hH (m)	hDE (m)	n (-)	i (10 ⁻⁵)	Ti/i (%)	icw/ic (-)
201	360	-	-	0,2053	0,2048	0,2043	0,2034	0,2027	0,2018	0,2015	0,2011	0,2030	10	20,6	4,8	-
211	360	1	0,056	0,2048	0,2039	0,2035	0,2026	0,2018	0,2009	0,2005	0,2003	0,2022	3	21,8	2,8	1,06
221	360	1	0,100	0,2034	0,2024	0,2016	0,2008	0,2000	0,1990	0,1987	0,1982	0,2004	2	21,0	4,5	1,02
231	360	2	0,049	0,2041	0,2032	0,2028	0,2019	0,2012	0,2003	0,1999	0,1997	0,2015	2	20,6	5,1	1,00
241	360	2	0,106	0,2034	0,2022	0,2017	0,2008	0,1998	0,1991	0,1988	0,1984	0,2003	3	21,7	3,1	1,05
301	135	-	-	0,1553	0,1552	0,1551	0,1547	0,1544	0,1542	0,1540	0,1538	0,1545	7	7,5	9,4	-
311	135	1	0,049	0,1554	0,1548	0,1550	0,1544	0,1541	0,1538	0,1537	0,1535	0,1543	4	9,6	5,4	1,28
321	135	1	0,080	0,1546	0,1545	0,1544	0,1539	0,1534	0,1530	0,1528	0,1526	0,1536	5	11,8	10,2	1,57
331	135	2	0,045	0,1556	0,1554	0,1552	0,1547	0,1543	0,1541	0,1538	0,1539	0,1545	2	9,5	5,2	1,27
341	135	2	0,081	0,1551	0,1550	0,1547	0,1543	0,1537	0,1535	0,1532	0,1533	0,1540	5	10,9	6,7	1,45
401	95	-	-	0,1429	0,1429	0,1429	0,1426	0,1424	0,1423	0,1423	0,1421	0,1425	5	4,7	11,4	-
421	95	1	0,066	0,1422	0,1420	0,1420	0,1418	0,1412	0,1409	0,1407	0,1406	0,1415	2	9,3	1,1	1,98
441	95	2	0,068	0,1418	0,1417	0,1415	0,1413	0,1409	0,1407	0,1406	0,1406	0,1411	5	6,9	16,2	1,47

tabel 4.9

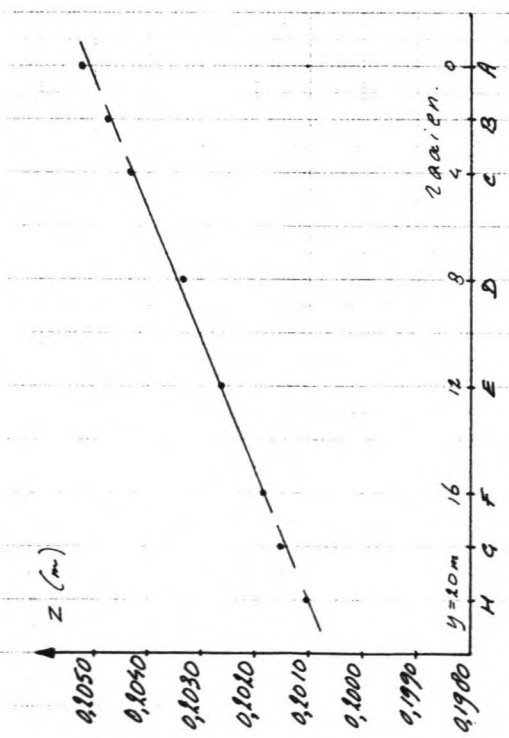


proef 211
 $Q = 360 \text{ l/s}$
 $n = 3$
 $T = 1 \text{ sec.}$
 $H = 9,056 \text{ m}$
 $s.h. = 64\%$
 $s.l. = 20\%$
 $i_w = 2,18 \cdot 10^{-4}$
 $i_w/i_c = 1,06$

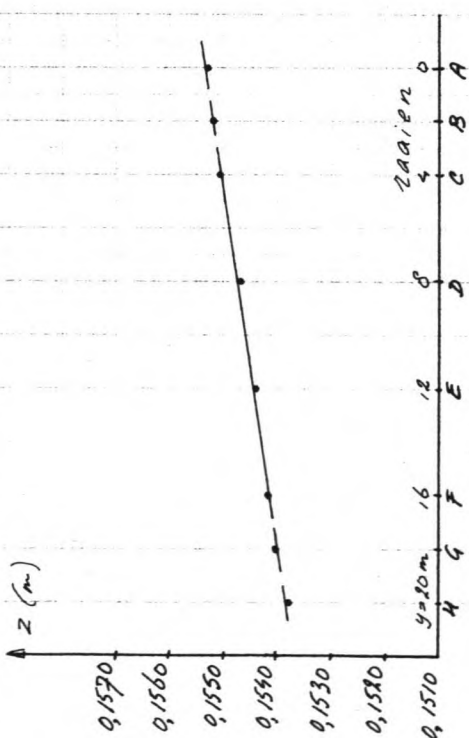
proef 221
 $Q = 360 \text{ l/s}$
 $n = 2$
 $T = 1 \text{ sec.}$
 $H = 9,100 \text{ m}$
 $s.h. = 62\%$
 $s.l. = 34\%$
 $i_w = 2,10 \cdot 10^{-4}$
 $i_w/i_c = 1,02$

proef 231
 $Q = 360 \text{ l/s}$
 $n = 2$
 $T = 2 \text{ sec.}$
 $H = 9,099 \text{ m}$
 $s.h. = 20\%$
 $s.l. = 20\%$
 $i_w = 2,06 \cdot 10^{-4}$
 $i_w/i_c = 1,00$

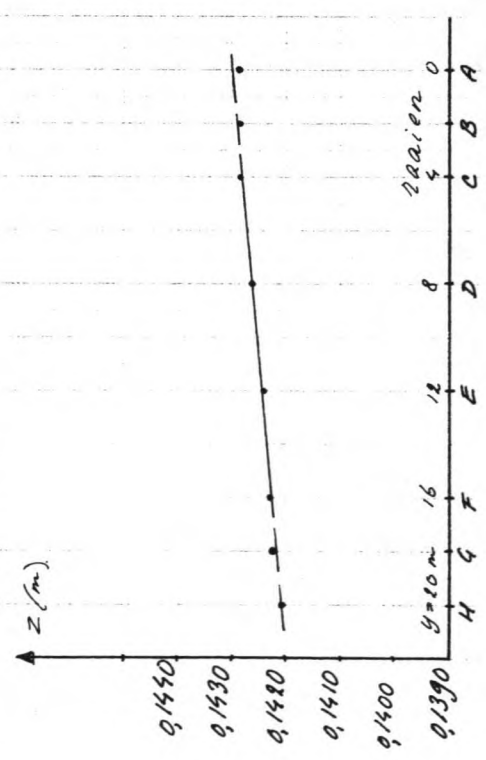
proef 251
 $Q = 360 \text{ l/s}$
 $n = 3$
 $T = 1 \text{ sec.}$
 $H = 9,106 \text{ m}$
 $s.h. = 28\%$
 $s.l. = 37\%$
 $i_w = 2,17 \cdot 10^{-4}$
 $i_w/i_c = 1,05$



proef 201
 $Q = 360 \text{ l/s}$
 $n = 10$
 geen golf
 $i_c = 2,06 \cdot 10^{-4}$

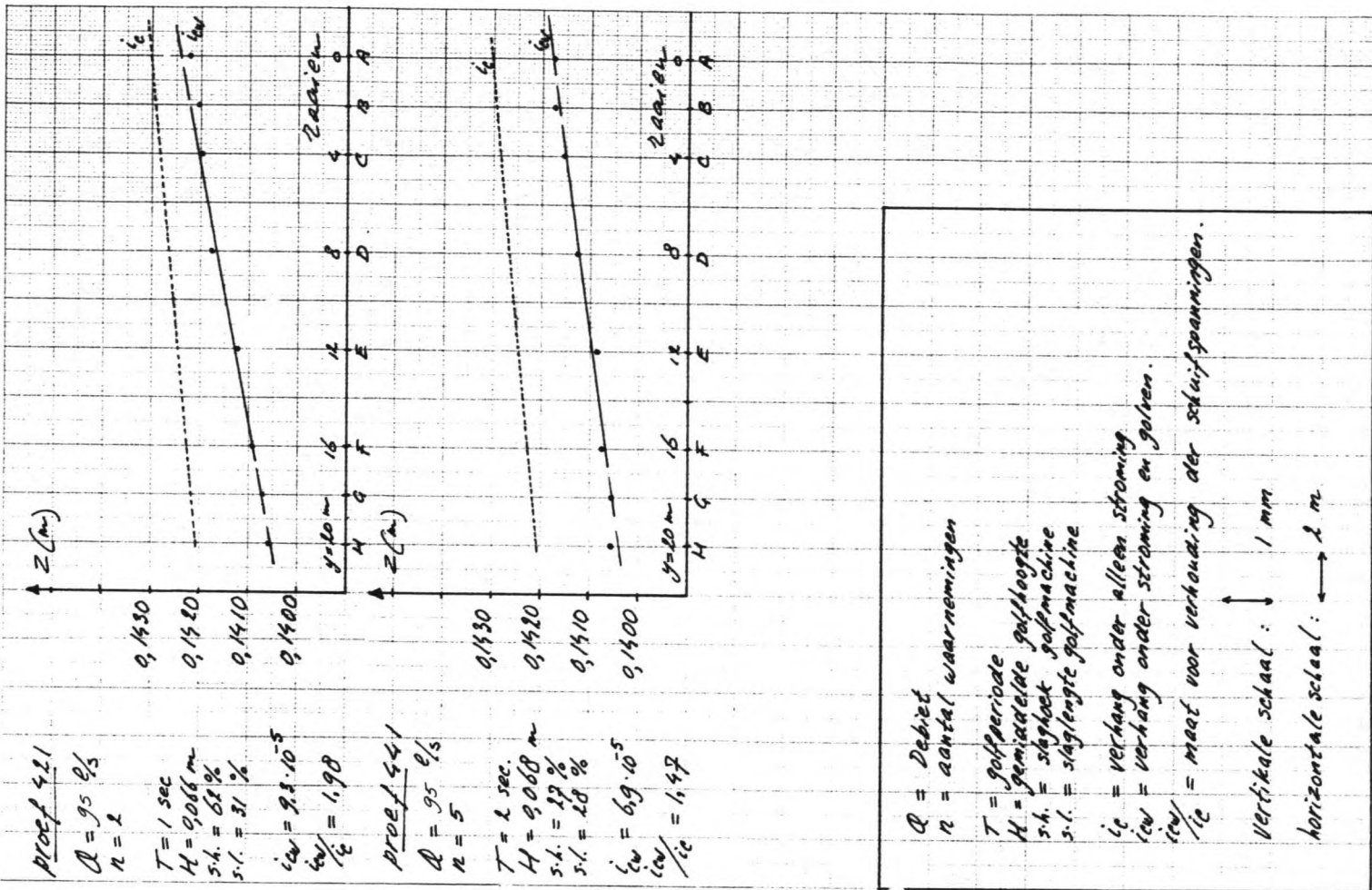


proef 301
 $Q = 135 \text{ l/s}$
 $n = 7$
 geen golf
 $i_c = 7,5 \cdot 10^{-5}$

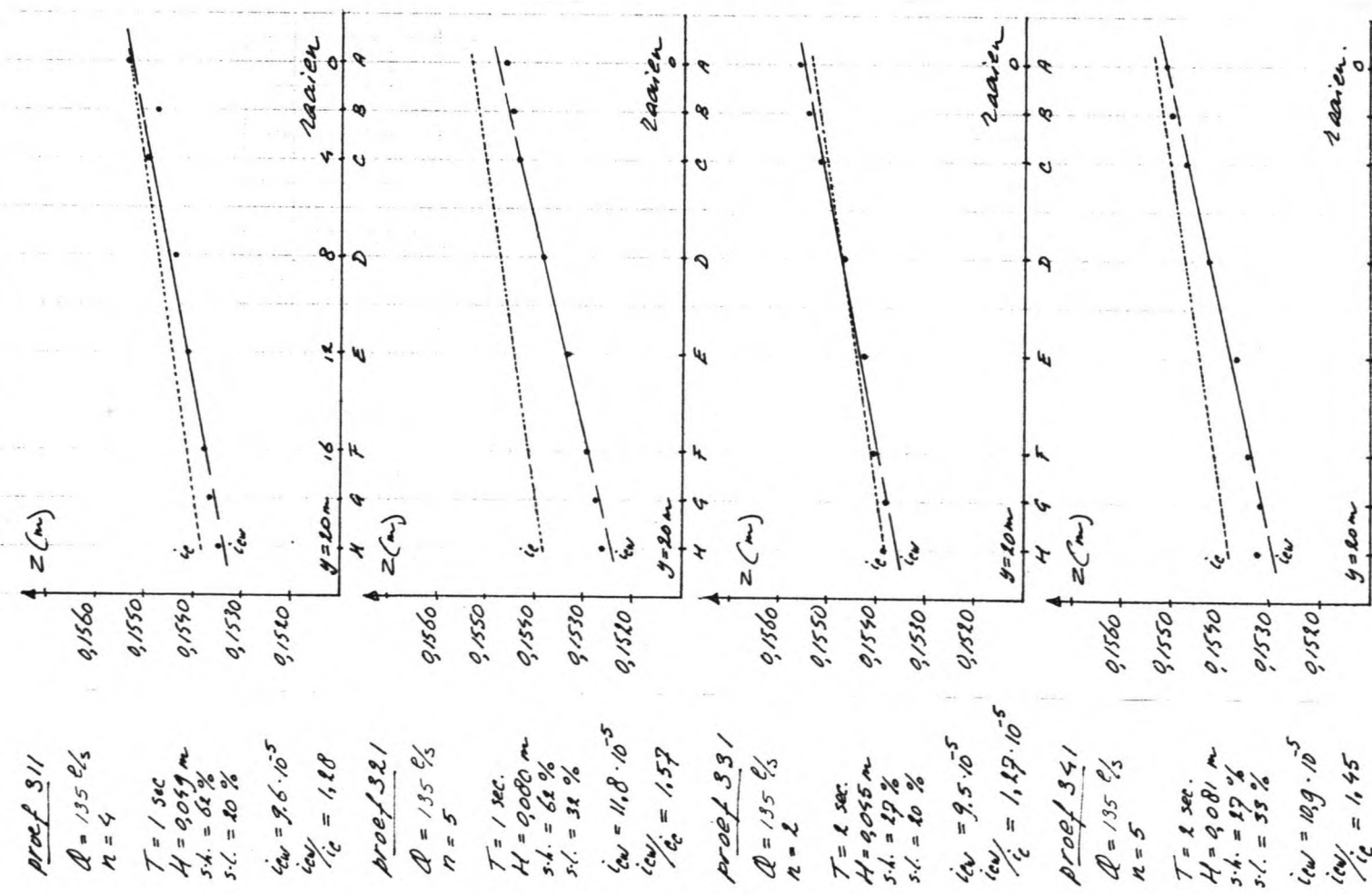


proef 501
 $Q = 95 \text{ l/s}$
 $n = 5$
 geen golf
 $i_c = 4,7 \cdot 10^{-5}$

afb. 4.16 I : verhangen



Q = Debiet
 n = aantal waarnemingen
 T = golpperiode
 H = gemiddelde golfhoogte
 $s.h.$ = slaghoek golfmachine
 $s.l.$ = slaglengte golfmachine
 i_c = verhang onder alleen stroming
 i_w = verhang onder stroming en gulven.
 i_w/i_c = maat voor verhouding der schuifspanningen.
 Vertikale schaal: 1 mm
 horizontale schaal: 2 m



afb. 4.16 II : verhangen

De verhangen zijn weer met behulp van lineaire regressie berekend uit de waterstandsmetingen in raai C, D, E en F. De resultaten van waterstandsmetingen en verhangberekening zijn verzameld in tabel 4.9, en afgebeeld in afb. 4.16.

Het blijkt dat deze keer wel een toename van het verhang gekonstateerd kon worden. Hoe kleiner het debiet (en dus hoe groter de faktor u/\bar{v}), des te groter wordt de toename van het verhang. Dit is op zich hoopgevend te noemen.

Wat opvalt is dat de optredende verhangen ten gevolge van de ruwere bodem duidelijk groter zijn (zeker bij proevenserie 2), dan bij de eerste proevenserie. Het blijkt echter ook dat de spreiding in de berekende verhangen nog altijd vrij groot te noemen is: ca. 4% voor proevenserie 2, 7% voor serie 3 en zelfs ca. 10% voor serie 4. Hoe kleiner het verhang des te groter de spreiding (des te groter de onnauwkeurigheid dus). Blijkbaar is het nog altijd moeilijk om in het model een behoorlijk verhang te kunnen meten, ondanks dat er 30 meetpunten over de gehele bodem verspreid liggen. Dit verschijnsel kwam bij het uitwerken van de proeven reeds snel aan het licht. Zo bleek het vrij veel uit te maken of het verhang berekend werd over 4 of meer raaien en ook of de meetpunten in $x=8$ (op het talud) wel of niet in de berekening werden meegenomen. Veel hinder werd bovendien ondervonden van diffractie bij de in- en uitstroming en van periodieke opslinger-verschijnselen ten gevolge van tweede harmonische stoorgolven (zie paragraaf 3.3.1).

Al met al zijn de verhangen dus niet berekend uit 30 maar slechts uit 12 meetpunten, verspreid over de raaien C, D, E en F. In het geval van stroming plus golven zijn de meetpunten op het talud niet meegerekend, en bleken per keer 2 tot 3 meetpunten onbetrouwbaar door lucht in de leidingen.

De verhangmetingen lijken dus nog altijd een zwakke schakel te zijn in de gehele experimenten-cyclus.

4.2.3 Snelheidsmetingen met de mikromolen.

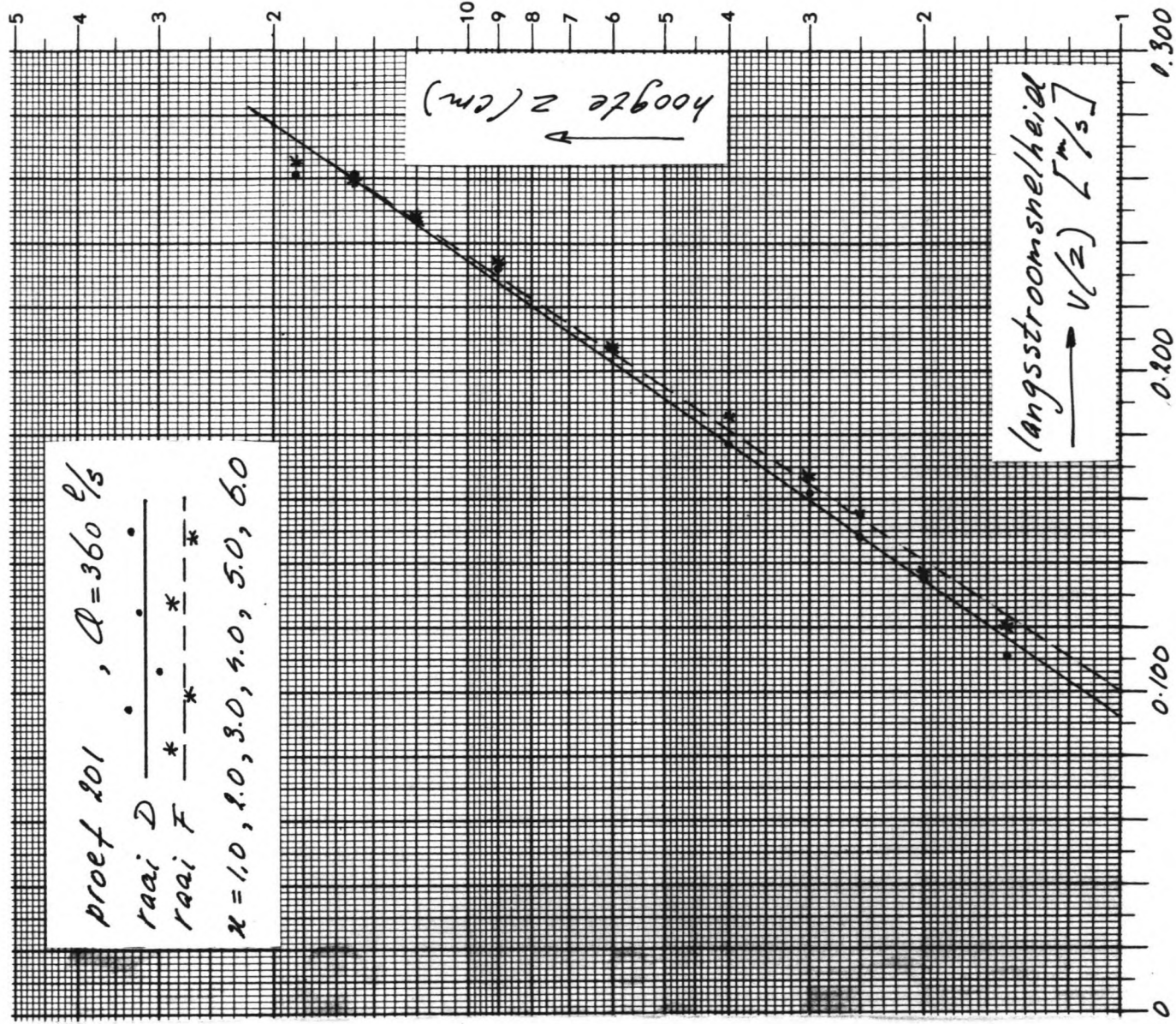
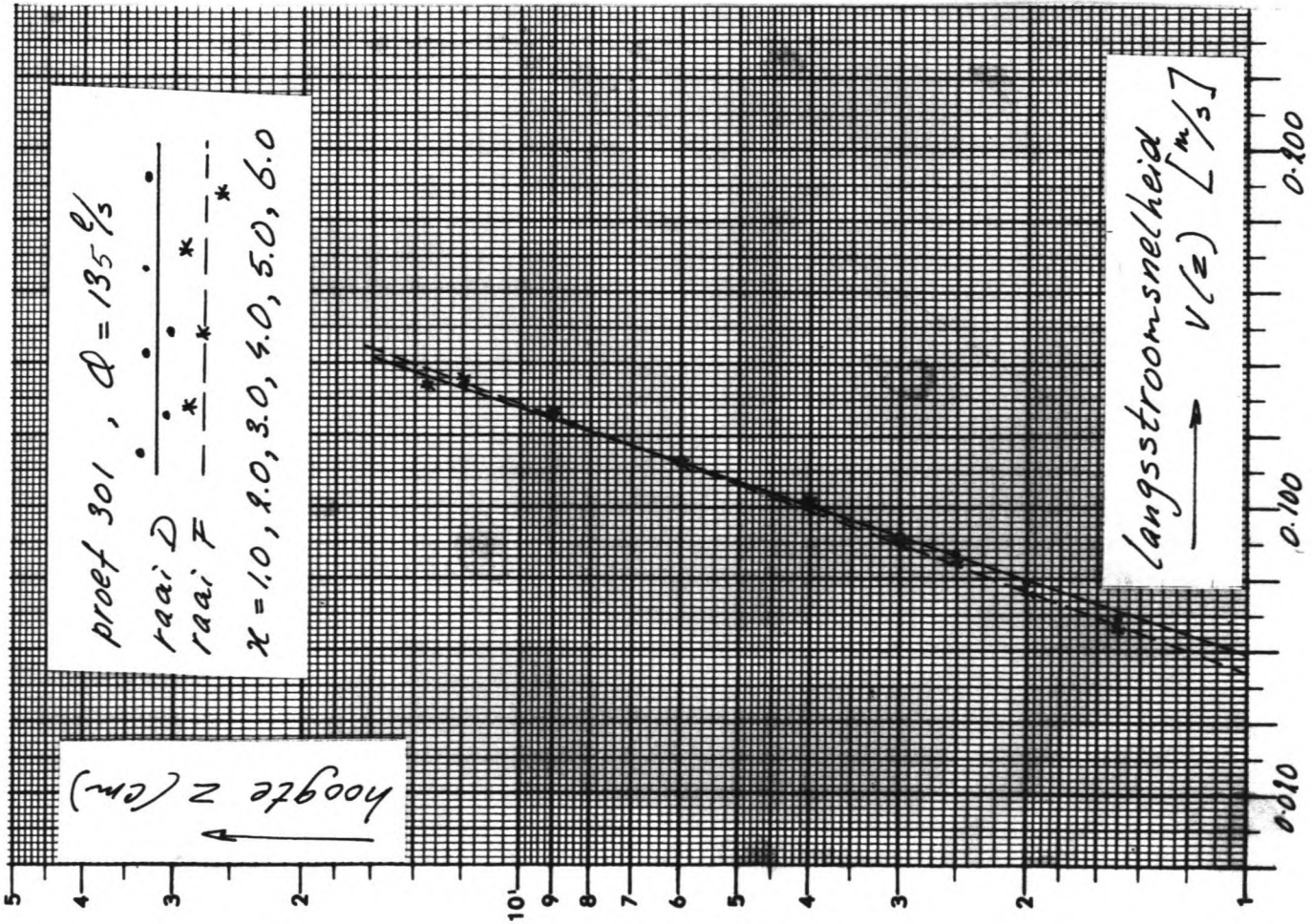
4.2.3.1 Langsstromsnelheden

Na de vrij ruwe instelmetingen op $2/3$ hoogte, zijn weer verticale snelheidsprofielen gemeten; en wel in de raaien D en F, in de punten $x=1,2,3,4,5,6$ op het konstant-diepte gedeelte. Met de MM zijn snelheden gemeten bij twee verschillende instellingen van het debiet, te weten $Q \approx 1/2 Q_{max}$ (proef 201) en $Q \approx 1/6 Q_{max}$ (proef 301). Afb. 4.17a en 4.17b tonen de gemiddelde snelheidsprofielen voor raai D en F, bij respectievelijk proef 201 en proef 301. In tabel 4.10 worden de karakteristieke waarden voor A, B, h en \bar{v} gegeven, alsmede de spreiding van \bar{v} per raai.

De beide afbeeldingen laten zien dat het snelheidsprofiel tussen raai D en raai F nauwelijks nog verandert. Blijkbaar is er in raai D reeds sprake van een evenwichtsprofiel. Dit is het gevolg van de verruwde bodem. Verder blijkt zowel uit de figuur als uit de tabel, dat de gemiddelde stroomsnelheid over het beschouwde traject nagenoeg konstant is.

Uit de gemeten snelheden kan nu weer het debiet berekend worden. Daartoe maken we gebruik van de vorm van het horizontale snelheidsprofiel zoals dat werd gemeten in 4.2.1 (afb. 4.14). Hieruit bleek dat de gemiddelde snelheid vrijwel konstant was over het konstant-diepte gedeelte, om vervolgens vanaf de teen van het talud

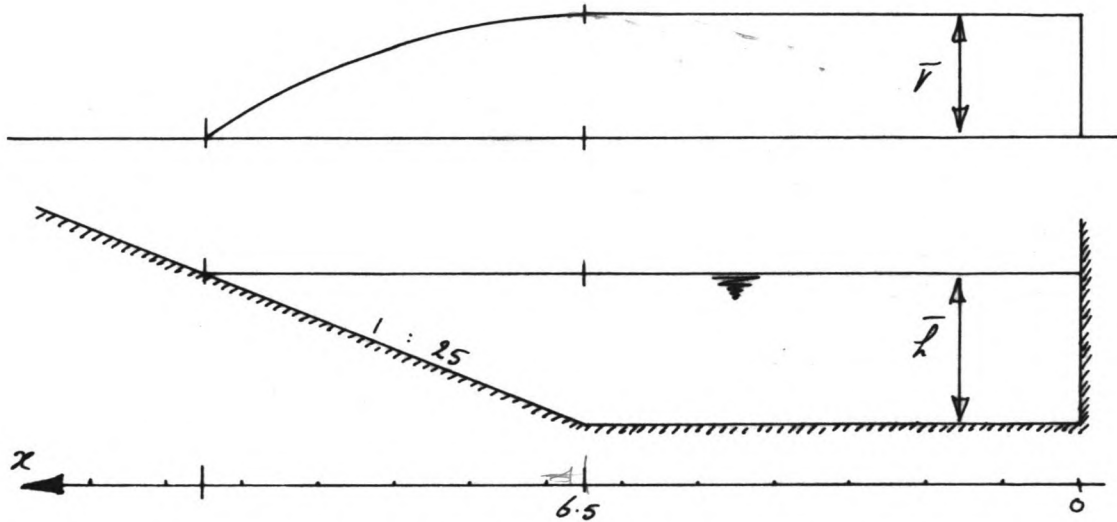
Waarom
ws lager
met golven
dan zonder?



afb. 4.17 : langstroomsnelheidsprofielen

proef nr.	201		301	
raai	D	F	D	F
A	0,0617	0,0589	0,0301	0,0322
B	0,3759	0,3713	0,1972	0,2026
h (m)	0,2034	0,2018	0,1547	0,1542
\bar{v} (m/s)	0,216	0,218	0,111	0,110
$\sigma_{\bar{v}}/\bar{v}$ (%)	4,1	2,6	3,9	3,1

tabel 4.10



afb. 4.18 : snelheidsverdeling over de breedte

ongeveer parabolisch naar nul te gaan. Dit verloop wordt schematisch weergegeven in afb. 4.18.

Er kan nu voor het debiet de volgende relatie worden afgeleid:

$$Q = (6,5 \cdot h \cdot \bar{v}) + 25/2 \cdot h^2 \cdot 2/3 \cdot \bar{v} \quad \text{onzein!} \quad 4.10$$

Hieruit volgt voor de respektievelijke debieten:

proef 201, met $\bar{v}=0,217$ m/s en $h=0,203$ m: $Q \approx 360$ l/s

proef 301, met $\bar{v}=0,111$ m/s en $h=0,155$ m: $Q \approx 135$ l/s

Er is hierbij verondersteld dat de snelheidsverdeling over het talud bij proef 301 eveneens parabolisch is. Dit is echter niet met metingen aangetoond.

Zowel proef 101 (gladde beton bodem) als proef 201 zijn uitgevoerd bij $Q \approx 1/2 \cdot Q_{max}$. De stand van de afsluiters was voor beide proeven gelijk. Toch scheelt het debiet zo'n 11,5%. Natuurlijk zit er een zekere spreiding in de instelling van het debiet. Bovendien kan de snelheidsverdeling over het talud anders geweest zijn dan wordt verondersteld. Voor de goede orde dient echter ook vermeld te worden dat tussen proef 101 en proef 201 een maand gezeten heeft, gedurende welke het golfbassin voor een ander onderzoek werd gebruikt.

proef nr.	201			301		
	gemiddeld over model	raai D	raai F	gemiddeld over model	raai D	raai F
i (10 ⁻⁵)	20,6	-	-	7,5	-	-
h (m)	0,2030	0,2034	0,2018	0,1545	0,1547	0,1542
\bar{U} (m/)	0,217	0,216	0,218	0,111	0,111	0,110
A (1/s)	-	0,0617	0,0589	-	0,0301	0,0322
B (m/s)	-	0,3759	0,3713	-	0,1972	0,2026
Cch(m ^{0.5} /s)	34	27	29	33	25	27
C (10 ⁻⁸)	8,7	13,2	11,7	9,2	15,5	13,8
S (10 ⁻⁸)	0,6	0,6	0,6	1,1	1,1	1,1
r (10 ⁻⁸)	33	75	60	28	47	61
bodem toestand	hydr. ruw	hydr. ruw	hydr. ruw	hydr. ruw	hydr. ruw	hydr. ruw

tabel 4.11

Het stromingsmodel voor het onderhavige onderzoek is in de tussentijd afgebroken geweest en later weer opgebouwd. Het is niet onwaarschijnlijk dat de instroming daarbij iets gewijzigd is, in die zin dat de afsluiters niet meer precies in dezelfde stand stonden, of dat nu meer water achter het golfschot langs is gestroomd.

Tot slot van deze paragraaf zullen nu de ruwheids-koefficienten worden afgeleid. Analooq aan paragraaf 4.1.3.1 zal dit weer op twee manieren gebeuren, n.l. uit een berekening van de Chezy Koefficient en via de faktor zo uit de formule voor het logaritmische snelheidsprofiel. Voor een overzicht hiervan zie tabel 4.11.

Evenals in paragraaf 4.1.3.1 blijkt ook hier dat de ruwheids-koefficienten berekend uit Chezy en die uit het snelheidsprofiel slecht overeenkomen. Net als in 4.1.3.1 zullen we daarom verder de koefficienten volgens Chezy aanhouden, omdat immers de andere berekeningswijze gebaseerd is op een benaderd logaritmisch profiel.

4.2.3.2 Orbitaalsnelheden.

OP de in paragraaf 4.1.3.2 beschreven wijze zijn op de verruwde bodem de orbitaalsnelheden gemeten bij stilstaand (=niet stromend) water. Er is gemeten bij 2 waternivo's (overeenkomend met de gemiddelde diepten bij respektievelijk $Q \approx 360$ l/s en $Q \approx 135$ l/s) en 4 golfvelden per waternivo-instelling. In totaal dus 8 proefnummers.

Analooq aan 4.1.3.2 is verondersteld dat $u(z) = u_m = \text{konstant}$ voor $z = 2\text{cm}$ tot $z = 5\text{cm}$. Er is daarom weer een meethoogte van 3cm boven de bodem aangehouden.

De metingen zijn verricht in de raaien D en E (voor de proefnummers 2 ook nog in een raai daar tussen in), in 4 punten per raai, over een

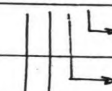
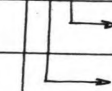
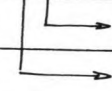
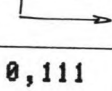
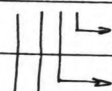
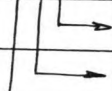
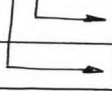
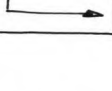
proef nr.	210		220		230		240		310		320		330		340	
	H (m)	Um (m/s)	H (m)	Um (m/s)	H (m)	Um (m/s)	H (m)	Um (m/s)	H (m)	Um (m/s)	H (m)	Um (m/s)	H (m)	Um (m/s)	H (m)	Um (m/s)
periode T	1 sec.		1 sec.		2 sec.		2 sec.		1 sec.		1 sec.		2 sec.		2 sec.	
slaghoek	62 %		62 %		28 %		28 %		62 %		62 %		27 %		27 %	
slaglengte	20 %		34 %		20 %		37 %		20 %		32 %		20 %		33 %	
gem. diepte	0,202 m		0,200 m		0,200 m		0,197 m		0,151 m		0,157 m		0,157 m		0,151 m	
golflengte	1,21 m		1,20 m		2,78 m		2,76 m		1,10 m		1,09 m		2,39 m		2,38 m	
	H (m)	Um (m/s)	H (m)	Um (m/s)	H (m)	Um (m/s)	H (m)	Um (m/s)	H (m)	Um (m/s)	H (m)	Um (m/s)	H (m)	Um (m/s)	H (m)	Um (m/s)
raai D	0,059	0,155	0,111	0,217	0,052	0,182	0,111	0,259	0,051	0,156	0,083	0,202	0,040	0,171	0,083	0,221
raai D/E	0,053	0,148	0,100	0,209	0,046	0,173	0,104	0,258	-	-	-	-	-	-	-	-
raai E	0,055	0,153	0,100	0,212	0,048	0,175	0,103	0,256	0,047	0,151	0,077	0,200	0,049	0,164	0,079	0,220
gemiddeld	0,056	0,152	0,100	0,213	0,049	0,177	0,106	0,258	0,049	0,154	0,080	0,201	0,045	0,168	0,081	0,221

tabel 4.12

met L variërende meetafstand.

Tegelijk met de orbitaalsnelheden zijn ook de golfhoogten bij de desbetreffende instelling van de golfmachine gemeten. Tabel 4.12 geeft een overzicht van de meetresultaten.

Met de gemeten waarden van u_m , gekombineerd met de resultaten uit 4.2.3.1, zijn we nu in staat de faktor u_m/\bar{v} te bepalen (zie tabel 4.13).

proef nr.	\bar{v} (m/s)	u_m (m/s)	u_m/\bar{v}
201	0,217	-	-
210		0,152	0,70
220		0,213	0,98
230		0,177	0,82
240		0,258	1,19
301	0,111	-	-
310		0,154	1,39
320		0,201	1,81
330		0,168	1,51
340		0,221	1,99

tabel 4.13

4.2.4 Snelheidsmetingen met de O.L.D.S.

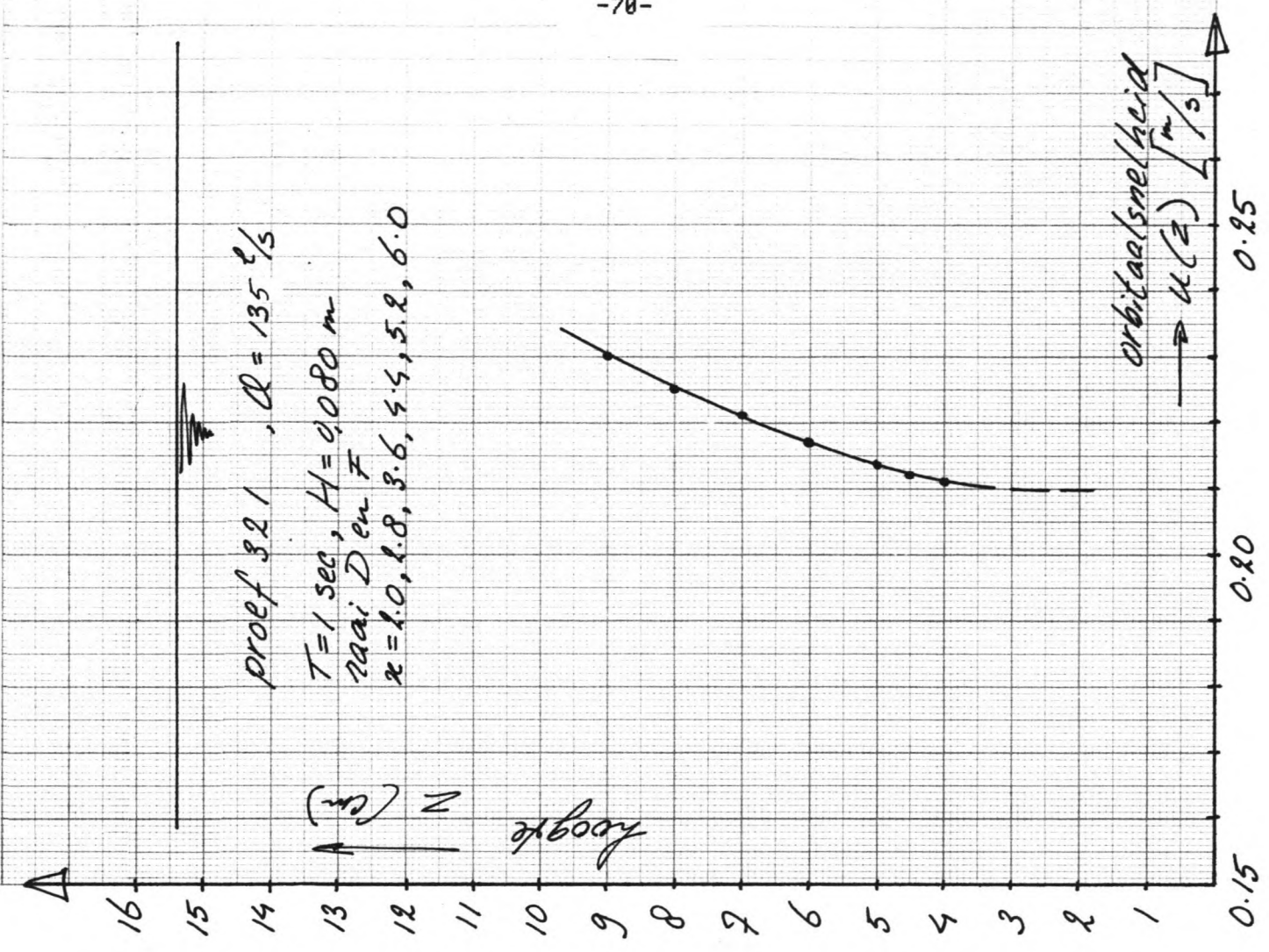
4.2.4.1 Langsstrom- en orbitaalsnelheden in 6 punten per raai.

Met de O.L.D.S. zijn eerst de proeven 321 en 341 herhaald. In tegenstelling tot de metingen in paragraaf 4.2.3, konden met de O.L.D.S. de snelheden $v(z)$ en $u(z)$ tegelijkertijd gemeten worden. Doel van deze herhaling was na te gaan of de in 4.2.3 gedane veronderstelling dat u_m/\bar{v} niet zou veranderen, wanneer u_m en \bar{v} onafhankelijk van elkaar gemeten zouden worden, al dan niet geoorloofd was.

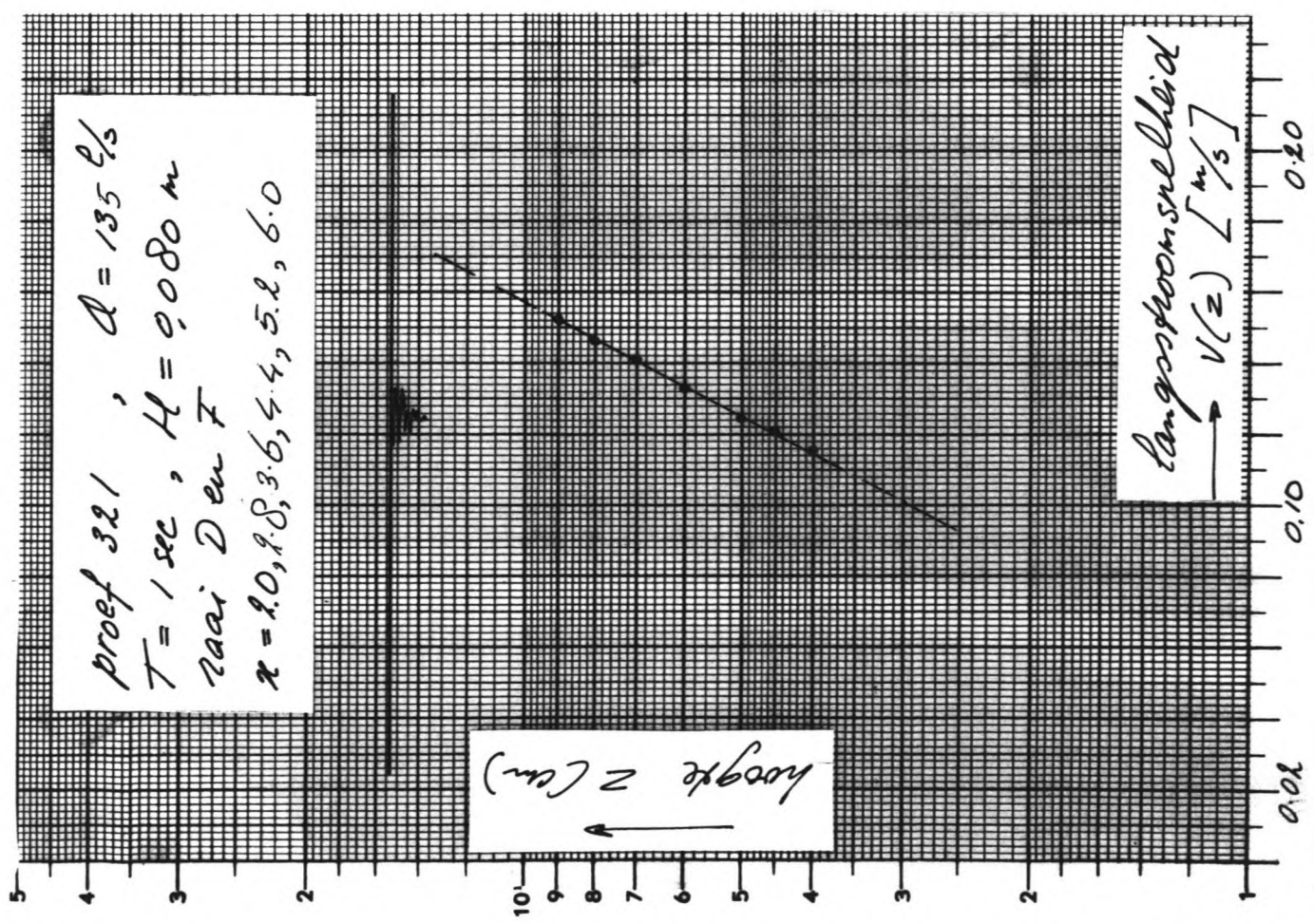
Vervolgens zijn twee nieuwe proeven geïntroduceerd, n.l. proef 421 en proef 441, beide bij een nog lagere instelling van het debiet ($Q \approx 1/8 \cdot Q_{max}$).

Alle proeven zijn uitgevoerd in raai D en F, in de punten $x=2,0$, $x=2,8$, $x=3,6$, $x=4,4$, $x=5,2$ en $x=6,0$. Vanwege de afmetingen van de O.L.D.S. kon slechts gemeten worden van $z=4\text{cm}$ tot ca. $z=9\text{cm}$ boven de bodem. Afb. 4.19 t/m 4.22 tonen de langsstrom- en orbitaalsnelheidsprofielen.

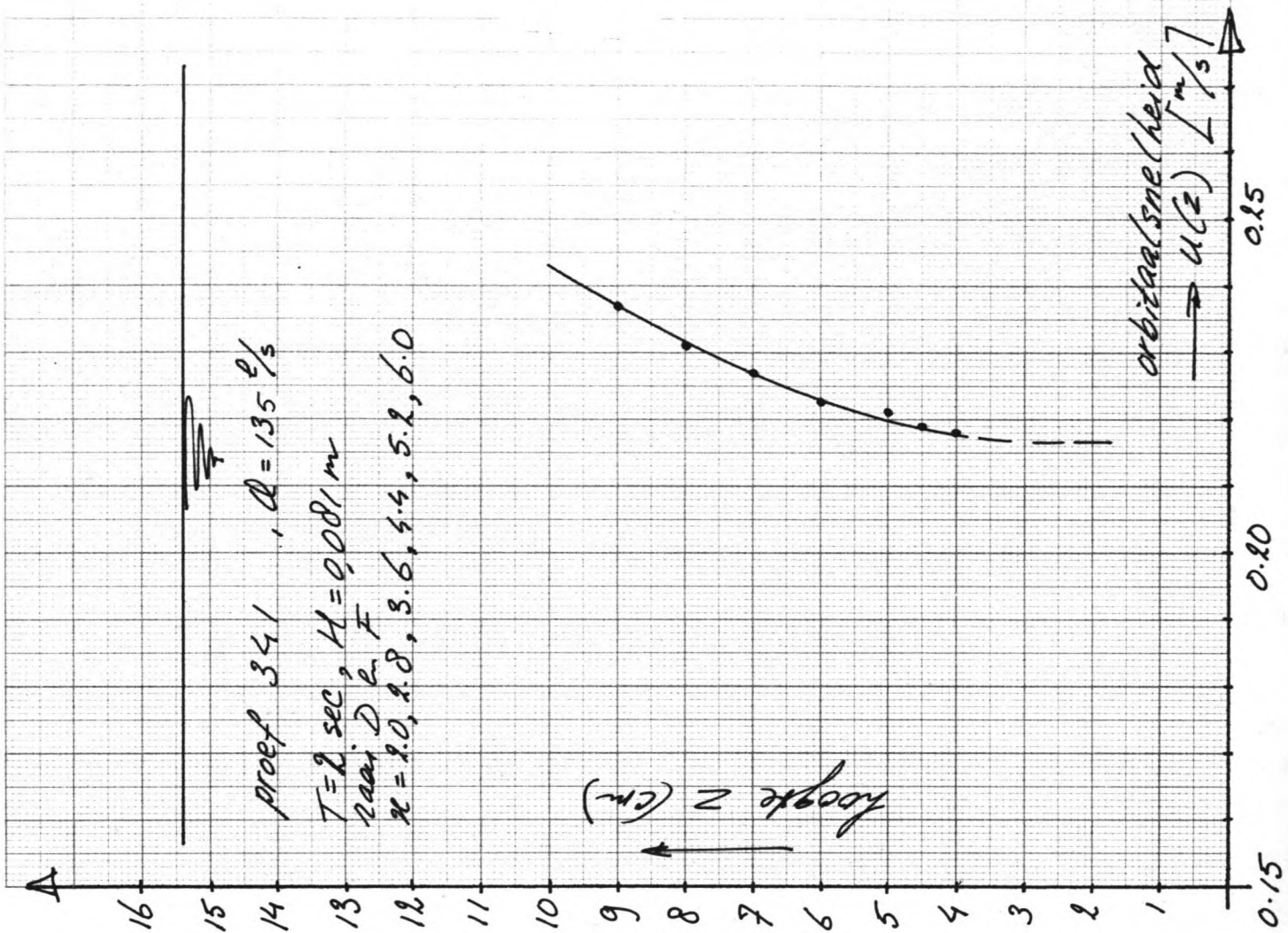
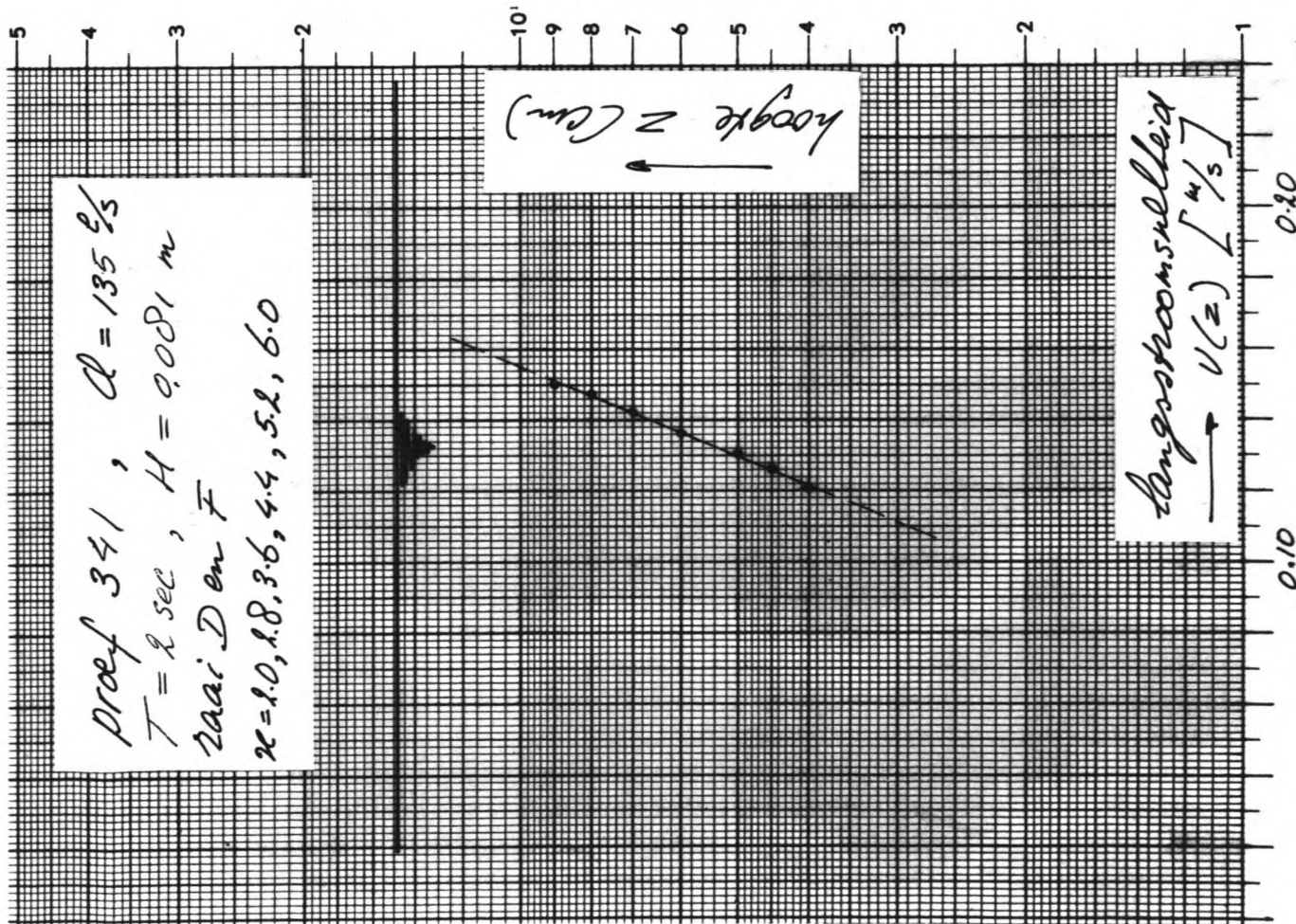
In tabel 4.14 zijn de voor de 4 proefnummers karakteristieke waarden weergegeven. De meetresultaten uit raai D en raai F bleken voor zowel langsstrom- als orbitaalsnelheid nagenoeg overeen te komen. Daarom zijn de resultaten voor beide raaien samengevoegd en gemiddeld tot een representatieve waardenset. De in de tabel vermelde waarden voor



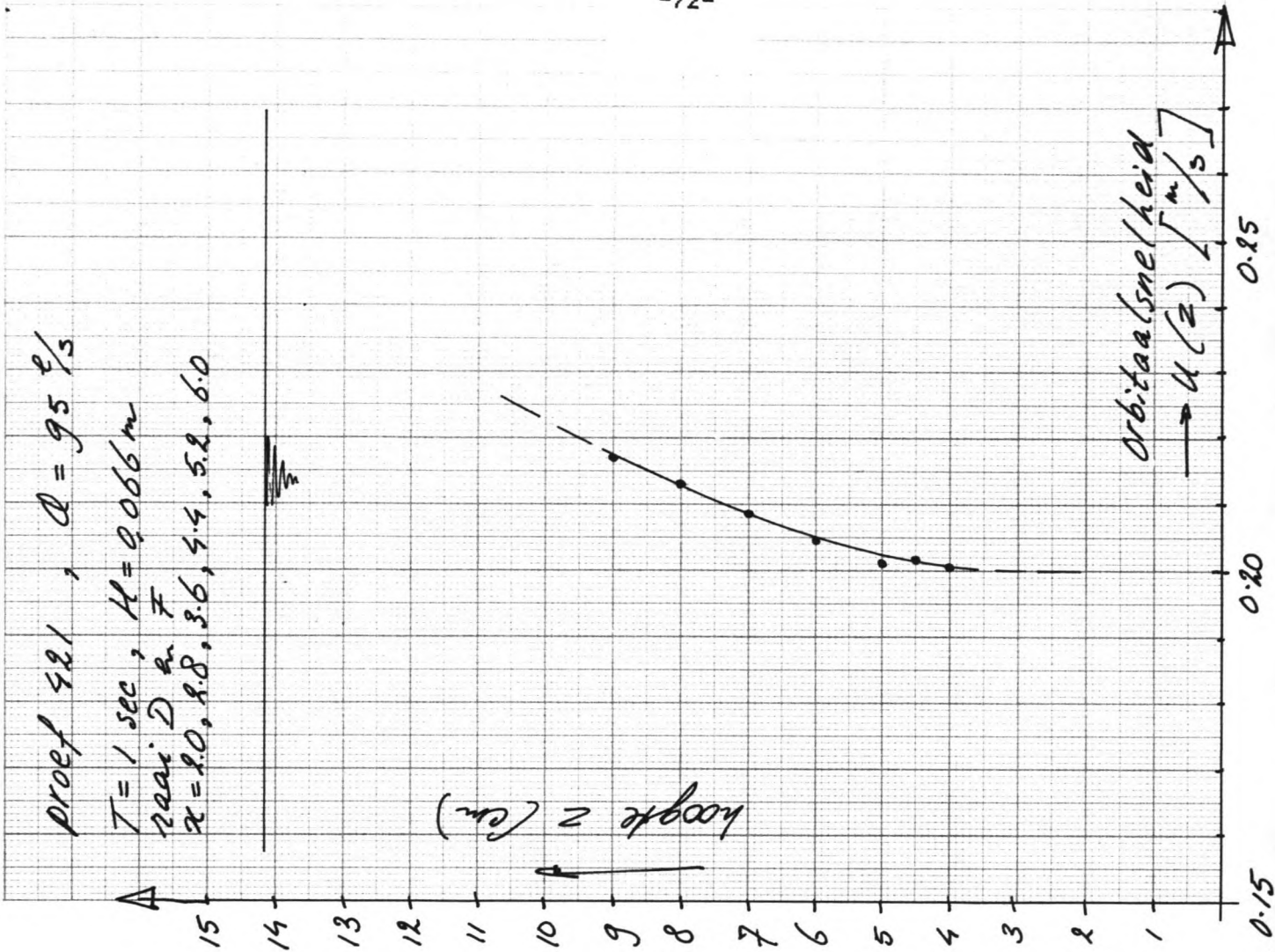
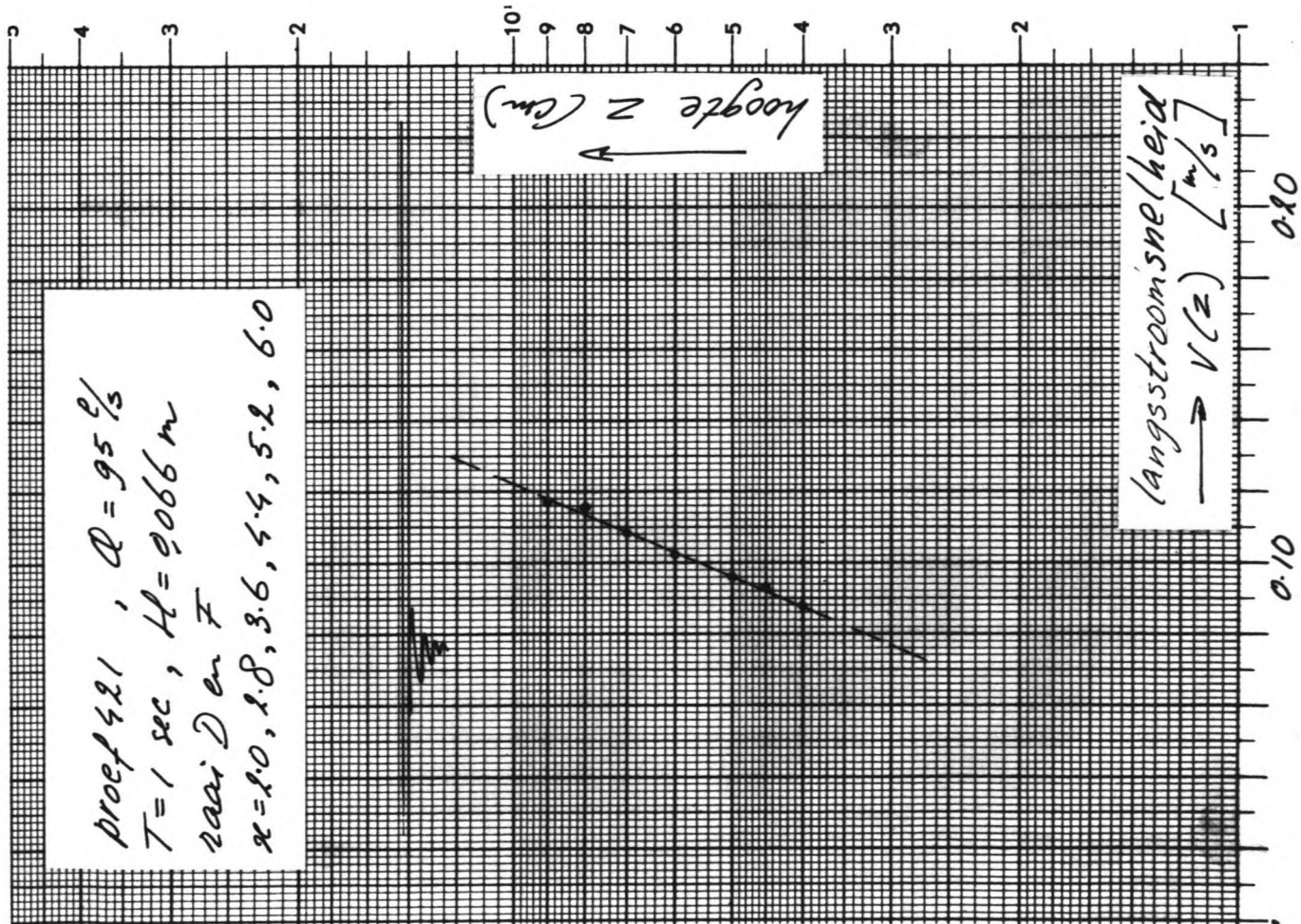
afb. 4.19 : snelheidsprofielen proef 321



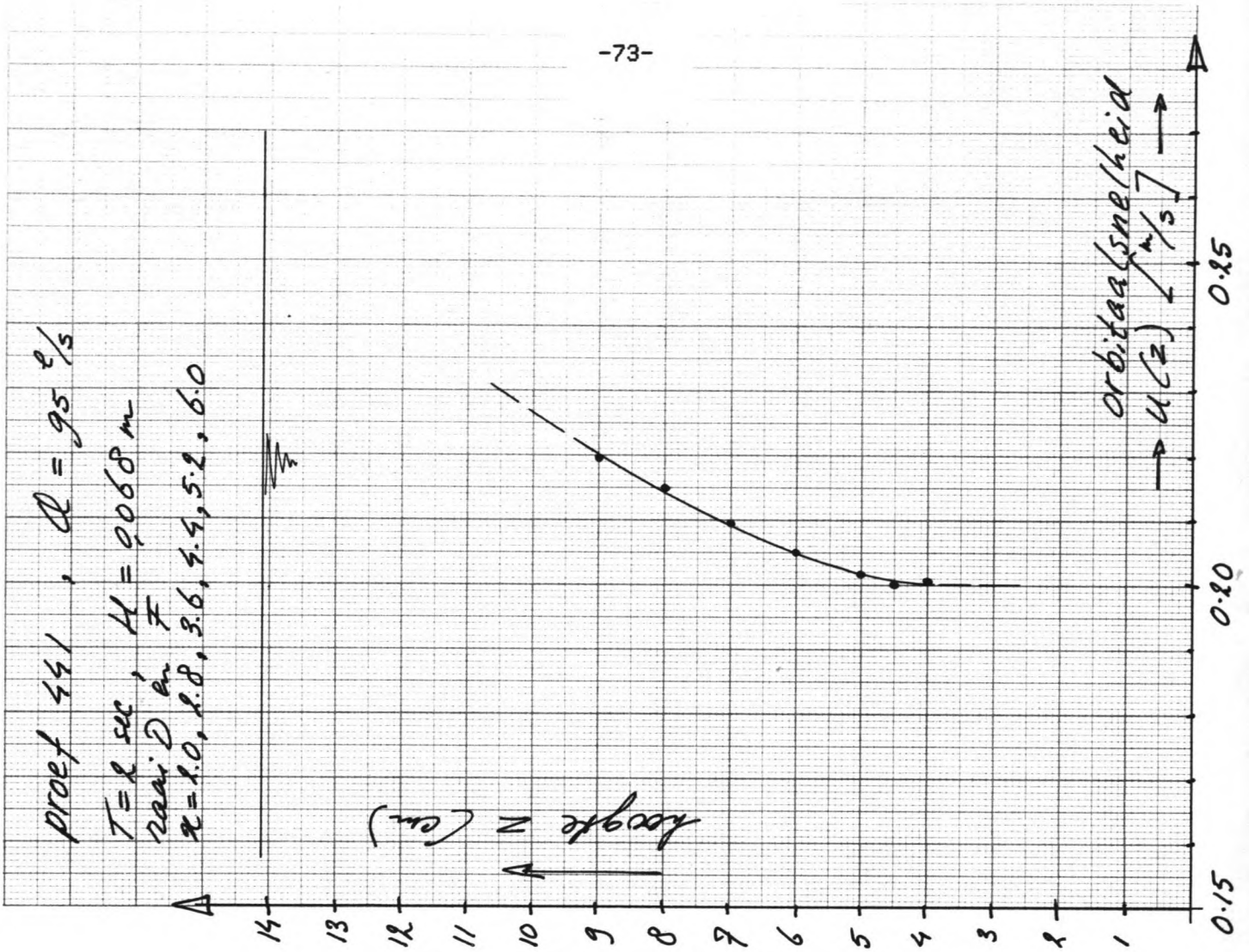
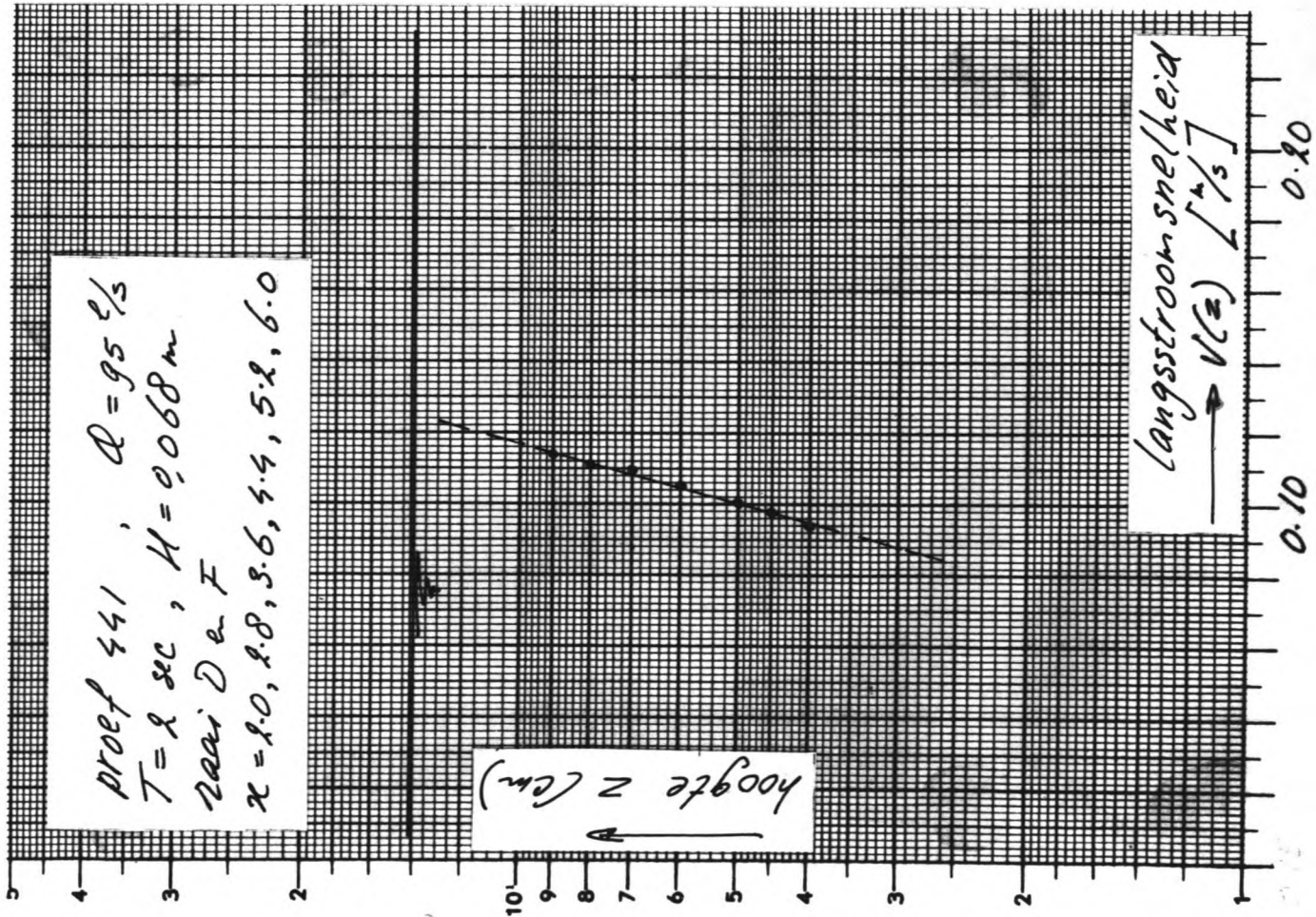
afb. 4.28 : snelheidsprofielen proef 341



afb. 4.21 : snelheidsprofielen proef 421



afb. 4.22 : snelheidsprofielen proef 441



proef nr.	321	341	421	441
Q (l/s)	135	135	95	95
T (s)	1	2	1	2
s.h. (%)	62	27	62	27
s.l. (%)	32	33	31	28
H (m)	0,080	0,081	0,066	0,068
A (l/s)	0,04595	0,03616	0,03729	0,02349
B (m/s)	0,2625	0,2380	0,2079	0,1707
h (m)	0,1536	0,1540	0,1415	0,1411
\bar{v} (m/s)	0,130	0,134	0,098	0,101
U _m (m/s)	0,210	0,217	0,200	0,200
U _m /V	1,62	1,62	2,04	1,98

tabel 4.14

U_m zijn gevonden door aflezing uit de bijbehorende afbeelding.

Een vergelijking van tabel 4.14 met tabel 4.13, voor proevenserie 3, leert dat de orbitaalsnelheden een redelijke mate van overeenstemming vertonen (2 tot 4,5% verschil), maar dat de langstroomsnelheden behoorlijk verschillen (19%!)). Dit grote verschil kan alleen verklaard worden doordat onder invloed van de golfbeweging er minder water over het talud stroomt.

Er zal getracht worden dit na te gaan door een berekening van het debiet. In paragraaf 4.2.3.1 vonden we een debiet van ca. 135 l/s. We zullen er van uitgaan dat dit debiet ook bij de O.L.D.S.-metingen aanwezig geweest is ($\pm 3\%$). Wanneer we nu de gemiddelde snelheid op het talud gelijkstellen aan $\alpha \cdot \bar{v}$, dan geldt voor het debiet Q:

$$Q = 6,5 \cdot h \cdot \bar{v} + 25/2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot \bar{v} = 135 \text{ l/s} \quad 4.11$$

Met h en v behorend bij proef 321 en 341 vinden we nu dat $\alpha = 1/7$, respektievelijk $\alpha = 1/46$! (bij een 3% hoger debiet wordt deze laatste waarde $\alpha = 1/8$). Erg eenduidig is deze berekeningswijze dus niet. Er blijkt echter wel uit dat er nauwelijks nog water over het talud stroomt, nl. slechts 1 tot 5% (=orde van grootte onnauwkeurigheid debietinstelling!).

Wanneer we voor proevenserie 4 een gemiddelde snelheid op het talud aanhouden van $1/8 \cdot v$, dan vinden we voor het debiet: $Q \approx 93$ l/s (proef 421) en $Q \approx 96$ l/s (proef 441), gemiddeld dus ca. 95 l/s.

Al met al kan gekonkludeerd worden, dat de veronderstelling dat de snelheden v en U_m niet noemenswaardig veranderen wanneer ze onafhankelijk van elkaar gemeten worden, hier blijkbaar niet terecht geweest is. De verruwing van de bodem heeft tot gevolg gehad dat de stroming over het talud praktisch tot stilstand is gekomen, waardoor de stroming (en dus ook \bar{v}) op het konstant diepte gedeelte is toegenomen. Bij de berekening van de bodemwrijving zal dus de in

hoofdstuk 3.1 besproken weging van icw/ic met $hcw/hc \cdot (\sqrt{c}/\sqrt{cm})^2$ moeten worden toegepast.

4.2.4.2 Nauwkeurige profielmetingen

Alvorens in paragraaf 4.2.5 zal worden overgegaan tot het berekenen van de bodemwrijving zal, naar aanleiding van de bevindingen in de vorige paragraaf, getracht worden na te gaan hoezeer de langsstroming wordt beïnvloed door de golfbeweging, en visa versa. Daartoe zijn nauwkeurige snelheidsprofielen gemeten (zowel langsstroom- als orbitaalsnelheid) bij de instellingen alleen stroming, stroming plus golven en alleen golven. Voor deze metingen is gebruik gemaakt van de in de bodem aangebrachte meetputjes, zodat tot op 1 mm boven de bodem gemeten kon worden.

De metingen zijn verricht in 2 punten in raai F ($x=3,0$ en $x=5,0$) en ca. 15 hoogten per punt. Een meting bestond uit 2 tot 4 keer gedurende 100 seconden registreren van het langsstroom- en/of orbitaalsnelheidssignaal op de integrator of de schrijver. Op deze wijze zijn de volgende proefnummers doorgemeten:

201, 210 en 211 ($Q \approx 360$ l/s, $T=1s$ en $H=0,056m$)

201, 240 en 241 ($Q \approx 360$ l/s, $T=2s$ en $H=0,106m$)

301, 320 en 321 ($Q \approx 135$ l/s, $T=1s$ en $H=0,080m$)

401, 440 en 441 ($Q \approx 95$ l/s, $T=2s$ en $H=0,068m$)

De resultaten worden getoond in afb. 4.23 t/m 4.26.

De langsstroomsnelheden in deze afbeeldingen geven de gemiddelde waarden voor $x=3,0$ en $x=5,0$. Van de orbitaalsnelheden worden steeds de profielen in beide punten gegeven, omdat ze door de invloed van de tweede harmonische (stoor-) golven te ver uiteen blijken te liggen om ze te kunnen middelen. Bovendien zijn in de situatie "alleen golven", wegens tijdgebrek slechts metingen verricht in een punt.

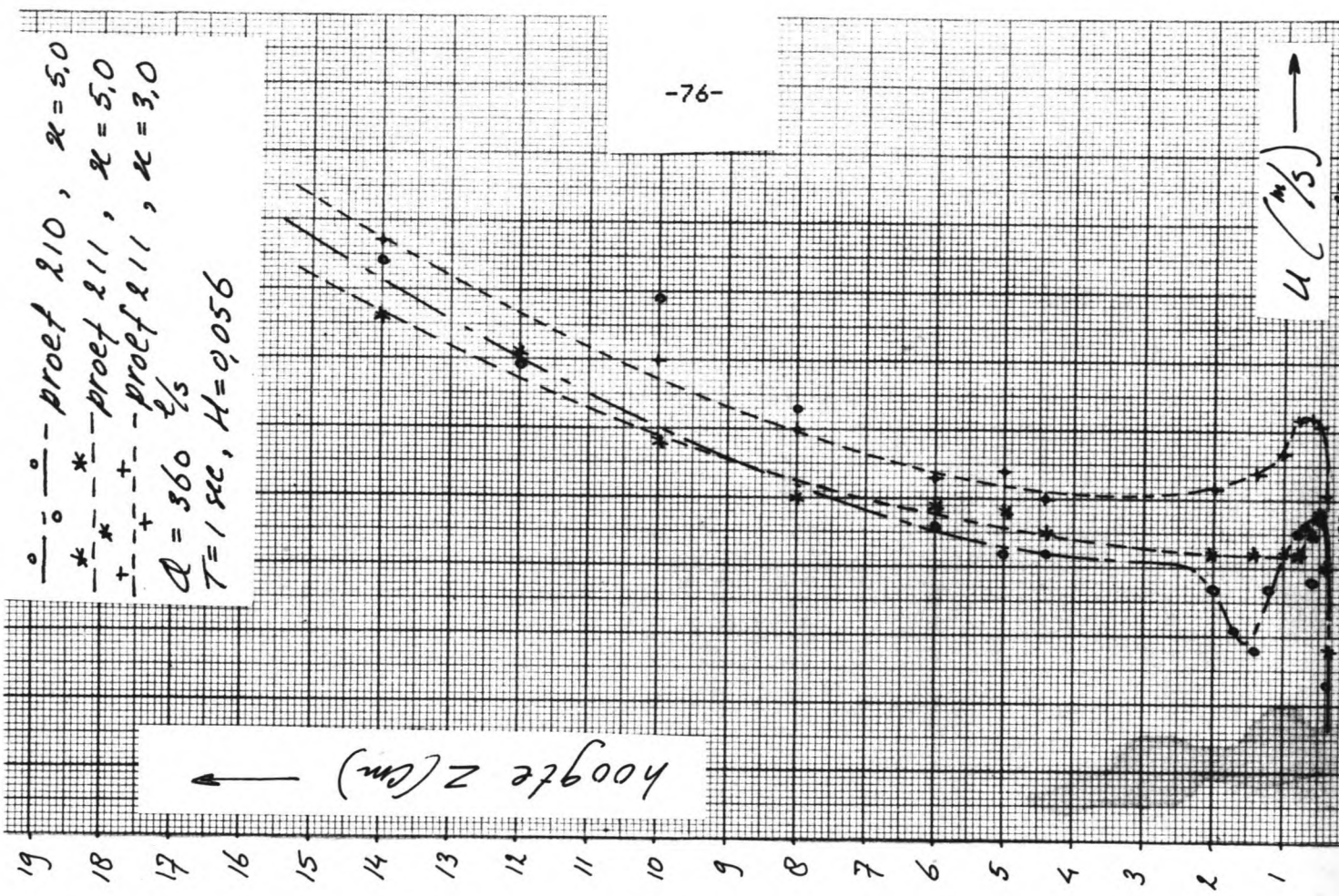
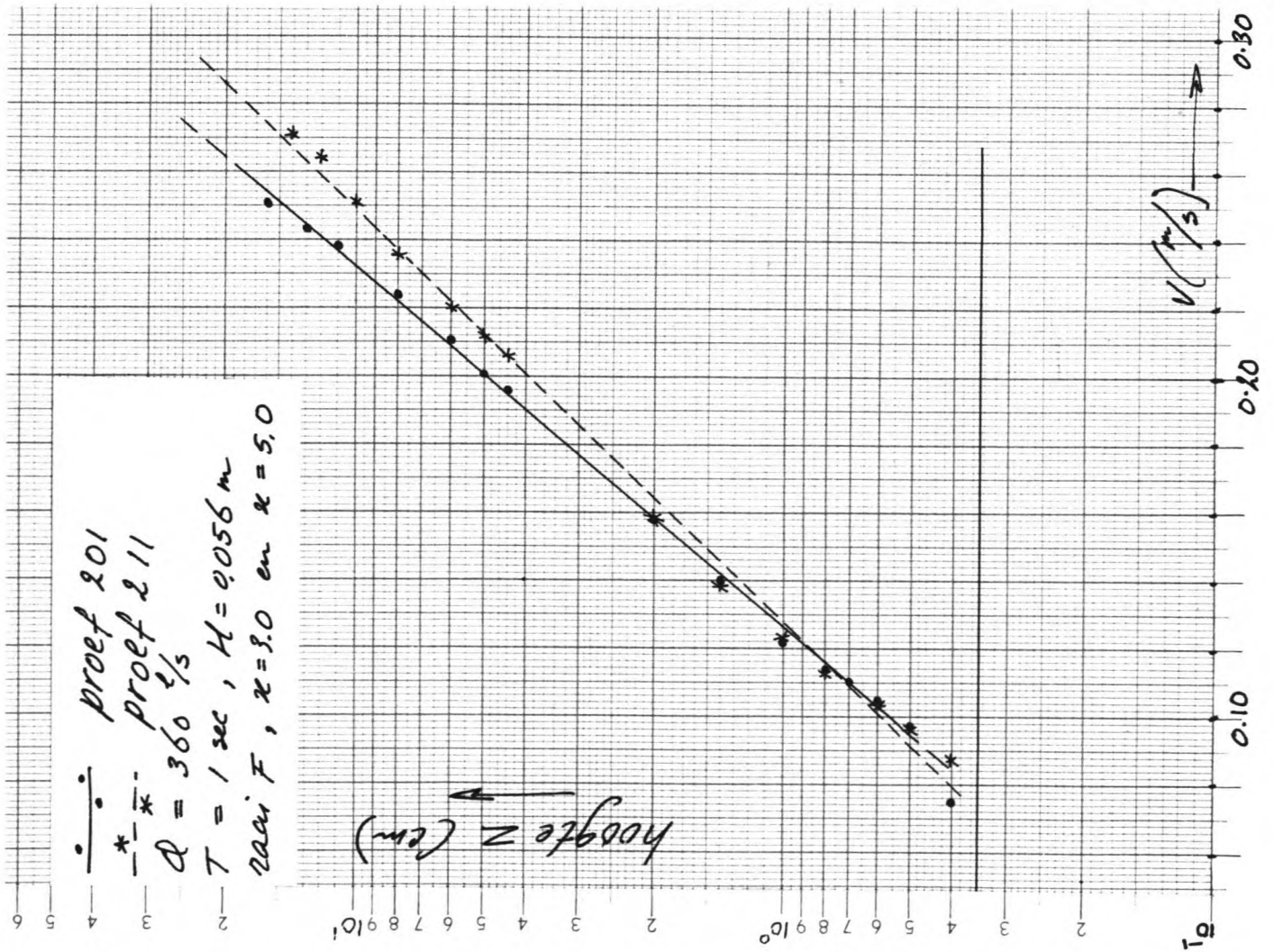
De hoogten waarop de meetpunten in de figuur zijn uitgezet, zijn gerelateerd ten opzichte van het oorspronkelijke beton oppervlak. De perspexplaatjes waarmee de meetputjes zijn afgedekt, liggen ca. 0,5cm boven het beton oppervlak (zie afb. 4.27).

In tabel 4.15 zijn de karakteristieke waarden voor de uitgevoerde proeven verzameld.

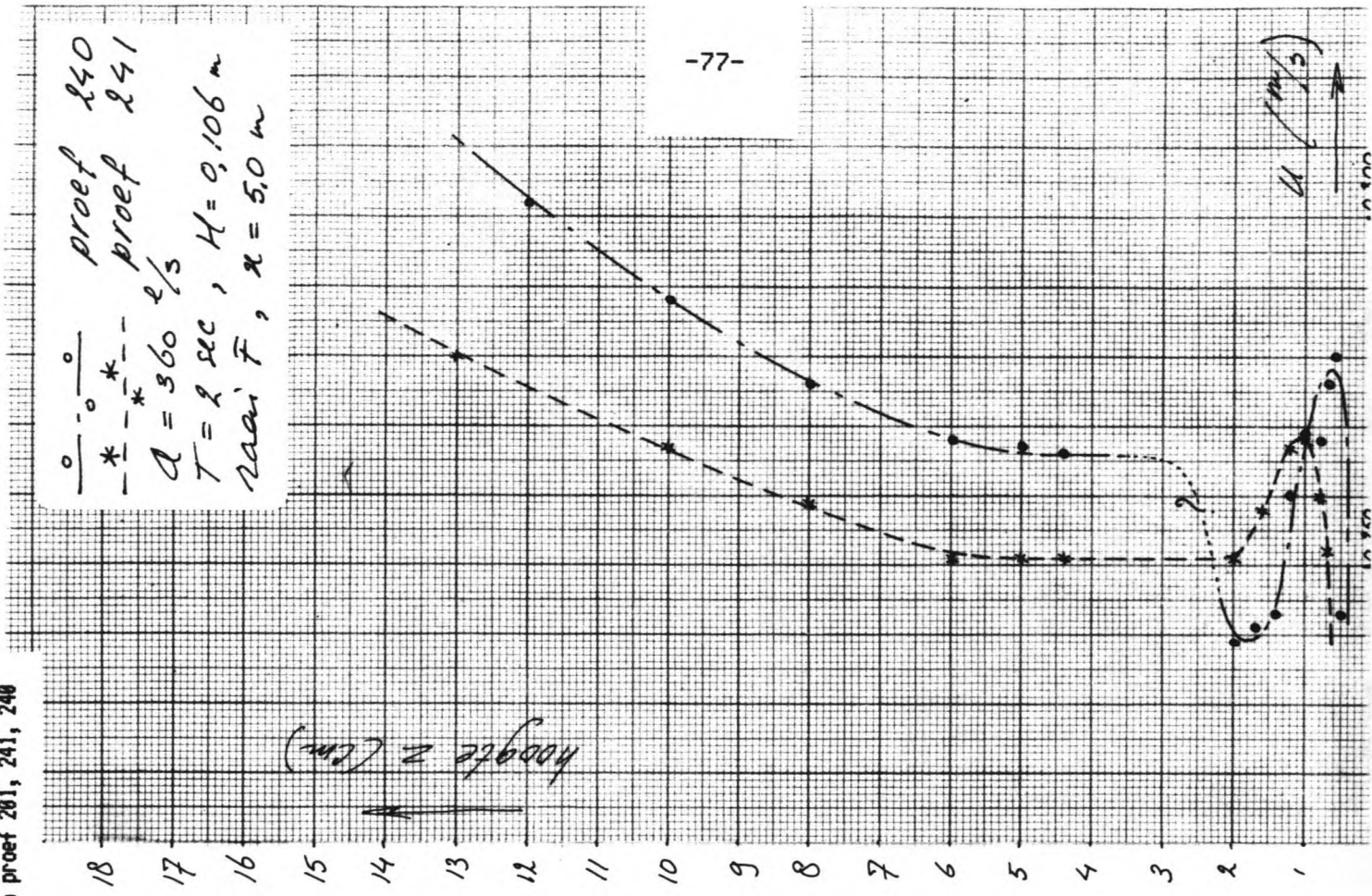
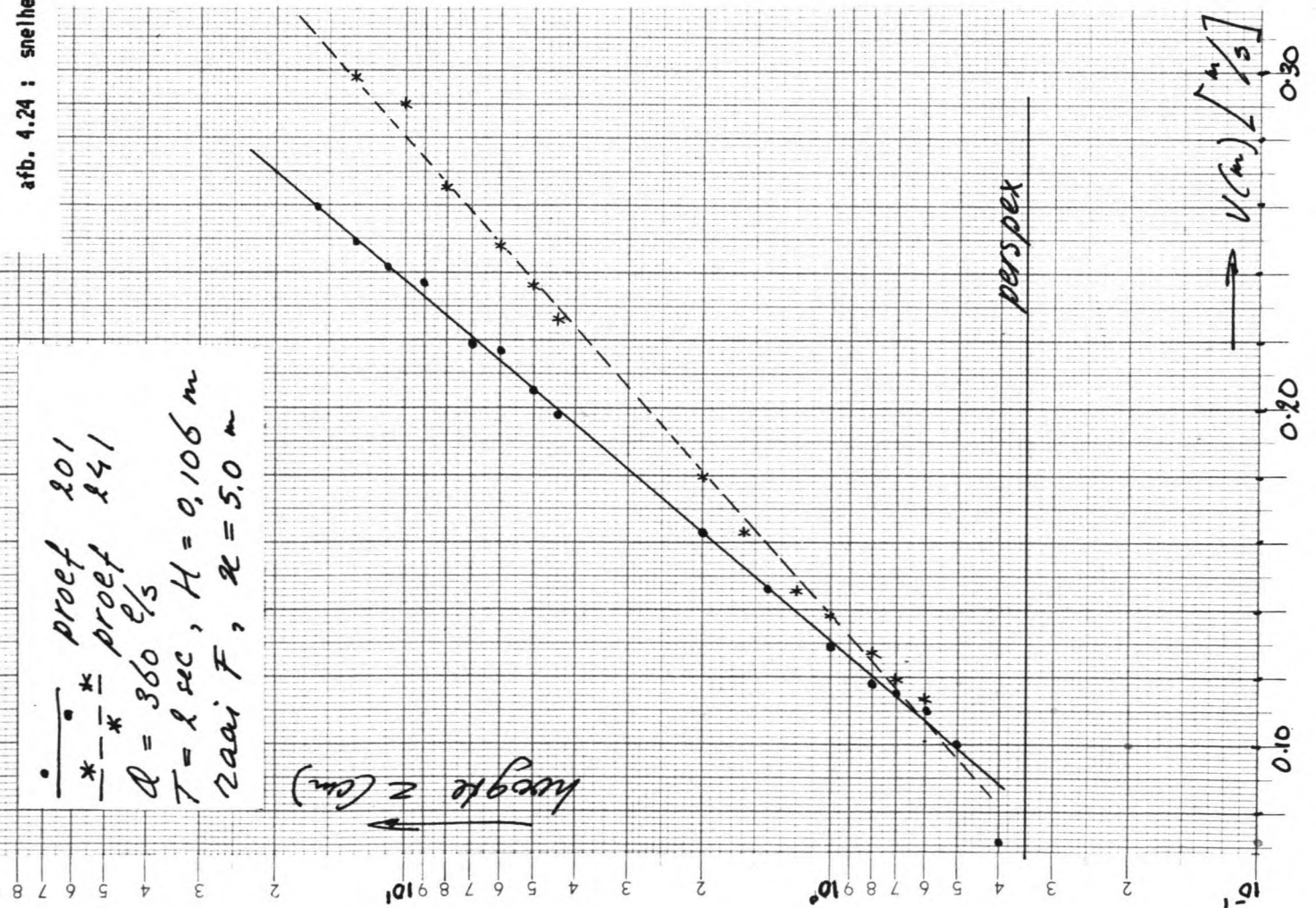
Welke konklusies kunnen er nu uit deze metingen getrokken worden?

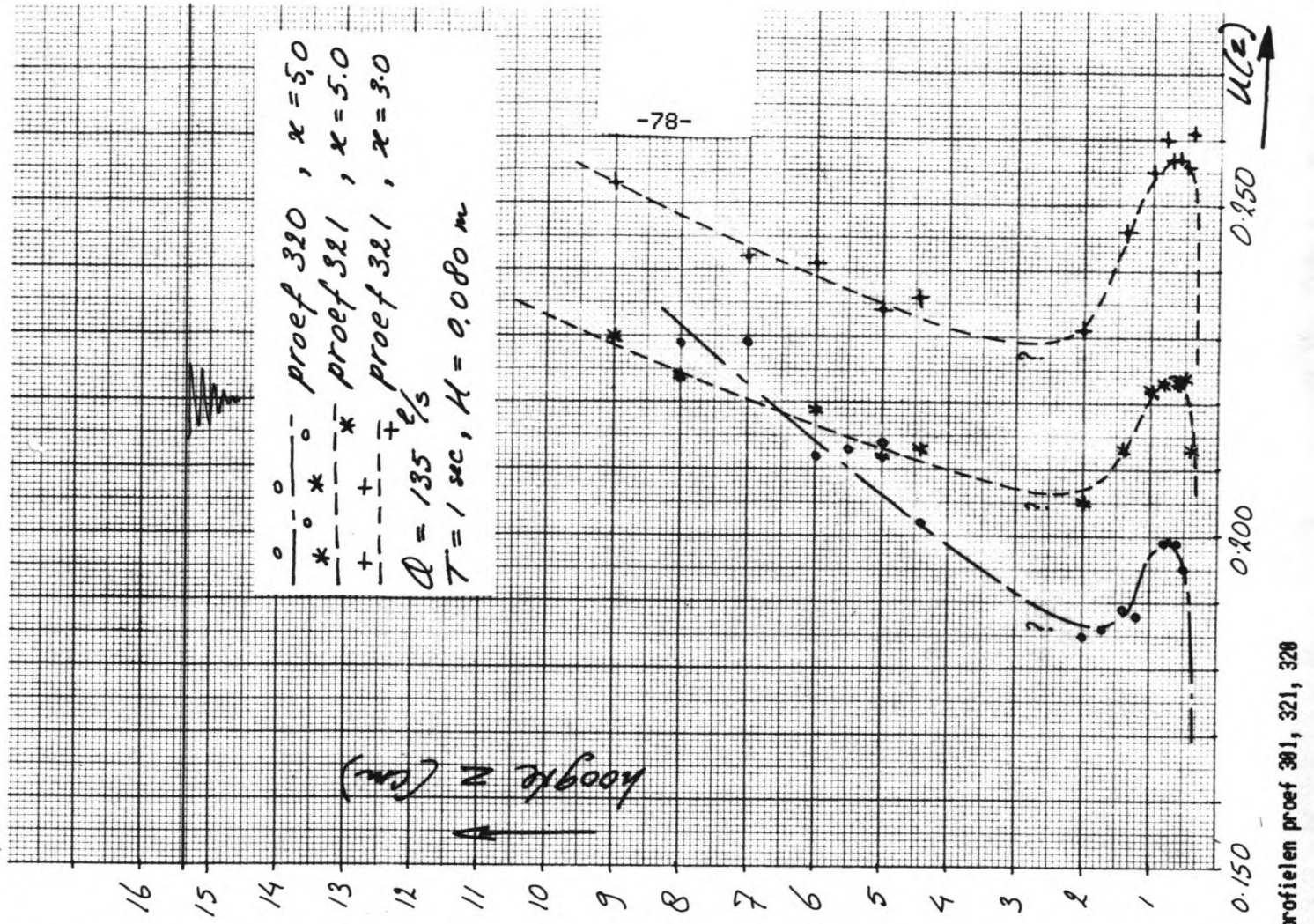
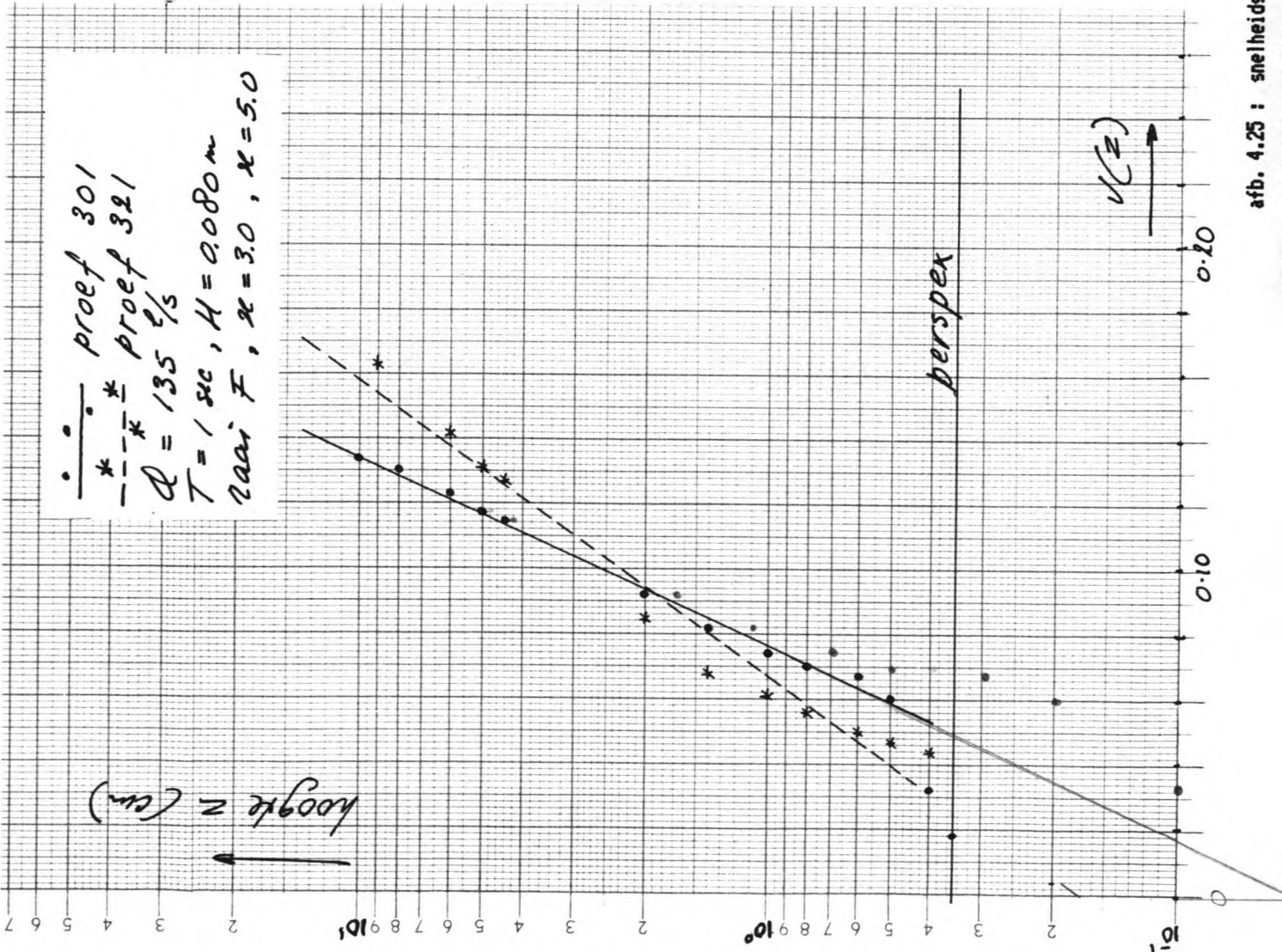
- 1) Onder invloed van de golfbeweging stroomt er minder water over het talud, waardoor de gemiddelde snelheid op het konstant diepte gedeelte hoger komt te liggen. Een (voorzichtige) tendens lijkt te zijn, dat hoe groter de verhouding H/h , des te hoger de procentuele toename van de snelheid wordt.
- 2) Uit de metingen van $v(z)$ bij stroming plus golven, blijkt de karakteristieke "knik" in het snelheidsprofiel, als behandeld in hoofdstuk 2.3.
- 3) Het orbitaalsnelheidsprofiel aan de bodem wijkt af van het door de kortegolftheorie voorspelde profiel. De vorm van deze afwijking komt globaal overeen met de in hoofdstuk 2 behandelde theorie betreffende orbitaalsnelheden in de grenslaag. Helemaal eenduidig zijn de meetresultaten echter niet; Ze blijken namelijk op verschillende manieren te interpreteren te zijn. Afb. 4.28 geeft hiervan 3 voorbeelden. Het eerste (4.28a) komt goed overeen met de theorie van Bakker (h.s. 2.2), het derde (afb. 4.28c) echter slechts gedeeltelijk. Afb. 4.28b lijkt een soort tussenvorm te zijn, maar is waarschijnlijk meer het gevolg van gebrekkige metingen.

afb. 4.23 : snelheidsprofielen proef 201, 211, 210

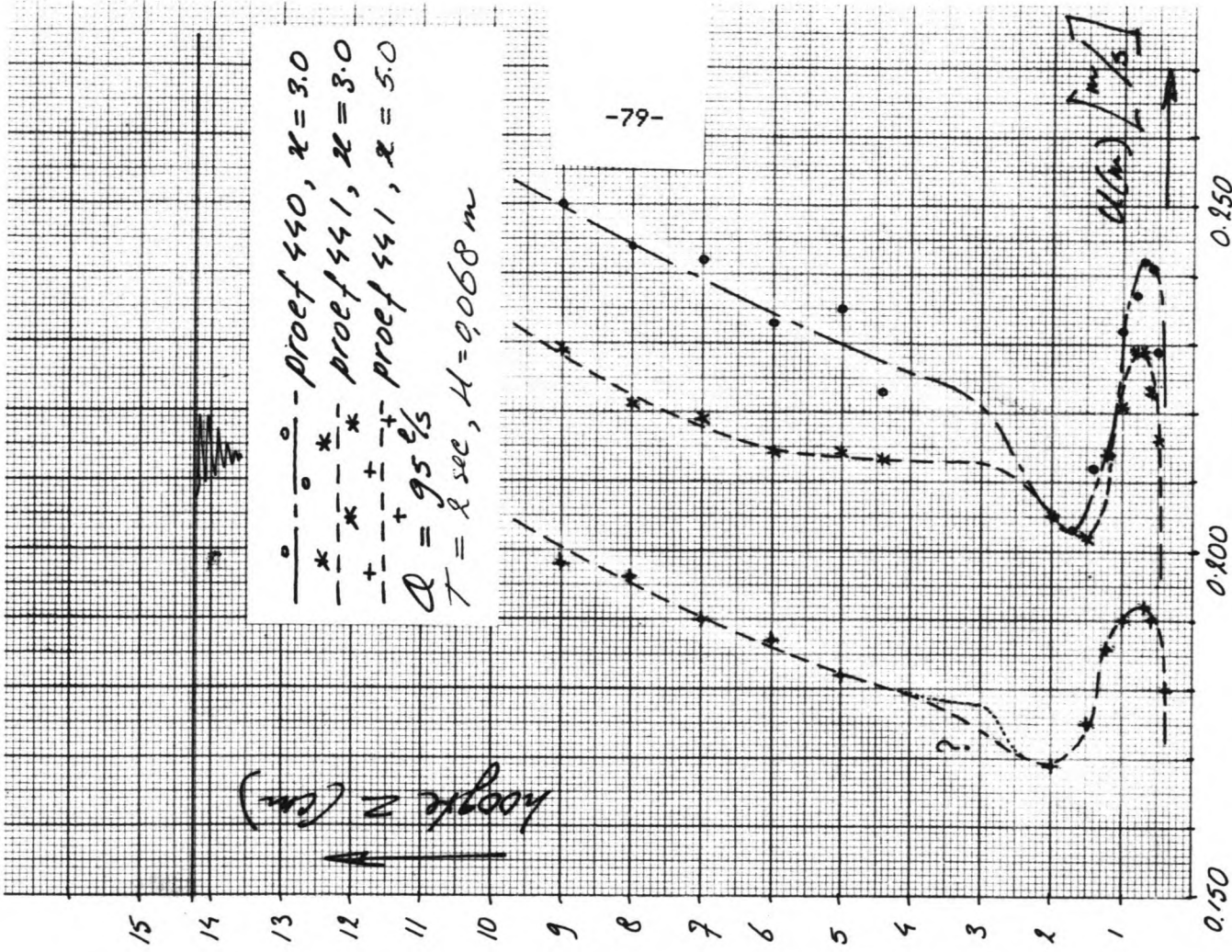
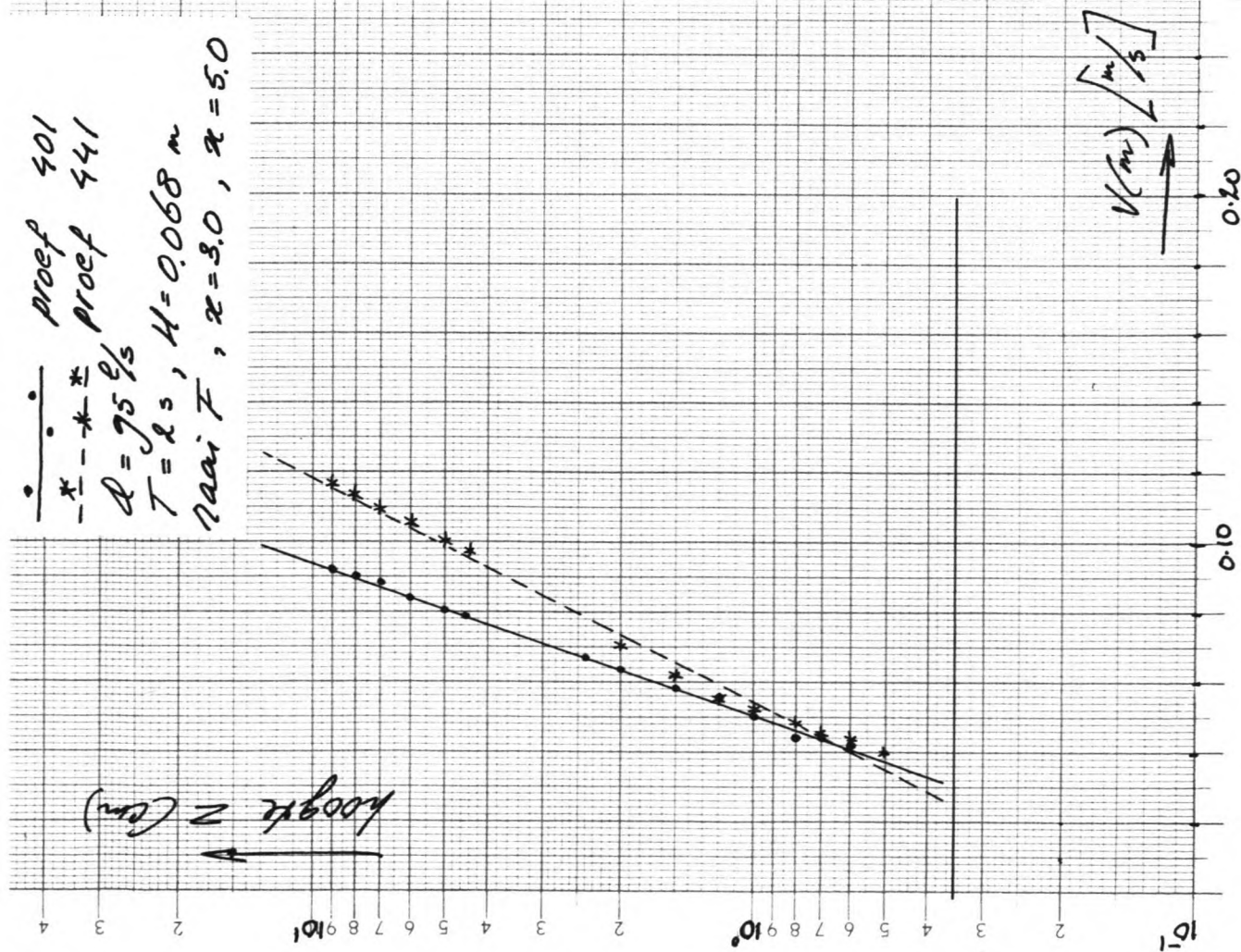


afb. 4.24 : snelheidsprofielen proef 201, 241, 240

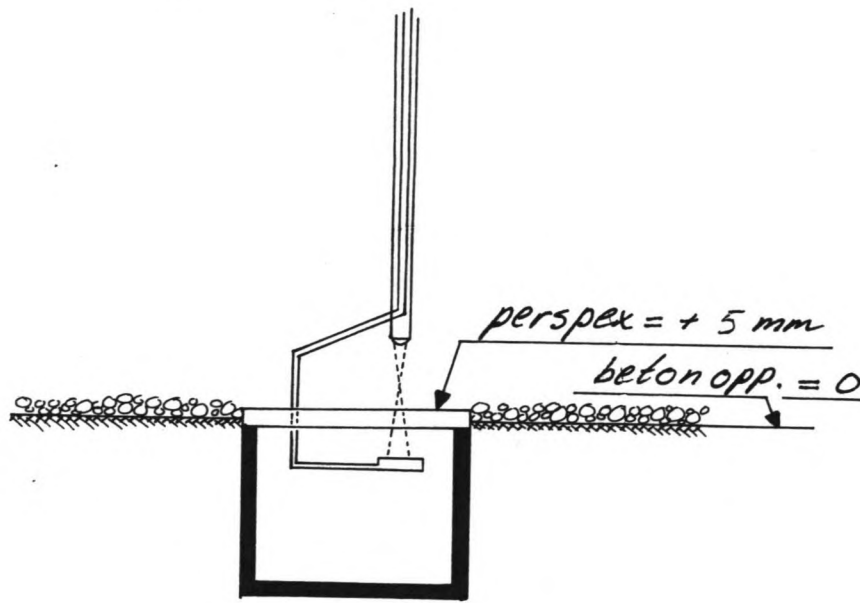




afb. 4.25 : snelheidsprofielen proef 301, 321, 328



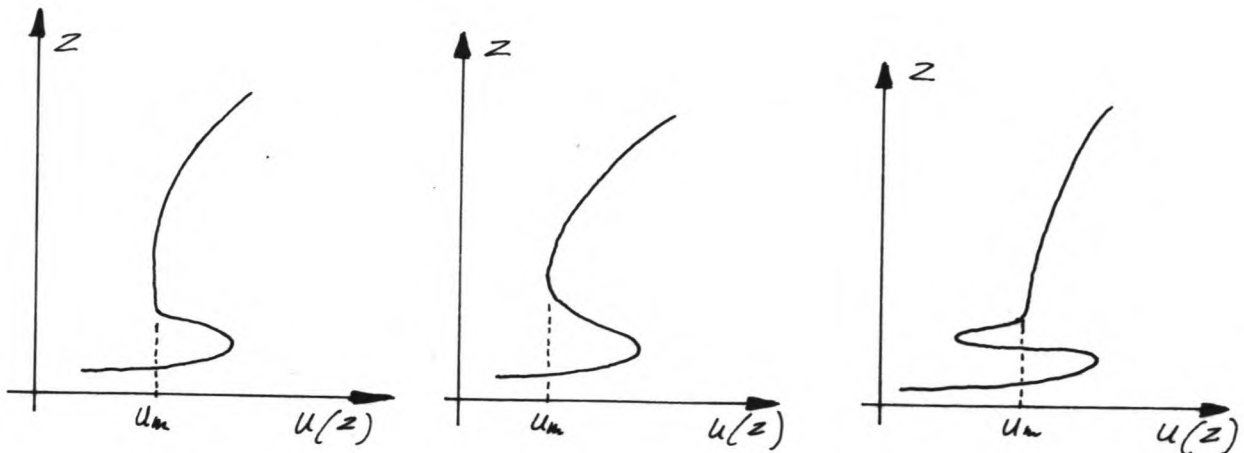
afb. 4.26 : snelheidsprofielen proef 401, 441, 440



afb. 4.27 : O.L.D.S. metingen m.b.v. meetputjes

proef nr.	x koord.	Q (l/s)	T (s)	H (m)	h (m)	H/h (%)	A (m/s)	B (m/s)	\bar{U} (m/s)	$\Delta \bar{U}$ (%)	U _m (m/s)	ΔU_m (%)
201	3,0 &5,0	360	-	-	0,2030	-	0,0460	0,3379	0,219 (0,224)	-	-	-
211	5,0	360	1	0,056	0,2022	28 %	0,05277	0,3707	0,234	+7 %	0,152	+1 %
210	5,0	-	1	0,056	0,2036	28 %	-	-	-	-	0,151	-
241	5,0	360	2	0,106	0,2003	53 %	0,06173	0,4229	0,262	+17 %	0,251	-7 %
240	5,0	-	2	0,106	0,1989	53 %	-	-	-	-	0,266	-
301	3,0 &5,0	135	-	-	0,1545	-	0,02529	0,1927	0,120	-	-	-
321	5,0	135	1	0,080	0,1536	52 %	0,03941	0,1491	0,136	+13 %	0,210	+11 %
320	5,0	-	1	0,080	0,1516	53 %	-	-	-	-	0,190	-
401	3,0 &5,0	95	-	-	0,1425	-	0,01883	0,1373	0,082	-	-	-
441	3,0	95	2	0,068	0,1411	48 %	0,02798	0,1834	0,101	+23 %	0,213	-3 %
440	3,0	-	2	0,068	0,1415	48 %	-	-	-	-	0,220	-

tabel 4.15



afb. 4.28 : interpretatie orbitaalsnelheids-profielmetingen

Hiermee zijn we aangeland bij de tekortkomingen van deze profielmetingen. In de eerste plaats zijn veel te weinig profielen gemeten om door middeling van meetresultaten een wat grotere nauwkeurigheid te bewerkstelligen. In de tweede plaats blijkt dat het niet kunnen meten tussen $z=2$ en $z=4,4$ (zie beschrijving profielmetingen in paragraaf 3.3.2) een "gat" in de snelheidsverdeling oplevert, juist waar het profiel "a la Bakker" overgaat in dat volgens de lineaire golftheorie. De bruikbaarheid van de metingen van de orbitaalsnelheden is derhalve niet zo heel erg groot.

- 4) Hoewel de orbitaalsnelheids-metingen dus niet erg betrouwbaar zijn, lijkt het snelheidsprofiel niet te veranderen, wanneer de golfbeweging wordt gekombineerd met een langsstroming. Ook de snelheid u_m volgens de lineaire korte golftheorie lijkt niet te veranderen.

Wat wordt er verder met de in deze paragraaf behandelde metingen gedaan?

In de volgende paragraaf (4.2.5) zal er worden gerekend aan de bodemwrijving onder stroming en golven. Een gedeelte van de daartoe gebruikte meetresultaten is echter verkregen met behulp van de mikromolen. Dit houdt in dat langsstroomsnelheden en orbitaalsnelheden onafhankelijk van elkaar, onder gescheiden stroomcondities gemeten zijn. Voor de orbitaalsnelheden hebben we gezien dat dit geoorloofd is. Voor de langsstroomsnelheden echter, blijkt dit niet geoorloofd; De gemiddelde snelheid onder stroming plus golven is groter dan die onder alleen stroming, als gevolg van verminderde stroming over het talud. Voor de proefnummers waarbij niet met de O.L.D.S. snelheden onder stroming plus golven gemeten zijn, moeten de MM-metingen dus gekorrigeerd worden. Een indicatie voor de orde van grootte van deze correctie kunnen we halen uit de profielmetingen in deze paragraaf.

Met name de metingen van $v(z)$ hebben dus wel degelijk hun nut gehad. De resultaten van deze metingen zijn ook nauwkeurig genoeg om in de volgende paragraaf te worden meegenomen in de bodemwrijvingsberekeningen. Dit kan niet direkt gezegd worden van de orbitaalsnelheidsmetingen. De praktische bruikbaarheid van de profielmetingen op zich, is dan ook niet erg groot. Dit is onder andere te wijten aan het feit dat te weinig metingen zijn verricht. Het uitvoeren van dergelijke metingen is echter zeer tijdrovend; tijd die helaas niet beschikbaar was. Aan de andere kant, betreft het hier metingen die vrij uniek te noemen zijn. Immers, nog niet eerder zijn

in een golfbassin van deze afmetingen orbitaal- en langs-stroomsnelheden tegelijkertijd, en zo dicht bij de bodem gemeten. Dergelijke metingen vormen een studie-onderwerp op zichzelf, en voerden in het kader van dit onderzoek wellicht ook iets te ver.

4.2.5 Bodemwrijving.

In deze paragraaf worden alle hiervoor behandelde meetresultaten gebundeld in een berekening van de bodemwrijving. In vergelijking met paragraaf 4.1.5, bodemwrijving op de gladde beton bodem is er echter een belangrijk verschil; De gemiddelde snelheden op het konstant-diepte gedeelte zijn bij stroming plus golven niet gelijk aan die bij alleen stroming. Dit heeft twee belangrijke consequenties:

1) De verhangmetingen moeten gecorrigeerd worden met een faktor $hcw/hc \cdot (\bar{v}_c/\bar{v}_{cw})^2$.

2) Beide snelheden, v_c en v_{cw} moeten bekend zijn.

Dit laatste houdt in dat met name v_{cw} gehaald zal moeten worden uit metingen met de O.L.D.S. Voor zover die metingen niet zijn verricht, moeten de beschikbare mikromolen-metingen ($=\bar{v}_c$) worden gecorrigeerd. In tabel 4.16 zijn alle meetresultaten op een rij gezet, en zijn ook de factoren f_b , f_s , $f(\xi=1)$ en $\tau_{cw}/\tau_c (=icw/ic\text{-gewogen})$ bepaald. In deze tabellen is tevens te zien welke korrektiefactoren zijn gehanteerd.

In sommige gevallen zijn in de tabellen waarden vermeld, afkomstig van de profielmetingen uit paragraaf 4.2.4.2. Die gevallen zijn in kolom 3 aangegeven met "OLDS p".

In de laatste kolom bij meetserie 3., zijn steeds twee waarden gegeven. De tussen haakjes geplaatste waarden betreffen de berekeningsresultaten met $\bar{v}_c=0,120$ m/s in plaats van $\bar{v}_c=0,111$ m/s (proef 301, respectievelijk O.L.D.S. en MM). Hieruit blijkt dat een snelheidsverschil wat waarschijnlijk is ontstaan door de onnauwkeurigheid in de debietinstelling toch doorwerkt in de berekening van (icw/ic) gew.

Voor een totaal overzicht van alle metingen (dus ook de metingen op de gladde beton bodem) verwijzen we naar de tabel in de bijlage.

proef nr.	θ (1/s)	MM/OLDS	T (s)	H (m)	h (m)	corr. faktor MM	\bar{U} (m/s)	U_m (m/s)	i (10 ⁻⁵)	C (10 ⁻⁹)	(10 ⁻⁹ am)	ξ_b	ξ_s	U_m/\bar{U}	fb	fs	f $\xi=1$	icw/ic	(icw/ic) gew.
201	360	MM OLDS ^P	-	-	0,2030	-	0,217 0,219	-	20,6	8,7	33	-	-	-	-	-	-	-	-
210	-	MM OLDS ^P	1	0,056	0,202 0,204	-	-	0,152 0,151	-	9	33	-	?	-	-	-	-	-	-
211	360	MM OLDS	1	0,056	0,2022	7 %	0,234 0,234	0,152 0,152	21,8	9	33	1,7	6,0	0,65	1,24	2,81	1,09	1,06	0,86
220	-	MM	1	0,100	0,200	-	-	0,213	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
221	360	MM	1	0,100	0,2004	17 %	0,254	0,213	21,0	9	33	1,7	5,0	0,84	1,37	3,01	1,15	1,02	0,73
230	-	MM	2	0,049	0,200	-	-	0,177	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
231	360	MM	2	0,049	0,2015	7 %	0,232	0,177	20,6	9	33	1,7	3,9	0,76	1,31	2,26	1,13	1,00	0,87
240	-	MM OLDS ^P	2	0,106	0,197 0,199	-	-	0,258 0,266	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
241	360	MM OLDS ^P	2	0,106	0,2003	17 %	0,262 0,262	0,258 0,251	21,7	9	33	1,7	3,3	0,98	1,49	2,44	1,21	1,05	0,71
301	135	MM OLDS ^P	-	-	0,1545	-	0,111 0,120	-	7,5	9	28	-	-	-	-	-	-	-	-
310	-	MM	1	0,049	0,151	-	-	0,154	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
311	135	MM	1	0,049	0,1543	7 %	0,119	0,154	9,6	9	28	1,69	5,44	1,29	1,77	4,60	1,32	1,28	(1,30)
320	-	MM OLDS ^P	1	0,080	0,157 0,1516	-	-	0,201 0,190	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
321	135	MM OLDS	1	0,080	0,1536	17 %	0,130 0,130	0,201 0,210	11,8	9	28	1,69	4,66	1,62	2,09	4,86	1,47	1,57	(1,33)
330	-	MM	2	0,045	0,157	-	-	0,168	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
331	135	MM	2	0,045	0,1545	7 %	0,119	0,168	9,5	9	28	1,69	3,74	1,41	1,89	3,64	1,37	1,27	(1,22)
340	-	MM	2	0,081	0,151	-	-	0,221	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
341	135	MM OLDS	2	0,081	0,1540	21 %	0,134 0,134	0,221 0,217	10,9	9	28	1,69	3,35	1,62	2,10	3,72	1,47	1,45	(1,45)
401	95	OLDS ^P	-	-	0,1425	-	0,082	-	4,7	9,7	29	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
421	95	OLDS	1	0,066	0,1415	-	0,098	0,200	9,3	9,7	29	1,60	4,60	2,04	2,43	5,96	1,69	1,98	1,38
440	-	OLDS ^P	2	0,068	0,1415	-	-	0,213	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
441	95	OLDS	2	0,068	0,1411	-	0,101	0,200	6,9	9,7	29	1,60	3,34	1,98	2,37	4,37	1,66	1,47	0,96

tabel 4.16

5: KONKLUSIES EN AANBEVELINGEN.

5.1 KONKLUSIES.

- 1- Op grond van de uitgevoerde experimenten is nog altijd geen eenduidige toename van de bodemwrijving te voorspellen.
- 2- De bodemwrijvingsmodellen van Bijker en Swart lijken de situatie evenwel duidelijk te overdrijven. De beste resultaten worden nog bereikt met het model dat een faktor $\xi=1$ hanteert. Ook dit model lijkt echter op grond van de metingen nog overdreven.
- 3- Het hele model, met alle metingen is uitermate gevoelig. Zo is een debiet-instelling vrijwel niet exakt te reproduceren, waardoor de gemeten snelheden van dag tot dag een zekere spreiding vertonen. Hetzelfde geldt ook voor de verhangen.
- 4- De verhangmetingen, die uiteindelijk de juistheid van het gehanteerde bodemwrijvingsmodel moeten aantonen, zijn niet nauwkeurig genoeg. Omdat de te meten toenames van het verhang zeer klein zijn (kleine toenames van de bodemwrijving), is de invloed van verstoringen op de metingen erg groot. De te meten toenames verdwijnen daardoor bijna in de meetonnauwkeurigheid.
- 5- Op de ruw gemaakte bodem blijkt in de situatie stroming plus golven minder water over het talud te stromen dan in de situatie alleen stroming. De stroomsnelheid v_w is daardoor groter dan v_c . Dit maakt snelheidsmetingen met de mikromolen onbetrouwbaar, en noodzaakt metingen (of aanvullende metingen) met een apparaat dat snelheden in twee richtingen tegelijkertijd kan registreren (bijvoorbeeld een Onderdompelbare Laser Doppler Snelheidsmeter).
- 6- De beste resultaten worden bereikt bij lage stroomsnelheden (dat wil dus zeggen een grote faktor u_m/\bar{v}). Het verruwen van de bodem heeft wat de bodemwrijvingsberekeningen betreft weinig effect gehad, in die zin dat de grotere en duidelijker meetbare verhangen geen grotere faktor i_w/i_c opleveren. Dit blijkt uit een vergelijking van tabel 4.16 met tabel 4.8, die beide betrekking hebben op metingen bij een debiet van ca. $1/2.Q_{max}$.
- 7- De uniformiteit van de stroming in het model verandert per debiet-instelling. Door de verminderde stroming over het talud onder invloed van golven verandert het stromingsbeeld ook per gesuperponeerd golfveld. Dit heeft ook zo zijn invloed op snelheids- en verhangmetingen.
- 8- De profielmetingen met gebruikmaking van de in de bodem aangebrachte meetputjes vervullen in dit onderzoek slechts een illustratieve functie, en dat geldt zeker voor de metingen van de orbitaalsnelheden. Van grote betekenis voor de bodemwrijvingsberekeningen zijn ze echter niet geweest.
- 9- Zoals eerder is opgemerkt, neemt in de situatie stroming plus golven de stroming over het talud sterk af. Dit zou er op kunnen

wijzen dat de bodemwrijving onder invloed van de golfbeweging aanzienlijk is toegenomen. Een dergelijke aanzienlijke toename van de bodemwrijving vinden we echter zeker niet terug in de verhangmetingen.

5.2 AANBEVELINGEN.

- 1- De verhangmetingen moeten verbeterd worden. Van de 30 meetpunten over het hele bassin blijken er gemiddeld slechts 12 over te blijven in het meettrajekt tussen raai C en raai F ($=\pm 12m$). Over dit trajekt zouden meer meetpunten op het konstant-diepte gedeelte moeten worden aangebracht. Bovendien moet meer energie (en tijd!) gestopt worden in de verhangmetingen, in die zin dat door het meten van meer verhangen, door middeling een grotere nauwkeurigheid kan worden bereikt. De toepassing van geautomatiseerde peil-apparatuur kan deze werkzaamheden vergemakkelijken en vooral bespoedigen.
- 2- Verminderde stroming over het talud bij stroming en golven blijkt een storende invloed te hebben op de metingen. Het zou wellicht een verbetering zijn als het model zodanig wordt aangepast dat de stroming op het talud tot staan wordt gebracht. Dit kan worden bewerkstelligd door kribben in het model aan te brengen, over de volle breedte van het talud (dus vanaf $x=6,5$ tot aan de waterlijn).
- 3- Willen profielmetingen zoals behandeld in paragraaf 4.2.4.2 meer resultaten opleveren, dan moeten veel meer metingen worden verricht, zowel in meerdere punten per raai, als herhaalde malen in een punt. Van grote betekenis voor het voorspellen van de bodemwrijving zijn dergelijke metingen echter (nog) niet, maar veeleer voor het bestuderen van grenslaag effecten in een drie-dimensionaal stromingsveld. Dit betreft echter een onderzoek op zich, waarvan de uitkomsten in de toekomst overigens best gevolgen zouden kunnen hebben voor de bodemwrijving en dus ook voor sedimenttransporten.
- 4- Tot nu toe is steeds gemeten bij loodrechte golfinval, zowel bij dit onderzoek als bij het onderzoek van mijn voorgangers R. van Leyen en M.J. van der Vlerk. Tot nu toe kon ook eigenlijk geen toename van de bodemwrijving geconstateerd worden. Ondanks de meet-problemen die tijdens het onderzoek bij loodrechte golfinval zo'n belangrijke rol gespeeld hebben, verdient het aanbeveling om nu toch met schuin invallende golven te gaan werken. De theorie voorspelt dan immers een toename van de bodemwrijving (door de faktor $(1+\sin^2\theta)$ in vergelijking 2.55 t/m 2.57)
- 5- Tenslotte zou het aanbeveling verdienen om enige aanvullende metingen te verrichten, teneinde de toename van de snelheid v_{cw} voor de diverse proefnummers beter in kaart te brengen. Helaas is dit niet meer mogelijk, omdat de instroming van het model inmiddels is veranderd. Een andere mogelijkheid om v_{cw} uit v_c af te leiden is door gebruik te maken van een mathematisch model, waarin de invloed van het talud op de langsstroomverdeling onder stroming plus golven kan worden nagebootst.

6: LITERATUURLIJST

1. ANONIEM, Coastal Engineering, volume I, edited by W.W. Massie. Coastal Engineering Group, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft, 1982.
2. ANONIEM, Coastal Engineering, volume II, edited by W.W. Massie. Coastal Engineering Group, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft, 1980.
3. BAKKER, W.T., Bottom friction and velocity distribution in an oscillatory flow. Rijkswaterstaat, Directorate for Water Management and Hydraulic Research, Department for Coastal Research, Den Haag, 1973.
4. BAKKER, W.T., Sand concentration in an oscillatory flow. Paper presented at the 14th Coastal Engineering Conference, Copenhagen 1974, viz. Chapter 66, p.p. 1129-1148.
5. BAKKER, W.T. and DOORN, TH. VAN, Near-bottom velocities in waves with a current (slightly revised version of a paper presented at the 16th International Conference on Coastal Engineering, Hamburg, August 27-31, September 1-3, 1978). publication no. 208, Delft Hydraulics Laboratory, Delft, 1980.
6. BATTJES, J.A., Kollege handleiding Korte Goven (b76). vakgroep Vloeistofmechanika, afdeling Civiele Techniek, T.H. Delft, Delft, 1983.
7. BIJKER, E.W., Some considerations about scales for coastal models with movable bed. publication no. 50, Delft Hydraulics Laboratory, Delft, 1967.
8. DOORN, TH. VAN and GODEFROY, H.W.H.E., Experimental investigation of the bottom boundary layer under periodic progressive water waves. report M1362 part 1, Delft Hydraulics Laboratory, Delft, 1978.
9. GODEFROY, H.W.H.E. and VEGTER, D., A new type immersible Laser-Doppler Anemometer. Conference papers Transducer Tempcon Conference '84, p.p. 384-403, Harrogate, England, 1984.
10. JONSSON, I.G., Wave boundary layers and friction factors. Proceedings 10th. Conference on Coastal Engineering, Tokyo, Japan, 1966, chapter 10, p.p. 127-148.
11. KESTEREN, W.G.M VAN and BAKKER, W.T., Near bottom velocities in waves with a current; Analytical and numerical computations. Paper presented at the 19th. conference on coastal engineering, september 3-7, 1984, Houston, Texas.
12. LEIJEN, R. VAN en VLERK, M.J. VAN DER, Modelproeven ter bepaling van de invloed van loodrecht invallende golven op bodemwrijving veroorzaakt door langsstroming. afstudeerverslag bij de vakgroep

Kustwaterbouw, afdeling Civiele Techniek, T.H. Delft, Delft, 1984.

13. VISSER, P.J., A mathematical model of uniform longshore currents and the comparison with laboratory data. Communications on Hydraulics, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, report no. 84-2, 151 p.p., Delft, 1984.
14. VRIES, M. DE, Inleiding vloeistofmechanika (Koncept handleiding kollege b72). vakgroep vloeistofmechanika, afdeling Civiele Techniek, T.H. Delft, Delft, 1977.

BIJLAGE: OVERZICHTSTABEL

proef nr.	Q (l/s)	MM/OLDS	T (s)	H (m)	h (m)	Korr. faktor MM	\bar{U} (m/s)	U_m (m/s)	i (10^{-5})	C_{90} (10^{-3})	$(10^{-3}m)$	ξ_b	ξ_s	U_m/\bar{U}	f_b	f_s	$f_{\xi=1}$	icw/ic	(icw/ic) gew.
101	410	MM	-	-	0,214	-	0,216	-	7,2	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-
110	-	MM	1	0,046	0,213	-	-	0,119	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
111	410	MM OLDS	1	0,046	0,213	-	0,216 0,210	0,119 0,113	6,7	3	2	2,9	3,6	0,55	1,45	1,64	1,07	0,93	-
120	-	MM	1	0,070	0,210	-	-	0,179	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
121	410	MM OLDS	1	0,070	0,213	-	0,216 0,213	0,179 0,173	6,0	3	2	2,9	3,1	0,82	1,89	1,98	1,15	-	-
130	-	MM	1,8	0,043	0,214	-	-	0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
131	410	MM	1,8	0,043	0,213	-	0,216	0,125	6,8	3	2	2,9	2,9	0,58	1,50	1,50	1,08	0,94	-
140	-	MM	1,8	0,076	0,212	-	-	0,188	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
141	410	MM OLDS	1,8	0,076	0,213	-	0,216 0,212	0,188 0,187	7,1	3	2	2,9	2,6	-	1,98	1,83	1,17	0,99	-
201	360	MM OLDS P	-	-	0,2030	-	0,217 0,219	-	20,6	8,7	33	-	-	-	-	-	-	-	-
210	-	MM OLDS P	1	0,056	0,202 0,204	-	-	0,152 0,151	-	9	33	-	-	-	-	-	-	-	-
211	360	MM OLDS	1	0,056	0,2022	7 %	0,234 0,234	0,152 0,152	21,8	9	33	1,7	6,0	0,65	1,24	2,81	1,09	1,06	0,86
220	-	MM	1	0,100	0,200	-	-	0,213	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
221	360	MM	1	0,100	0,2004	17 %	0,254	0,213	21,0	9	33	1,7	5,0	0,84	1,37	3,01	1,15	1,02	0,73
230	-	MM	2	0,049	0,200	-	-	0,177	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
231	360	MM	2	0,049	0,2015	7 %	0,232	0,177	20,6	9	33	1,7	3,9	0,76	1,31	2,26	1,13	1,00	0,87
240	-	MM OLDS P	2	0,106	0,197 0,199	-	-	0,258 0,266	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
241	360	MM OLDS P	2	0,106	0,2003	17 %	0,262 0,262	0,258 0,251	21,7	9	33	1,7	3,3	0,98	1,49	2,44	1,21	1,05	0,71
301	135	MM OLDS	-	-	0,1545	-	0,111 0,120	-	7,5	9	28	-	-	-	-	-	-	-	-
310	-	MM	1	0,049	0,151	-	-	0,154	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
311	135	MM	1	0,049	0,1543	7 %	0,119	0,154	9,6	9	28	1,69	5,44	1,29	1,77	4,60	1,32	1,28	(1,30)
320	-	MM OLDS	1	0,080	0,157 0,1516	-	-	0,201 0,190	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
321	135	MM OLDS	1	0,080	0,1536	17 %	0,130 0,130	0,201 0,210	11,8	9	28	1,69	4,66	1,62	2,09	4,86	1,47	1,57	(1,33)
330	-	MM	2	0,045	0,157	-	-	0,168	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
331	135	MM	2	0,045	0,1545	7 %	0,119	0,168	9,5	9	28	1,69	3,74	1,41	1,89	3,64	1,37	1,27	(1,28)
340	-	MM	2	0,081	0,151	-	-	0,221	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
341	135	MM OLDS	2	0,081	0,1540	21 %	0,134 0,134	0,221 0,217	10,9	9	28	1,69	3,35	1,62	2,10	3,72	1,47	1,45	(1,35)
401	95	OLDS P	-	-	0,1425	-	0,082	-	4,7	9,7	29	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
421	95	OLDS	1	0,066	0,1415	-	0,098	0,200	9,3	9,7	29	1,60	4,60	2,04	2,43	5,96	1,69	1,98	1,38
440	-	OLDS P	2	0,068	0,1415	-	-	0,213	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
441	95	OLDS	2	0,068	0,1411	-	0,101	0,200	6,9	9,7	29	1,60	3,34	1,98	2,37	4,37	1,66	1,47	0,96

