

Afstudeerverslag

Transport van stortsteen door golven en stroming

November 2000

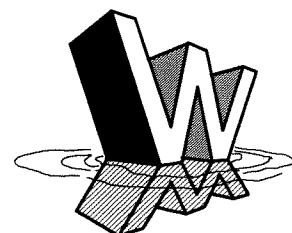
W.B.G. Bijman




hydronamic


TU Delft
Technische Universiteit Delft

Faculteit Civiele Techniek
en Geowetenschappen
Afdeling Waterbouwkunde en Geotechniek
Sectie Waterbouwkunde



Transport van stortsteen door golven en stroming

Afstudeerverslag

W.B.G. Bijman
Technische Universiteit Delft
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Afdeling Waterbouwkunde en Geotechniek
Sectie Waterbouwkunde

November 2000

Voorwoord

Dit rapport vormt het eindverslag van mijn afstudeeronderzoek dat verricht is bij de afdeling Waterbouwkunde en Geotechniek van de Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit Delft. In dit afstudeerrapport worden de verschijnselen besproken die een rol spelen bij het transport van stortsteen door een belastingscombinatie van golven en stroming.

Het onderzoek is uitgevoerd in samenwerking met Hydronamic, de ingenieursafdeling van Koninklijke Boskalis Westminster n.v. Hydronamic hecht groot belang aan wetenschappelijke ontwikkeling binnen de waterbouwkunde en geeft daarom afstudeerders de mogelijkheid om onderzoek te verrichten.

Een belangrijk onderdeel van dit onderzoek vormt het experimentele onderzoek dat verricht is in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Technische Universiteit Delft.

Graag wil ik de mensen bedanken die een bijdrage aan mijn onderzoek hebben geleverd. In de eerste plaats gaat mijn dank uit naar mijn afstudeercommissie, waarin Prof. Ir. K. d'Angremond, Dr. Ir. H.L. Fontijn, Ir. J. Olthof en Ir. W.H. Tutuarima zitting hebben.

In de tweede plaats wil ik graag de medewerkers van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica en de medewerkers van de sectie Waterbouwkunde bedanken, die met hun adviezen en inzet mij zeer geholpen hebben.

Delft, November 2000
Wouter Bijman

Inhoudsopgave

Samenvatting	9
Lijst van Symbolen	13
Literatuurlijst	15
1. Inleiding	19
1.1 Bodemverdedigingen.....	19
1.2 Ontwerpmethodieken.....	19
1.2.1 "Limited movement" ontwerpmethode.....	19
1.2.2 "Kritische Transport" ontwerpmethode.....	21
1.3 Probleemanalyse.....	22
1.4 Opbouw Rapport.....	22
2. Theoretische achtergrond: het verplaatsen van bodemmateriaal	25
2.1 Inleiding.....	25
2.2 Krachtenspel op een steentje.....	25
2.3 Begin van bewegen van een steentje.....	27
2.3.1 <i>Begin van bewegen door stromingsbelasting</i>	27
2.3.2 <i>Begin van bewegen door golfbelasting</i>	28
2.3.3 <i>Begin van bewegen door een combinatie van golven en stromen</i>	32
2.4 Transport van stortsteen.....	33
2.4.1 <i>Transport van stortsteen door stromingsbelasting</i>	34
2.4.2 <i>Transport van stortsteen door golfbelasting</i>	35
2.4.3 <i>Transport van stortsteen door een combinatie van golven en stromen</i>	35
2.4.4 <i>Pick-up functies</i>	36
2.4.5 <i>Verplaatsingslengte van bewegende korrels</i>	37
3. Interactie tussen golven en stroming	39
3.1 Inleiding.....	39
3.2 Schuifspanning voor golven en stroming afzonderlijk.....	40
3.2.1 <i>Schuifspanning op de bodem door eenparige stroming</i>	40
3.2.2 <i>Schuifspanning op de bodem door golfbelasting</i>	42
3.3 Experimentele resultaten.....	42
3.4 Theoretische modellen voor golf-stroming interactie.....	44
3.4.1 <i>Het sluitingsprobleem van de Reynoldse vergelijkingen</i>	44
3.4.2 <i>Beschrijving elementaire modellen</i>	45
3.4.3 <i>Model van Soulsby om schuifspanningen te berekenen</i>	48
4. Experimenten	53
4.1 Inleiding.....	53
4.2 Structuur van het experimentele onderzoek.....	53
4.3 Meetopstelling.....	55
4.3.1 <i>Opzet meetgebieden</i>	56
4.3.2 <i>Het bodemmateriaal</i>	58
4.4 Metingen.....	60
4.4.1 <i>Meetinstrumenten</i>	60
4.4.2 <i>Gemeten parameters</i>	61
4.4.3 <i>Meetprocedure</i>	65
5. Afleiding van de belasting uit de experimenten	69
5.1 Bepaling stromingsbelasting.....	69
5.1.1 <i>Inleiding</i>	69
5.1.2 <i>Gemeten verticale snelheidsprofielen</i>	69
5.1.3 <i>Bepaling van de ruwheid van de bodem</i>	72
5.1.4 <i>Bepaling van de schuifspanning t.g.v. de stroming in een willekeurig experiment</i>	72
5.2 Bepaling van de belasting door de golven.....	73
5.2.1 <i>Beschrijving van het golfbeeld</i>	73

5.2.2	<i>Splitsing van het gemeten golfsignaal in verschillende componenten</i>	75
5.2.3	<i>De snelheid op de bodem t.g.v. de golven</i>	77
5.2.4	<i>Berekening van de schuifspanning t.g.v. de golven in een willekeurig experiment</i>	79
6.	Analyse van de resultaten	81
6.1	Inleiding	81
6.2	Dimensie-analyse	81
6.2.1	<i>Stromingssituatie</i>	81
6.2.2	<i>Verplaatsingen</i>	83
6.3	Pick-up rate	84
6.3.1	<i>Waarnemingen</i>	84
6.3.2	<i>Pick-up parameter uitgezet tegen dimensieloze parameters</i>	85
6.3.3	<i>Pick-up uitgezet tegen een gecombineerde belasting</i>	86
6.3.4	<i>Vergelijking met een bestaande pick-up functie voor stroming</i>	92
6.4	Verplaatsingslengte	93
6.5	Transporten	96
6.5.1	<i>Analyse van de waarnemingen</i>	96
6.5.2	<i>Keuze van een golf-stroming interactietheorie</i>	98
6.5.3	<i>Vergelijking met de transportformule van Paintal</i>	99
6.6	Betrouwbaarheid van de meetresultaten	101
6.7	Beperkingen van het onderzoek	105
7.	Conclusies en aanbevelingen	109
7.1	Conclusies	109
7.2	Aanbevelingen	111
7.2.1	<i>Aanbevelingen om de resultaten van dit onderzoek te verbeteren</i>	111
7.2.2	<i>Aanbevelingen voor een andere onderzoeks aanpak</i>	111
Bijlage 1	Berekeningsmethode volgens het model van Soulsby	115
Bijlage 2	Grenslaag onder golven	117
Bijlage 3	Verplaatsingen van steentjes als functie van de tijd	119
Bijlage 4	Overzicht gemeten snelheidsprofielen	121
Bijlage 5	Belastingparameters per experiment	125
Bijlage 6	Transport parameters per experiment	127
Bijlage 7	Pick-up grafieken	129
Bijlage 8	Verplaatsingsafstanden	133
Bijlage 9	Transportgrafieken	147

Samenvatting

Wanneer een waterbouwkundige constructie op een erodeerbare ondergrond wordt gebouwd, dient een bodemverdediging te worden toegepast om de constructie tegen instabiliteit, ten gevolge van erosie van de bodem, te beschermen. Een bodembescherming heeft als functie om de ontgrondingskuil op afstand te houden van de constructie.

Vaak bestaat een bodemverdediging uit een aantal lagen granulair materiaal. De bovenste laag, de toplaag, moet bestand zijn tegen de hydraulische belasting die op de toplaag wordt uitgeoefend, zodat er geen erosie van de onderliggende lagen optreedt.

Het dimensioneren van de toplaag van een bodemverdediging kan op twee manieren gebeuren:

- "Limited movement" ontwerpmethode. Deze methode gaat ervan uit dat er een kritisch punt is, het begin van bewegen, waarbij de belasting zo laag is dat er geen transport van materiaal uit de toplaag optreedt. De diameter van het granulaire materiaal uit de toplaag wordt dan zo gekozen dat er geen materiaal beweegt. De basis van deze ontwerpmethode wordt gevormd door de theorie van Shields (1936), die onderzocht bij welke kritische bodemschuifspanning het begin van bewegen van bodemmateriaal optreedt.
- "Kritische transport" ontwerpmethode. Bij deze methode wordt er rekening mee gehouden dat er materiaal uit de toplaag verdwijnt. Het verplaatsen van bodemmateriaal uit de toplaag, hoeft nog niet tot falen van de bodemverdediging te leiden, als er maar bekend is hoeveel schade er optreedt en bij welke diameter van de stenen dit schadecriterium optreedt. De hoeveelheid stenen in de toplaag kan dan aangepast worden aan het te verwachten transport. Het verband tussen de hydraulische belasting en het transport van stortsteen moet bij deze methode dus bekend zijn. De basis van deze ontwerpmethode wordt gevormd door de formule van Paintal (1971), die het verband tussen de schuifspanning op de bodem en het transport van stortsteen in formulevorm vastlegde.

Paintal en Shields nemen allebei de schuifspanning ten gevolge van een stroming als belasting op de bodem. De theorieën van Paintal en Shields kunnen alleen worden gebruikt voor een belasting door stroming alleen.

In de praktijk wordt de toplaag van een bodemverdediging vaak belast door een combinatie van golven en stroming. Op dit moment is het dus niet mogelijk om een bodemverdediging te ontwerpen voor een belastingscombinatie van golven en stroming, omdat zowel het begin van bewegen, als het transport ten gevolge van de belastingscombinatie van golven en stroming, onbekend is.

De hoofdvraag van dit onderzoek is om verplaatsingen van stortsteen te koppelen aan een belasting die veroorzaakt wordt door stroming en golven.

Een probleem is dat het niet duidelijk is op welke manier de combinatie van golven en stroming de bodem belast. Noodgedwongen wordt in dit onderzoek de schuifspanning als belasting op het bodemmateriaal genomen, omdat er op dit moment geen alternatieven beschikbaar zijn die een meer bevredigend resultaat geven.

Een belangrijk aspect bij het bepalen van de resulterende schuifspanning is de niet-lineaire interactie tussen golven en stroming. De grenslagen van de golven en de stroming beïnvloeden elkaar wederzijds, waardoor de gemiddelde schuifspanning en de maximale schuifspanning voor de combinatie van golven en stroming groter zijn dan kan worden verwacht op grond van een lineaire interactie tussen golven en stroming. De gemiddelde schuifspanning is voor de combinatie van golven en stroming groter dan de schuifspanning t.g.v. de stroming en de maximale schuifspanning t.g.v. de golf-stroming interactie is groter dan de som van de amplitude van de schuifspanning t.g.v. de golf en de schuifspanning t.g.v. de stroming.

Er zijn legio onderzoekers die geprobeerd hebben om het resulterende schuifspanningsverloop op de bodem t.g.v. de combinatie van golven en stroming te bepalen. In dit onderzoek worden alleen de theorieën van Bijker (1967), Grant en Madsen (1979) en Fredsoe (1984) nader bekeken.

Omdat het niet eenvoudig mogelijk is om het resulterende schuifspanningsverloop te bepalen t.g.v. de golf-stroming interactie, wordt het geparametriseerde model van Soulsby (1993 en 1997) gebruikt, waarmee op eenvoudige wijze de gemiddelde en de maximale schuifspanning ten gevolge van de golf-stroming interactie te bepalen is.

Samenvatting

Om een verband te leggen tussen een resulterende belasting en verplaatsingen van stortsteen zijn er experimenten uitgevoerd in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de TU Delft. De experimenten zijn uitgevoerd in de zogenaamde "lange speurwerkgoet". Deze goet heeft een breedte van 0,8 m en een lengte van 45 m. In de goet zijn twee meetgebieden aangebracht van 0,5 bij 0,5 m². De meetgebieden zijn onderverdeeld in 10 gekleurde stroken van 5 cm breedte. De nominale diameter van de steentjes bedraagt 5,45 mm.

Het uitgangspunt van het experimentele gedeelte van dit onderzoek is dat de verplaatsingen veroorzaakt moeten worden door de combinatie van golven en stroming. Daarom is de stroomsnelheid bewust laag gehouden, d.w.z. de mobiliteitsparameter (Ψ) van de stroming varieert van 0,007 tot 0,021. Per stroomsnelheidserie is de golfhoogte gevarieerd van circa 0,05 m tot 0,15 m, bij een periode van 1,1 s. De periode van de golf is beperkt gevarieerd: er is één serie experimenten uitgevoerd met een periode van 1 s.

Het transport van steentjes kan omschreven worden als het oppikken (pick-up) van steentjes die over een bepaalde afstand verplaatsten. Deze drie aspecten van het transportproces van steentjes: de pick-up, het transport en de verplaatsingsafstanden, zijn onderzocht tijdens de experimenten. De pick-up (rate) is gedefinieerd als het volume bodemmateriaal dat verplaatst per eenheid van oppervlakte en per eenheid van tijd. Het transport is gedefinieerd als het volume bodemmateriaal dat per eenheid van tijd en per eenheid van breedte door een meetraai heen verplaatst.

Uit de analyse van de meetresultaten volgt een duidelijke indicatie dat de gemiddelde schuifspanning veroorzaakt door de interactie tussen golven en stroming een goede maat is voor de belasting op de steentjes. De invloed van de golven op het verplaatsen van steentjes uit zich in een hogere gemiddelde, gecombineerde schuifspanning, waardoor er bij een hogere golf meer steentjes zullen verplaatsten.

Wanneer de meetdata van de pick-up en het transport uit het experimentele onderzoek worden uitgezet tegen de gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter t.g.v. van de golf-stroming interactie, dan blijkt dat de meetdata een puntenwolk vormen waaruit een trend afgeleid kan worden. In het onderzoek is een aantal formules afgeleid die de pick-up en het transport van stortsteen door een belastingscombinatie van golven en stroming beschrijven.

Echter de spreiding van de meetwaarden t.o.v. de in dit onderzoek gevonden formules is zo groot dat het niet onomstotelijk vaststaat dat de gemiddelde gecombineerde schuifspanning de juiste maat voor de belasting op de steentjes is.

De theorie van Grant en Madsen blijkt een goede theorie te zijn om de belasting op de bodem te bepalen; zowel in de gevonden pick-up formule als in de gevonden transportformule wordt de gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter bepaald met de golf-stroming interactietheorie van Grant en Madsen.

Bij het afleiden van een transportformule bleek dat er geen duidelijke voorkeur voor de golf-stroming interactietheorie van Grant en Madsen is. Ook wanneer de meetwaarden van de transporten worden uitgezet tegen de gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter, berekend volgens de theorie van Fredsoe, blijkt dat de meetdata gaan samenvallen.

Wanneer de gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter volgens de theorie van Bijker wordt berekend, is er geen verband tussen belasting en verplaatsingen van steentjes af te leiden.

Naast de vraag of de gemiddelde gecombineerde schuifspanning echt de juiste parameter is om de belasting in deze complexe belastingssituatie weer te geven, kleven er aan de resultaten van dit onderzoek kleven nog drie grote nadelen:

1. De afgeleide formules zijn beperkt geldig doordat een aantal relevante variabelen, zoals de diameter en vorm van het bodemmateriaal, de periode van de golven en de waterdiepte, niet of nauwelijks gevarieerd zijn.
2. De afgeleide formules zijn beperkt toepasbaar doordat het onderzoeksbereik niet groot genoeg is. Er zijn slechts meetwaarden bekend tot een gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter van 0,035. Het interessegebied voor het ontwerpen van de toplaag van een bodemverdediging ligt bij waarden rondom de Shieldparameter ($\Psi=0,055$).
3. De resultaten hebben een geringe betrouwbaarheid. Het werkelijk optredende transport kan bij een lage gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter ($<0,02$) tot 80% afwijken van de waarde die met de gevonden transportformules wordt voorspeld. Dit wordt veroorzaakt door het geringe aantal steentjes dat er bij zo een lage belasting verplaatst.

Deze drie bezwaren zorgen ervoor dat de in dit onderzoek gevonden formules beperkt bruikbaar zijn voor het ontwerpen van de toplaag van de bodemverdediging, wanneer deze wordt belast door een combinatie van golven en stroming.

Het is raadzaam om vervolgonderzoek te verrichten zodat de invloed van deze drie bezwaren verminderd kan worden.

Een andere belangrijke conclusie is dat uit dit onderzoek duidelijk de vraag naar voren komt of de schuifspanning in dit complexe belastinggeval echt de juiste maat voor de belasting op de steentjes is. Het onderzoeken van het daadwerkelijke mechanisme dat verplaatsingen van steentjes veroorzaakt is een belangrijke aanbeveling die uit dit onderzoek volgt.

Lijst van Symbolen

Symbol	Betekenis	Dimensie
a	amplitude van de oppervlakte uitwijking	[m]
a _b	amplitude van de orbitaal beweging aan de bodem	[m]
A _D	geprojecteerde oppervlakte van een steentje waarop de sleepkracht werkzaam is	[m ²]
A _L	geprojecteerde oppervlakte van een steentje waarop de liftkracht werkzaam is	[m ²]
A _S	geprojecteerde oppervlakte van een steentje waarop de schuifkracht werkzaam is	[m ²]
b	breedte van de stroomgoot	[m]
C	Chezy – coëfficiënt	[m ^{1/2} /s]
C _{ijk}	kunstmatige ijkwaarde van de Chezy – coëfficiënt	[m ^{1/2} /s]
C _D	sleepcoëfficiënt	[-]
C _L	liftcoëfficiënt	[-]
C _M	traagheidscoëfficiënt	[-]
C _S	wrijvingscoëfficiënt	[-]
d	diameter van het bodemmateriaal	[m]
d ₅₀	mediane korreldiameter van het bodemmateriaal	[m]
d _{n50}	nominale mediane korreldiameter van het bodemmateriaal	[m]
D _*	dimensieloze diameter	[-]
E	massa van het verplaatste bodemmateriaal per eenheid van oppervlakte en per eenheid van tijd	[kg/m ² /s]
g	gravitatieversnelling	[m/s ²]
G	gewicht van een waterpakketje	[N]
f	wrijvingscoëfficiënt	[-]
f _w	wrijvingscoëfficiënt onder golven	[-]
f _{wc}	wrijvingscoëfficiënt voor de combinatie golven van golven en stroming	[-]
F _f	wrijvingskracht	[N]
F _L	liftkracht	[N]
F _D	sleepkracht	[N]
F _M	traagheidskracht	[N]
F _S	schuifkracht	[N]
Fr	getal van Froude	[-]
h	waterdiepte	[m]
H	golfhoogte	[m]
i	bodemverhang	[-]
k	golfgetal	[m ⁻¹]
k _a	schijnbare ruwheid	[m]
k _s	ruwheid	[m]
k _{ijk}	kunstmatige ijkruwheid	[m]
l _b	lengte van het bed	[m]
L	golflengte	[m]
p _s	het volume verplaatst bodemmateriaal per eenheid van oppervlakte en per eenheid van tijd	[m/s]
P	kans dat een steentje bij een bepaalde belasting wordt opgepikt	[-]
q _{b1/2}	het volume verplaatst bodemmateriaal door een raai, per eenheid van breedte tijdens een halve golfperiode	[m ² /s]
q _s	het volume verplaatst bodemmateriaal door een raai, per eenheid van breedte en per eenheid van tijd	[m ² /s]
Q	debiet	[m ³ /s]
r	relatieve diameter	[-]
Re	Reynolds-getal	[-]
RE	golfReynolds-getal	[-]
Re _*	korrelReynolds-getal	[-]
u	stroomsnelheid	[m/s]
\bar{u}	gemiddelde stroomsnelheid	[m/s]
u _c	kritische stroomsnelheid	[m/s]

Lijst van Symbolen

u_*	schuifspanningssnelheid	[m/s]
u_{*c}	kritische schuifspanningssnelheid	[m/s]
u'	turbulente snelheidsfluctuatie	[m/s]
$u_{b,c}$	bijdrage van de stroomsnelheid aan de snelheid op de bodem	[m/s]
$\hat{u}_{b,w}$	amplitude van de snelheid aan de bodem t.g.v. de golf	[m]
U	Ursell-parameter	[-]
t_q	duur van de belasting	[s]
T	periode van de golf	[s]
T	schuifspanningsparameter van Van Rijn	[-]
V	volume van een steentje	[m ³]
W	gradatie of breedte van het bodemmateriaal	[-]
W	eigen gewicht van een steentje onder water	[N]
X	Soulsby-parameter die golf- of stromingsdominantie aangeeft	[-]
$X_{s,50}$	verplaatsingsafstand die door 50% van de korrels onderschreden wordt	[m]
$X_{s,90}$	verplaatsingsafstand die door 90% van de korrels onderschreden wordt	[m]
Y	Soulsby-parameter om gemiddelde schuifspanning mee te bepalen	[-]
z_0	hoogte boven de bodem waar de snelheid nul is	[m]
Z	Soulsby-parameter om maximale schuifspanning mee te bepalen	[-]
ϕ	transportparameter	[-]
ϕ_p	pick-up parameter	[-]
η	oppervlakte uitwijking	[m]
κ	constante van Von Kármán	[-]
λ_b	verplaatsingslengte van een korrel op de bodem	[m]
λ	wrijvingscoëfficiënt	[-]
ν	kinematische viscositeit	[m ² /s]
ν_t	turbulente kinematische viscositeit	[m ² /s]
ρ_s	massadichtheid bodemmateriaal	[kg/m ³]
ρ_w	massadichtheid water	[kg/m ³]
σ	relatieve hoekfrequentie t.o.v. een met snelheid \bar{u} bewegend assenstelsel	[s ⁻¹]
$\tau(z)$	schuifspanning op een hoogte (z) boven de bodem	[N/m ²]
$\tau_{b,c}$	bodemschuifspanning uitgeoefend door stroming	[N/m ²]
$\tau_{b,cr}$	kritische bodemschuifspanning	[N/m ²]
$\hat{\tau}_{b,w}$	amplitude van de bodemschuifspanning uitgeoefend door een golf	[N/m ²]
$\tau_{b,w}$	schuifspanning op de bodem t.g.v. een golf	[N/m ²]
$\tau_{m,wc}$	gemiddelde schuifspanning veroorzaakt door de golf-stroming interactie	[N/m ²]
$\tau_{wc,max}$	maximale schuifspanning veroorzaakt door de golf-stroming interactie	[N/m ²]
$\hat{\tau}_{b,cr}$	kritische amplitude van de bodemschuifspanning	[N/m ²]
ω	hoekfrequentie	[s ⁻¹]
ξ	parameter van Bijker	[-]
Δ	relatieve dichtheid	[-]
Ψ	mobilitetsparameter	[-]
Ψ_{cr}	Shieldparameter, kritische mobilitetsparameter	[-]
Ψ_w	mobilitetsparameter onder golven	[-]
$\bar{\Psi}_{wc}$	gemiddelde gecombineerde mobilitetsparameter t.g.v. de golf-stroming interactie	[-]
$\Psi_{max,wc}$	maximale gecombineerde mobilitetsparameter t.g.v. de golf-stroming interactie	[-]
$\bar{\Psi}_{wc,GM}$	gemiddelde gecombineerde mobilitetsparameter t.g.v. de golf-stroming interactietheorie van Grant en Madsen	[-]
$\bar{\Psi}_{wc,F}$	gemiddelde gecombineerde mobilitetsparameter t.g.v. de golf-stroming interactietheorie van Fredsoe	[-]

Literatuurlijst

- Battjes, J.A., *Handleiding Korte Golven*, Delft: Technische Universiteit Delft, 1997.
- Battjes, J.A., *Vloeistofmechanica*, Collegehandleiding b70, Herdruk dec. '92, Delft: Technische Universiteit Delft, 1990.
- Bijker, E.W., *Some Considerations about Scales for Coastal Models with Movable Beds*, Proefschrift, Delft: Technische Hogeschool Delft, 1967.
- Boer, G.M. de, *Transport van Stenen van een Granulaire Bodemverdediging*, Afstudeerverslag, Delft: Technische Universiteit Delft, 1998.
- Booij, R., *Turbulentie in de Waterloopkunde*, Handleiding voor het college b82, Delft: Technische Universiteit, 1992.
- Brevik, I. and B. Aas, 'Flume Experiments in Waves and Current, I. Rippled Bed', *Coastal Engineering*, 3 (1980), p. 149-177.
- Einstein, H.A., 'The Bedload Function for Sediment Transportation in Open Channel Flow', *Technical Bulletin 1026* (1950), US Department of Agriculture, Washington.
- Forschelen, P., *Transport van Granulair Bodemmateriaal*, Afstudeerverslag, Delft: Technische Universiteit Delft, 1999.
- Fredsoe, J., 'Turbulent Boundary Layer in Wave-Current Motion', *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol 110 (1984), No. 8, p. 1103-1120.
- Grant, W.D. and O.S. Madsen, 'Combined Wave and Current Interaction With a Rough Bottom', *Journal of Geophysical Research*, Vol 84 (1979), No. C4, p. 1797-1808.
- Jonsson, I.G., 'Wave Boundary Layers and Friction Factors', *Proceedings of 10th Conference on Coastal Engineering*, Vol 1 (1966), p. 127-148
- Kemp, P.H. and R.R. Simons, 'The Interaction between Waves and a Turbulent Current', *Journal Fluid Mechanics*, Vol 116 (1982), p. 227-250.
- Nagakawa, H. and T. Tsujimoto, 'Sand Bed Instability due to Bed-Load Motion', *Journal of Hydraulics Division*, Vol 106 (1980), No. HY 12, p. 2029-2051.
- Paintal, A.P., 'Concept of Critical Shear Stress in Loose Boundary in Open Channels', *Journal of Hydraulic Research*, Vol 9-1(1971), p. 91-113.
- Rance, P.J. and N.F. Warren, 'The Treshold of Movement of Coarse Material in Oscillatory Flow', *Proc. 11th Conf. Coastal Eng.*, Vol I (1968), p.487-491.
- Rijn, L.C. van, 'Sediment Transport, Part 1: Bed Load Transport', *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol 110 (1984).
- Rijn, L.C. van, *Handbook Sediment Transport by Currents and Waves*, 2nd edition, Delft: Delft Hydraulics, 1990.
- Rijn, L.C. van, *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries, Coastal Seas and Oceans*, Delft: IHE Delft, 1993.
- Schiereck, G.J., *Introduction to Bed, Bank and Shore protection*, Delft: Technische Universiteit Delft, 1995.

Literatuurlijst

- Shields, A., 'Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung', *Mitt. der Preuss. Versuchsanst. für Wasserbau und Schiffbau*, Heft 26 (1936).
- Sleath, J.F.A., 'Measurements of Bed Load in Oscillatory Flow', *ASCE Journal of the waterway port, coastal and ocean division*, Vol 104 (1978), No. WW4, p. 291-307.
- Sleath, J.F.A., *Sea Bed Mechanics*, Cambridge University: A Wiley-Interscience Publication, New York, 1984.
- Soulsby, R.L., e.a 'Wave-current Interaction within and outside the Bottom Boundary Layer', *Coastal Engineering*, 21(1993).
- Soulsby, R.L., *Dynamics of Marine Sands*, London: Thomas Telford Publications, 1997.
- Soulsby, R.L and R.J.S. Whitehouse, *Threshold of Sediment Motion in Coastal Environments*, Reproduced from a paper presented at Pacific Coasts and Ports '97 and 13th Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference and 6th Australasian Port and Harbour Conference, HR Wallingford, 1997.
- Swart, D.H., *Offshore Sediment Transport and Equilibrium Beach Profiles*, Proefschrift, Delft: Technische Hogeschool Delft, 1974.
- Yalin, M.S., *Sediment Transport*, 2nd edition, Pergamon Press, 1977.

1 Inleiding

1.1 Bodemverdedigingen

Wanneer een waterbouwkundig kunstwerk op een erodeerbare ondergrond wordt gebouwd, is het bijna altijd noodzakelijk om de ondergrond te verdedigen tegen erosie. Het kunstwerk verandert het stroombeeld of verhindert het sedimenttransport waardoor er rondom of achter het kunstwerk ontgronding op kan treden. De ontgrondingskuil tast de stabiliteit van het kunstwerk aan waardoor het kunstwerk kan bezwijken.

Een bodemverdediging heeft ook een filterfunctie. Enerzijds dient de verdediging het onderliggende erodeerbare materiaal vast te houden, anderzijds moet een bodemverdediging voldoende waterdoorlatend zijn of voldoende gewicht hebben om bezwijking van de verdediging door te grote drukgradiënten te voorkomen.

De filterfunctie van een bodemverdediging kan op verschillende manieren gerealiseerd worden. In het verleden gebruikte men zinkstukken van gevlochten wilgentakken om het fijne sediment vast te houden. De zinkstukken werden met stortsteen afgestort om deze op hun plaats te houden.

Tegenwoordig gebruikt men vaak een met stortsteen verzwaard geotextiel om de ondergrond vast te houden.

Een andere veel gebruikte en vaak goedkope methode is een bodemverdediging die geheel uit granulair materiaal bestaat. De verdediging is zodanig uit verschillende lagen opgebouwd dat het sediment de granulaire lagen niet kan passeren maar het water wel ongehinderd door de lagen kan stromen.

Voorbeelden van bodemverdedigingen zijn de blokkenmatten waarmee de pijlers van de Oosterscheldedam worden beschermd tegen erosie of de steenstortingen op pijpleidingen.

1.2 Ontwerpmethodieken

Voor alle soorten bodemverdedigingen is het noodzakelijk dat de bovenste laag sterk genoeg is om de belasting te kunnen weerstaan. De belasting op de bodem kan bestaan uit een stroming, een oscillerende golfbelasting of een combinatie van die twee.

Op dit moment zijn er twee ontwerpmethoden voor een bodemverdediging gangbaar.

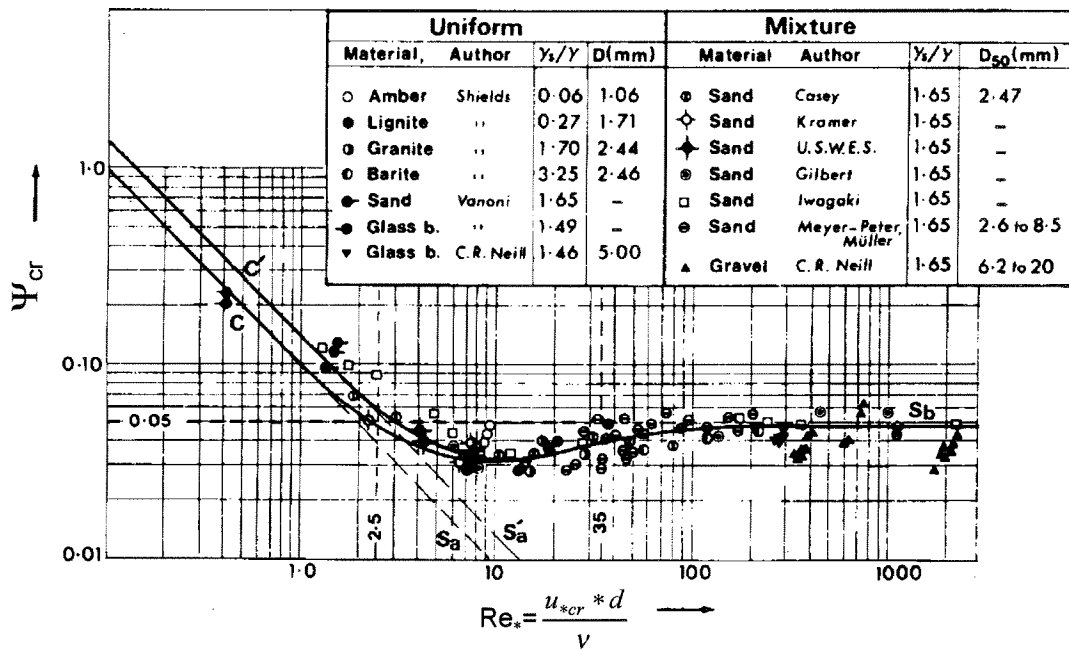
In de eerste plaats wordt de "limited movement" ontwerpmethode toegepast. De "limited movement" ontwerpmethode staat weinig of geen transport toe en onder de ontwerpomstandigheden dient de toplaag te blijven liggen. Er is dus een stabiliteitscriterium dat aangeeft wanneer steentjes gaan verplaatsen.

De tweede ontwerpmethode, de "kritische transport" methode staat wel transport toe onder de ontwerpomstandigheden, omdat het transport van een aantal stenen nog niet tot bezwijken van de constructie hoeft te leiden. Als er tijdens de levensduur voldoende stenen in de toplaag blijven liggen is de stabiliteit van de bodemverdediging gewaarborgd. In de volgende twee subparagrafen worden de twee methoden in vogelvlucht beschreven.

1.2.1 "Limited movement" ontwerpmethode

Deze methode gaat er van uit dat er een kritisch punt is waarbij de belasting zo laag is dat er geen transport optreedt.

De basis van deze ontwerpmethode vormt de theorie van Shields (1936). Shields onderzocht het begin van bewegen van bodemmateriaal met een diameter variërend van 1 tot 2,5 mm onder belasting van een stroming. Dit onderzoek resulteerde in de bekende Shieldscurve (Figuur 1-1), waarin een verband wordt gelegd tussen het getal van Reynolds en de Shieldsparameter (Ψ_{cr}). In Figuur 1-1 staan ook de resultaten van andere onderzoekers die het werk van Shields voortgezet hebben tot steentjes met een diameter van 20 mm.



Figuur 1-1: Shieldscurve (uit Yalin (1977))

De Shieldscurve geeft aan wanneer een korrel gaat bewegen. Als de belasting op een korrel zodanig is dat een korrel zich in het gebied onder de Shieldscurve bevindt, beweegt een korrel niet. Wanneer echter de belasting zodanig is dat een korrel zich in het gebied boven de Shieldscurve bevindt, verplaatst de korrel. De Shieldparameter is weergegeven in vergelijking (1-1). Wanneer men het subscript "cr" weghaalt uit vergelijking (1-1) resteert Ψ , de mobiliteitsparameter, een maat voor de belasting op de korrel gedeeld door de sterkte van de korrel. De Shieldparameter is de kritische mobiliteitsparameter waarbij transport optreedt.

$$\Psi_{cr} = \frac{\tau_{b,cr}}{(\rho_s - \rho_w)gd} \dots\dots\dots(1-1)$$

Hierin is:

- Ψ_{cr} = de Shieldparameter [-];
- $\tau_{b,cr}$ = de kritische bodemschuifspanning [N/m^2];
- ρ_s = massadichtheid van het bodemmateriaal [kg/m^3];
- ρ_w = massadichtheid van het water [kg/m^3];
- g = gravitatieversnelling [m/s^2];
- d = diameter van het bodemmateriaal [m].

Door het werk van Shields is voor iedere korreldiameter bekend bij welke schuifspanning een korrel gaat bewegen. Afhankelijk van de stromingssituatie kan dan een diameter van het bodemmateriaal gekozen worden waarbij (theoretisch) geen beweging van het bodemmateriaal optreedt. De belasting bij het onderzoek van Shields bestond puur uit een stromingsbelasting. Andere onderzoekers, o.a. Rance en Warren (1968) en Sleath (1978), hebben zijn onderzoek uitgebreid naar een oscillerende belasting door golven.

Voor materiaal tot een diameter van 4 mm is ook het begin van bewegen onder de belastingscombinatie van stromen en golven onderzocht. Soulsby en Whitehouse (1997) concludeerden op basis van experimentele gegevens dat het begin van bewegen van bodemmateriaal veroorzaakt door een belastingscombinatie van golven en stroming bij dezelfde Shieldparameter plaatsvindt als bij belasting door stroming. Als belastingsparameter op de korrels wordt de som van de amplitude van de bodemschuifspanning veroorzaakt door de golf en de bodemschuifspanning veroorzaakt door de stroming genomen.

Ook voor andere belastingsgevallen dan alleen stroming, is nu bekend bij welke schuifspanning er transport optreedt.

Met de tijd werd de visie van Shields aangepast. Shields vond namelijk het begin van bewegen door gemeten transporten naar een nul-waarde te extrapoleren en heeft geen metingen verricht rondom het begin van bewegen zelf.

Het WL | Delft Hydraulics (Waterloopkundig Laboratorium) stelde vast dat de grenzen gesteld door Shields te absoluut waren. Bij een mobiliteitsparameter kleiner dan de Shieldsparemeter bewegen er ook korrels; het vaststellen van begin van bewegen is subjectief en kan per onderzoek verschillen. Daarom zijn er verschillende stabiliteitsniveaus te onderscheiden. De oorspronkelijke Shieldsparemeter wordt in het onderzoek van het WL omschreven als het stabiliteitscriterium waarbij geldt dat overal korrels 'aan de wandel' zijn.

1.2.2 "Kritische transport" ontwerpmethode

Bij deze methode wordt er rekening mee gehouden dat er stenen van de toplaag bewegen. Het verplaatsen van een aantal stenen uit de toplaag hoeft niet te betekenen dat de verdediging bezwijkt, als er maar bekend is hoeveel stenen er zullen bewegen. De ontwerper kan kiezen hoeveel schade hij toestaat en bij welke diameter van de stenen dit schadecriterium optreedt. De hoeveelheid stenen in de bovenste laag kan dan aangepast worden aan het te verwachten transport.

Een transportformule is nu een stabiliteitsvoorspeller en met een transportformule is het mogelijk om scherper en economischer te ontwerpen. Paintal (1971) vond een verband tussen belasting en transport van stenen, geldig voor stroming alleen:

$$\phi = 6,56 \cdot 10^8 \cdot \Psi^{16} \dots\dots\dots (1-2)$$

geldig voor $\Psi < 0,05$.

Hierin is:

$$\Psi = \frac{\tau_{b,c}}{(\rho_s - \rho_w)gd} \quad = \text{de mobiliteitsparameter: de verhouding van de belasting op de steentjes tot de "sterkte" van de steentjes [-];}$$

$$\phi = \frac{q_s}{\sqrt{\Delta g d^3}} \quad = \text{de transportparameter [-].}$$

In de mobiliteitsparameter is:

$\tau_{b,c}$ = de schuifspanning op de bodem uitgeoefend door de stroming [N/m²].

In de transportparameter is:

q_s = het volume verplaatst bodemmateriaal door een raai per eenheid van breedte en per eenheid van tijd [m²/s];

Δ = relatieve dichtheid van het bodemmateriaal onder water [-].

Het onderzoek van Paintal bevestigt de uitbreiding van de Shieldstheorie door het WL, hoewel Paintal onderzoek deed naar transporten en "het begin van bewegen" -concept juist ter discussie stelde. Volgens het onderzoek van het WL verplaatsen er ook steentjes bij een mobiliteitsparameter kleiner dan de Shieldsparemeter en dat is precies wat Paintal beschrijft.

Ook Paintal neemt de bodemschuifspanning als maatgevende belasting. Formule (1-2) is de enige formule die het transport beschrijft bij een mobiliteitsparameter kleiner dan de Shieldsparemeter.

Het transport van stortsteen is alleen bekend voor belasting door stroming alleen. Voor een oscillerende belasting door golven heeft Sleath (1978) een transportformule opgesteld, maar voor de belastingscombinatie van golven en stromen is een relatie tussen belasting en transporten onbekend.

1.3 Probleemanalyse

Uit de beschrijving van de huidige ontwerpmethoden voor een bodemverdediging is gebleken dat het nog niet mogelijk is om een bodemverdediging te ontwerpen volgens de "kritische transport" methode of volgens de "limited movement" methode wanneer de belasting bestaat uit een combinatie van stroming en golven. Het gedrag van een bodemverdediging van stortsteen onder invloed van een belastingscombinatie van golven en stroming is onbekend.

Op dit moment lost men dit probleem op door een van beide belastingen als maatgevend te beschouwen en de toplaag van de bodemverdediging of op de golfbelasting of op de stroming te dimensioneren.

Een andere gebruikte methode gaat ervan uit dat de aanpak van Soulsby en Whitehouse ook geldig is voor bodemmateriaal met een diameter groter dan 4 mm. Het begin van bewegen is dan ook gedefinieerd voor de belastingscombinatie van golven en stroming en de toplaag kan met de "limited movement" ontwerpmethode gedimensioneerd worden.

Paintal heeft aangetoond dat er bij belasting door stroming met een mobiliteitsparameter kleiner dan de Shieldspareparameter ook transporten optreden. De vraag is of er ook voor de combinatie van golven en stromen bij lage belastingen transporten optreden en of het mogelijk is om een verband te vinden tussen belasting en transport van steentjes.

Een ander probleem is dat er geen eenduidigheid is over de manier waarop de combinatie van stroming en golven de bodem belast. Meerdere onderzoekers, waaronder Bijker (1967), Fredsoe (1984) en Grant en Madsen (1979), hebben geprobeerd om het schuifspanningsverloop veroorzaakt door een gecombineerde belasting van golven en stromen te beschrijven, maar een bevredigende of "juiste" theorie is nog niet gevonden.

De doelstelling van dit onderzoek bestaat uit drie delen:

1. Het onderzoeken van het verplaatsen van stortsteen bij een belasting omtrent het door Soulsby en Whitehouse geopperde begin van bewegen voor golven en stromen.
2. Het toetsen van de theorieën van Bijker, Fredsoe en Grant en Madsen voor de interactie tussen golf- en stromingsbelasting aan de hand van het verplaatsen van steentjes.
3. Het beschrijven van een verband tussen het transport van stortsteen en de bijbehorende belastingscombinatie van golven en stroming.

Om deze doelstellingen te realiseren zijn er experimenten uitgevoerd in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Technische Universiteit Delft.

Omdat er nog geen onderzoek is gedaan naar transporten van stortsteen bij een belastingscombinatie van golven en stromen heeft dit onderzoek een sterk verkennend karakter en ligt de nadruk op het doorgronden van het transportproces van stortsteen bij een combinatie van golven en stroming.

Het verkennende karakter vormt een belangrijke afbakening van het onderzoek. Er is voor gekozen om een zo eenvoudig mogelijke situatie te bestuderen, namelijk een vlak bed belast door regelmatig golven in dezelfde richting als de stroming.

1.4 Opbouw Rapport

In hoofdstuk 2 wordt eerst de theoretische achtergrond over het verplaatsen van steentjes gegeven. Daarbij wordt eerst, op microniveau, het "begin van bewegen" -criterium uitgewerkt voor verschillende belastingscombinaties, waarna het transport op macroniveau wordt beschreven. Aangezien praktisch alle beschouwingen over stabiliteit en verplaatsingen van steentjes worden gerelateerd aan een bodemschuifspanning wordt daarna in hoofdstuk 3 uiteengezet hoe golven en stromen de bodem via schuifspanning belasten en wordt er een overzicht gegeven van enkele golfstroming interactie theorieën. Verschillende theorieën geven een verschillende resulterende belasting op de bodem.

Om een verband tussen belasting en verplaatsingen van stenen te vinden zijn er in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Technische Universiteit Delft experimenten uitgevoerd. Het verslag van deze experimenten staat in hoofdstuk 4.

In hoofdstuk 5 wordt beschreven hoe uit de gemeten golfhoogte en de gemeten stroomsnelheid de belasting op het bodemmateriaal kan worden bepaald.

De analyse van de resultaten verkregen door de experimenten gebeurt in hoofdstuk 6. Daarbij wordt geprobeerd om de belasting berekend uit de verschillende golf-stroming interactie theorieën te koppelen aan de verplaatsing van de steentjes.

De conclusies en aanbevelingen van dit onderzoek vindt u in het laatste hoofdstuk van dit rapport.

2 Theoretische achtergrond: het verplaatsen van bodemmateriaal

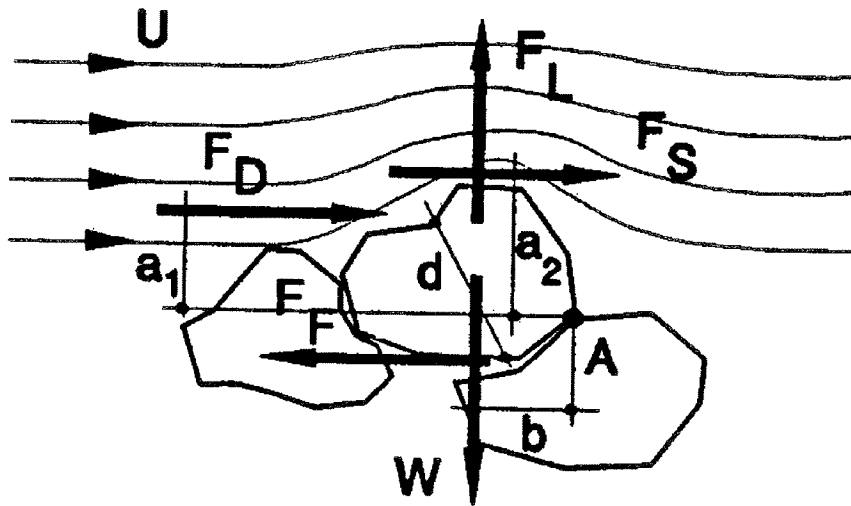
2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zal een overzicht gegeven worden van de theoretische achtergrond van het verplaatsen van bodemmateriaal. Allereerst wordt het individuele krachtenspel op een steentje beschreven, daarna het begin van bewegen, en uiteindelijk wordt het transport van stortsteen behandeld.

Er wordt een duidelijk onderscheid gemaakt voor welke belasting een theorie geldig is. Het begin van bewegen van een steentje en het transport van steentjes wordt eerst voor een stroming gegeven, daarna voor een golf en tenslotte voor een combinatie van golven en stroming. Het onderwerp van dit onderzoek is alleen de combinatie van golven en stromen. Maar theorieën die verplaatsingen van steentjes onder de belastingscombinatie van golven en stromen voorspellen, zijn vaak een voortzetting van de theorieën voor een stroming alleen en mogen in dit rapport dus niet ontbreken.

2.2 Krachtenspel op een steentje

Wanneer men de krachten op een steentje in detail bekijkt dan blijkt dat er vijf krachten op een steentje werken. In Figuur 2-1 staat het krachtenspel op een steentje weergegeven.



Figuur 2-1: Krachtenspel op een steentje

De vijf krachten die op een steentje werken zijn:

1. De liftkracht: veroorzaakt door de kromming van de stroomlijnen om een steentje,

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_w C_L \bar{u}^2 A_L \dots\dots\dots(2-1)$$

Hierin is:

F_L = de liftkracht [N/m²];

C_L = liftcoëfficiënt [-];

\bar{u} = de gemiddelde ongestoorde stroomsnelheid [m/s]; er wordt dus aangenomen dat er een uniform snelheidsprofiel is, met een over de hele diepte constante snelheid \bar{u} .

A_L = geprojecteerde oppervlakte van het steentje waarop de liftkracht werkzaam is. Deze oppervlakte hangt af van de vorm van het steentje (of het steentje tot een bol of een kubus wordt geschematiseerd) en is evenredig met d^2 [m²].

2. De sleepkracht: veroorzaakt door de drukverschillen over een steentje,

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w C_D \bar{u}^2 A_D \dots\dots\dots(2-2)$$

Hierin is:

F_D = de sleepkracht [N/m²];

C_D = sleepcoëfficiënt [-];

A_D = geprojecteerde oppervlakte van het steentje waarop de sleepkracht werkzaam is. Deze oppervlakte hangt af van de vorm van het steentje (of het steentje tot een bol of een kubus wordt geschematiseerd) en is evenredig met d^2 [m²].

3. De schuifkracht: veroorzaakt door de stroming die langs de korrel schuift,

$$F_S = \frac{1}{2} \rho_w C_S \bar{u}^2 A_S \dots\dots\dots(2-3)$$

Hierin is:

F_S = de schuifkracht [N/m²];

C_S = wrijvingscoëfficiënt [-];

A_S = geprojecteerde oppervlakte van het steentje waarop de schuifkracht werkzaam is. Deze oppervlakte hangt af van de vorm van het steentje (of het steentje tot een bol of een kubus wordt geschematiseerd) en is evenredig met d^2 [m²].

Bij sommige auteurs wordt de schuifkracht niet als een aparte kracht omschreven, maar zit deze kracht verwerkt in de sleepkracht.

4. De zwaartekracht: het eigen gewicht van een steentje onder water,

$$W = (\rho_s - \rho_w) g V \propto (\rho_s - \rho_w) g d^3 \dots\dots\dots(2-4)$$

Hierin is:

W = gewicht van een steentje onder water [N];

V = volume van het steentje [m³].

5. De wrijvingskracht:

$$F_f = fW \dots\dots\dots(2-5)$$

Hierin is:

F_f = wrijvingskracht [-];

f = wrijvingscoëfficiënt [-].

De eerste drie krachten proberen het steentje te verplaatsen, de laatste twee krachten houden het steentje op zijn plaats. De drie versturende krachten zijn alle drie evenredig met de snelheid in het kwadraat.

De liftkracht maakt evenwicht met de zwaartekracht en de wrijvingskracht maakt evenwicht met de som van de sleep- en schuifkracht. Uit het momentenevenwicht om het draaipunt van een steentje (punt A in Figuur 2-1) valt af te leiden dat de kritische snelheid waarbij een steentje gaat verplaatsen evenredig is met:

$$\rho_w u_c^2 d^2 \propto (\rho_s - \rho_w) g d^3 \dots\dots\dots(2-6)$$

Hierin is:

u_c = kritische stroomsnelheid [m/s].

Uit vergelijking (2-6) volgt dat:

$$u_c^2 \propto \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) g d \dots\dots\dots(2-7)$$

De kritische snelheid waarbij een steentje gaat bewegen is evenredig met het effectieve gewicht van een steentje onder water. De exacte relatie tussen de kritische snelheid en het effectieve gewicht van een korrel onder water dient experimenteel bepaald te worden.

In paragraaf 2.3 wordt het begin van bewegen van bodemmateriaal beschreven, zoals dat experimenteel vastgesteld is voor verschillende hydraulische omstandigheden.

2.3 Begin van bewegen van een steentje

2.3.1 Begin van bewegen door stromingsbelasting

Shields (1936) heeft onderzoek gedaan naar het begin van bewegen van zand door belasting van een uniforme stroming. Hij gebruikte als karakteristieke diameter de d_{50} van het materiaal en koos de schuifkracht als destabiliserende kracht op een korrel. De schuifspanning waarbij een korrel gaat bewegen is gegeven door:

$$\tau_{b,cr} = \rho_w u_{*c}^2 \dots \dots \dots (2-8)$$

Hierin is:

u_{*c} = de kritische schuifspanningssnelheid [m/s].

Shields ontdekte dat een steentje verplaatst wanneer de bodemschuifspanning groter is dan een kritische waarde. Een verplaatsing van een steentje treedt in dat geval op wanneer:

$$\Psi > \Psi_{cr} \dots \dots \dots (2-9)$$

Hierin is:

$$\Psi = \frac{\tau_{b,c}}{(\rho_s - \rho_w)gd} = \text{mobiliteitsparameter [-];}$$

$$\Psi_{cr} = \frac{\tau_{b,cr}}{(\rho_s - \rho_w)gd} = \text{kritieke mobiliteitsparameter, Shieldsparameter [-].}$$

Het resultaat van zijn onderzoek was een grafisch verband tussen het begin van bewegen (de Shieldsparameter) en de hydraulische eigenschappen aan de bodem (korrelReynolds-getal). De Shieldscurve staat weergegeven in Figuur 1-1.

Het korrelReynolds-getal is gegeven door:

$$Re_* = \frac{u_* d}{\nu} \dots \dots \dots (2-10)$$

In vergelijking (2-10) is:

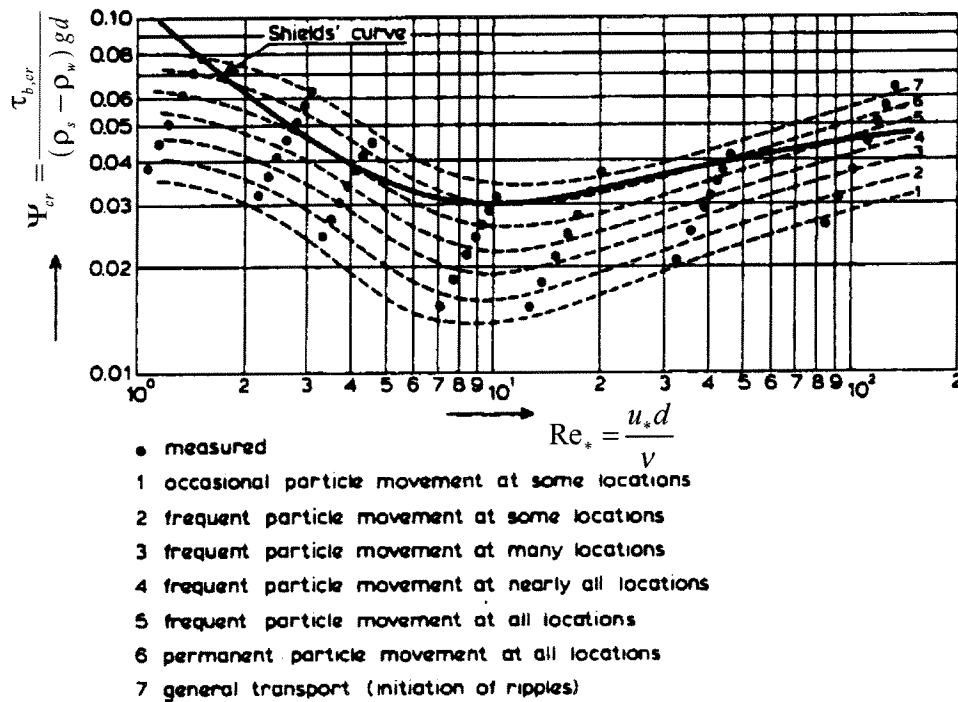
ν = kinematische viscositeit [m²/s];

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_{b,c}}{\rho_w}} = \text{schuifspanningssnelheid [m/s].}$$

Bij een mobiliteitsparameter kleiner dan de Shieldsparameter, dit is het gebied onder de curve, bewegen de korrels niet. Wanneer de mobiliteitsparameter groter is dan de Shieldsparameter bewegen de korrels wel. Oorspronkelijk gaf Shields geen doorgetrokken lijn maar een gebied waarin het begin van beweging plaats vindt. Voor dit onderzoek is het begin van bewegen van stortsteen van belang. Dit komt neer op grotere waarden van het korrelReynolds-getal ($Re_* > \text{ca. } 200$) waarbij de waarde van de Shieldsparameter constant is en 0,055 bedraagt.

Het WL heeft het begin van bewegen van sediment nader onderzocht. Het WL ontdekte dat de overgang tussen stilstand en beweging niet zo absoluut is als Shields veronderstelde. Ook bij een

mobilitetsparameter kleiner dan de Shieldsparameter verplaatsen er korrels. Het WL stelde 7 verschillende stabiliteitsniveaus op met een verschillend niveau van verplaatsingen. Zie daarvoor Figuur 2-2 waarin de verschillende niveaus aangegeven zijn.



Figuur 2-2: Verschillende stabiliteitsniveaus voor het begin van bewegen van bodemmateriaal (uit Van Rijn (1993))

Het blijkt dat het criterium dat Shields aanhiel, overeenkomt met niveau 5 van het WL: "Frequent particle movement at all locations" (Overall korrels 'aan de wandel'). De redenering van Shields dat er maar een stabiliteitsniveau te onderscheiden is, hangt samen met de manier waarop Shields het begin van bewegen voor een korrel heeft vastgesteld. Shields extrapoleerde gemeten transporten naar een nulwaarde en de stroomsnelheid of de bodemschuifspanning waarbij het transport nul zou moeten zijn, definieerde Shields als de kritische stroomsnelheid of kritische bodemschuifspanning.

Het begin van bewegen volgens Shields kan opgevat worden als het begin van sedimenttransport en de verplaatsingen die optreden bij een mobiliteitsparameter kleiner dan de Shieldsparameter, kunnen niet onderschat worden voor het ontwerpen van een bodemverdediging.

Wanneer bijvoorbeeld een bodemverdediging wordt ontworpen met de Shieldsparameter betekent dit, dat onder de ontwerpcondities overal stenen verplaatsen en dat is in het algemeen niet acceptabel.

Het is raadzaam om de toplaag van een bodemverdediging te ontwerpen met een lagere mobiliteitsparameter, bijvoorbeeld $\Psi=0,03$.

2.3.2 Begin van bewegen door golfbelasting

Net als bij belasting door een uniforme stroming hebben verschillende onderzoekers bekeken wanneer begin van bewegen van bodemmateriaal optreedt door belasting van golven.

Het grote verschil met de belasting door uniforme stroming is dat de belasting oscillerend is en dat de gemiddelde schuifspanning onder een symmetrische golf nul is. Wanneer er door de golven geen netto massatransport van water wordt veroorzaakt, dan is de verwachting dat het netto transport van bodemmateriaal ook nul is omdat steentjes wel heen en weer verplaatsen, maar hun plek aan de bodem nooit definitief kunnen verlaten.

Rance en Warren (1968)

Voor stortsteen is er waardevol onderzoek gedaan door Rance en Warren (1968). Rance en Warren hebben in een golftunnel experimenten gedaan met steentjes van 0,32 tot 2,5 cm. Zij noteerden bij welke amplitude en bij welke periode begin van bewegen van het bodemmateriaal optrad. Het resultaat van hun onderzoek is een grafisch verband waaruit af te leiden is bij welke amplitude een korrel bij een bepaalde golfperiode gaat bewegen.

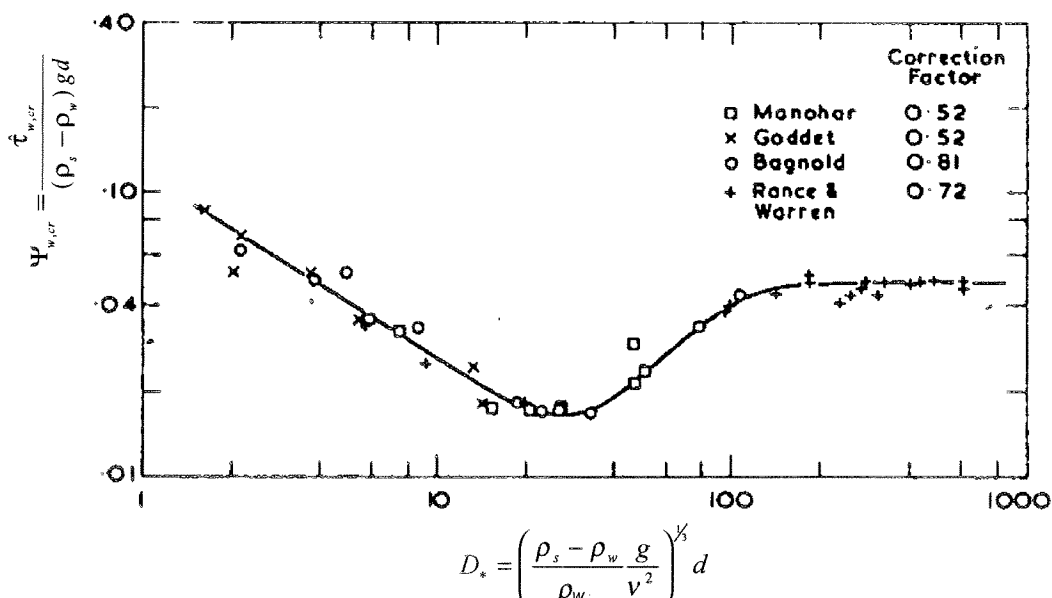
Zij hebben hun resultaten niet gekoppeld aan een schuifspanning of een mobiliteitsparameter. Er wordt geen verband gelegd tussen een kritische kracht of snelheid op de korrel en het begin van bewegen van een korrel. Het onderzoek geeft dus geen fundamenteel inzicht in het krachtenspel dat verplaatsen van steentjes veroorzaakt, maar geeft wel een duidelijk beeld bij welke amplitude een korrel bij een bepaalde golfperiode gaat bewegen.

Verschillende auteurs hebben vervolgens de resultaten van Rance en Warren gekoppeld aan een schuifspanning. In de literatuur zijn de volgende onderzoekers te vinden die geprobeerd hebben om het begin van bewegen te koppelen aan een schuifspanning.

Sleath (1978)

Sleath vond dat, wanneer de amplitude van de schuifspanning (dus de maximaal optredende schuifspanning) in de mobiliteitsparameter wordt gebruikt, begin van bewegen bij dezelfde Shieldsparameter plaats vindt als bij belasting door uniforme stroming. Dit betekent dat een korreltje onder golven gaat bewegen bij dezelfde schuifspanning als bij een uniforme stroming. Om het begin van bewegen te bepalen gaf hij een aangepaste Shieldscurve voor golven. Deze curve staat afgebeeld in Figuur 2-3, waarin op de x-as niet het getal van Reynolds¹ staat, zoals in de Shieldscurve, maar de dimensieloze diameter D_* . De dimensieloze diameter is gegeven door:

$$D_* = \left[\frac{g \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)}{v^2} \right]^{\frac{1}{3}} d \dots\dots\dots(2-11)$$



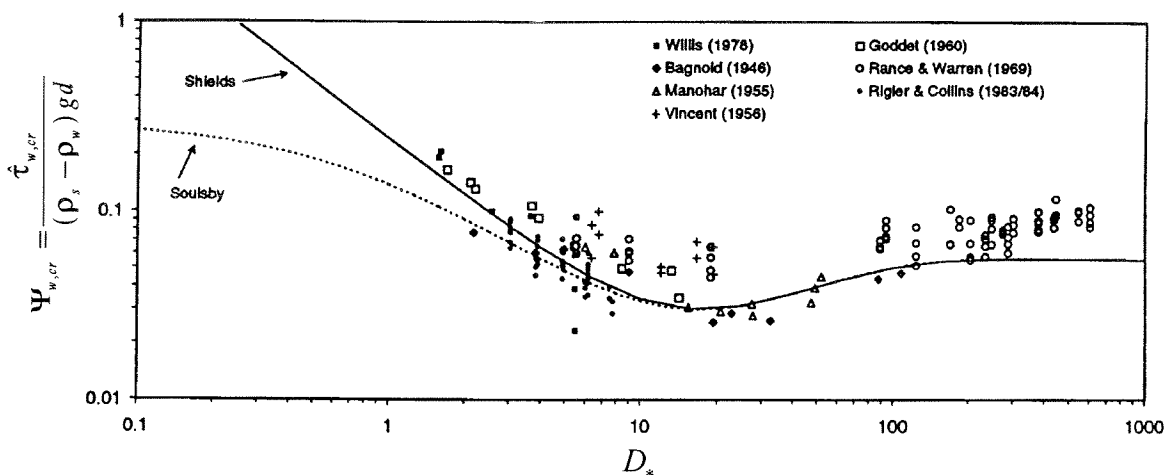
Figuur 2-3: Begin van bewegen door een oscillerende golfbelasting (uit Sleath (1978))

¹De originele presentatie van de resultaten van het onderzoek van Shields met de Shieldscurve (Figuur 1-1) heeft als nadeel dat de stromingsbelasting via de schuifspanningssnelheid (u_*) zowel in het Reynoldsgetal op de x-as staat, als in de Shieldsparameter op de y-as verwerkt is.

Dit betekent dat een iteratieproces noodzakelijk is om voor een bepaalde korreldiameter de kritische schuifspanningssnelheid te bepalen. Aangezien iedere korreldiameter zijn eigen specifieke kritische snelheid heeft is het mogelijk om op de x-as van de Shieldscurve een parameter (D_*) uit te zetten waar de stromingsbelasting niet in verwerkt is.

Soulsby en Whitehouse (1997)

Soulsby en Whitehouse hebben eveneens de data van Rance en Warren nader bestudeerd en zij komen tot een andere conclusie dan Sleath. Figuur 2-4 geeft het begin van bewegen volgens Soulsby en Whitehouse.



Figuur 2-4: Begin van bewegen door een oscillerende golfbelasting volgens Soulsby en Whitehouse (1997) op basis van meetresultaten van verschillende onderzoekers (uit Soulsby en Whitehouse (1997))

Wanneer in de mobiliteitsparameter de amplitude van de schuifspanning aan de bodem wordt ingevoerd, dan blijkt, voor golven bij waarden van $D_* > 100$ (het interessegebied van dit onderzoek), dat er pas bij een hogere Shieldsparameter dan volgens Sleath beweging van steentjes optreedt.

Soulsby en Whitehouse vermoeden op basis van de resultaten van Rance en Warren, dat niet de maximale schuifspanning (de amplitude), maar eerder een gemiddelde schuifspanning over een halve periode (=1/2 x de amplitude) of een root-mean-square waarde beter zou voldoen als parameter om het begin van bewegen aan te geven.

Deze veronderstelling spreekt de conclusies van Sleath tegen. Sleath heeft waarschijnlijk een lager criterium voor begin van bewegen aangenomen, omdat hij een correctiefactor van 0,72 toepast op de optredende mobiliteitsparameter uit het onderzoek van Rance en Warren. Wanneer die factor niet gebruikt wordt zijn de kritische mobiliteitsparameters in Figuur 2-3 en Figuur 2-4 gelijk.

De veronderstelling dat een gemiddelde schuifspanning en niet de amplitude van de schuifspanning van belang is wordt verder gestaafd door Van Rijn (1990).

Van Rijn heeft weliswaar niet de resultaten van Rance en Warren geanalyseerd, omdat hij alleen in sediment met kleinere diameters geïnteresseerd was, maar hij vond voor bodemmateriaal met kleinere diameters dat, wanneer in de mobiliteitsparameter de helft van de maximale schuifspanning wordt genomen, het begin van bewegen overeen komt met de Shieldscurve. Niet de maximale schuifspanning bepaalt het begin van bewegen, maar een soort gemiddelde schuifspanning over een halve golfperiode, die de helft van de amplitude van de schuifspanning bedraagt.

Uit de verschillen tussen de interpretaties van Soulsby en Whitehouse en Sleath blijkt dat het absoluut niet duidelijk is wat het verband is tussen een door de golf veroorzaakte schuifspanning op een korrel en het begin van bewegen van een korrel. De vraag of de schuifspanning nog wel een juiste maat voor de belasting op de bodem vormt, is gerechtvaardigd. Om antwoord op die vraag te geven is het noodzakelijk om dieper in te gaan op het krachtenspel op een steentje bij een oscillerende belasting.

Krachtenspel op een steentje bij een oscillerende belasting

Bij een eenparige stroming is het al twijfelachtig of fysisch gezien de schuifkracht op een korrel het verplaatsten van een korrel veroorzaakt, laat staan bij een oscillerende belasting, omdat er meer krachten een rol spelen bij het verplaatsten van een steentje (zie Figuur 2-1). Als denkmodel is het schuifspanningsconcept wel geschikt, omdat alle destabiliserende krachten toch evenredig zijn met u^2 .

Bij een oscillerende belasting speelt de traagheidskracht ook een belangrijke rol, omdat de stroming continu vertraagt en versnelt. Deze kracht is niet evenredig met u^2 , maar is gegeven door:

$$F_M \propto \rho C_M d^3 \frac{\partial u}{\partial t} \dots \dots \dots (2-12)$$

Hierin is:

- F_M = traagheidskracht [N];
- C_M = traagheidscoëfficiënt [-].

Uit een vergelijking tussen een afgeschatte waarde van één van de krachten evenredig met u^2 en een afgeschatte waarde van de traagheidskracht, blijkt dat de traagheidskracht niet zomaar verwaarloosd mag worden.

Stel dat een (laboratorium)golf met een periode van 1 s en met een amplitude van de orbitaalsnelheid aan de bodem van 0,4 m/s, een bolvormig steentje met een diameter van 0,01 m belast.

- De traagheidskracht, voor een bolvormig steentje, is dan gegeven door:

$$F_M = \rho_w C_M \left(\frac{\pi d^3}{6}\right) \frac{\partial u}{\partial t} \dots \dots \dots (2-13)$$

De traagheidscoëfficiënt wordt op 1,3 geschat (zie Sleath (1984), pg. 208). De maximale versnelling is gelijk aan de amplitude van de orbitaalsnelheid op de bodem vermenigvuldigd met de hoekfrequentie van de golf ($= 2\pi/1 = 6,28 \text{ s}^{-1}$) en bedraagt 2,5 m/s. Invullen van de overige waarden in formule (2-13) levert een maximale traagheidskracht van ca. $1,8 \cdot 10^{-3}$ N op.

- De sleepkracht (een kracht evenredig met u^2) kan voor een bolvormig steentje berekend worden met:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w C_D \left(\frac{\pi d^2}{4}\right) \bar{u}^2 \dots \dots \dots (2-14)$$

Naast de sleepkracht werken ook de lift- en schuifkracht op een steentje, maar hier is er voor gekozen om de sleepkracht te berekenen, omdat de waarde van de sleepcoëfficiënt voor een oscillerende belasting experimenteel vastgesteld is (zie Sleath (1984), pg. 208). Het is de bedoeling om slechts een indicatie van de grootte van de krachten te geven en het enige verschil met de overige krachten die evenredig zijn met u^2 , is de grootte van de lift-, wrijvings- of sleepcoëfficiënt. Voor de sleepcoëfficiënt wordt een constante waarde van 0,6 genomen. Wanneer i.p.v. de gemiddelde snelheid, de amplitude van de orbitaalsnelheid op de bodem wordt ingevuld in formule (2-14), dan is de sleepkracht maximaal ca. $3,8 \cdot 10^{-3}$ N.

De aanname dat de waarden van de coëfficiënten C_M en C_D constant zijn, klopt niet. In werkelijkheid zijn deze coëfficiënten Reynolds-afhankelijk en ze veranderen dus in de tijd onder invloed van de orbitaalsnelheid van de golf.

Deze schatting van de krachten toont aan dat de traagheidskracht niet verwaarloosd kan worden en dat een evenredigheid van de destabiliserende kracht met u^2 niet noodzakelijk hoeft te zijn. De grove schatting ondersteunt de opvatting van Soulsby en van Rijn dat de schuifkracht op zichzelf geen goede parameter meer is om de destabiliserende kracht op een korrel aan te geven.

De tijdsduur dat een belasting groter is dan een bepaalde kritische waarde is nu belangrijk en daarom kan een gemiddelde schuifspanning of een root-mean-square waarde een betere maat zijn voor de destabiliserende kracht op een korrel.

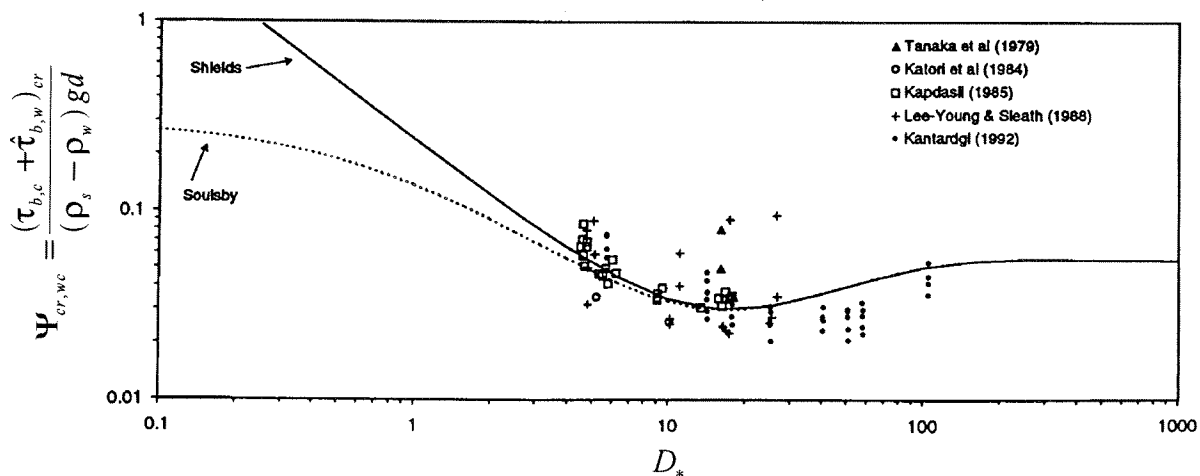
Het schuifspanningsconcept staat voor een oscillerende belasting duidelijk ter discussie, maar omdat er geen alternatieven voor handen zijn, wordt het algemeen toegepast, ook voor een oscillerende belasting.

Een ander aspect waardoor het schuifspanningsconcept ook als denkmodel minder geschikt zou kunnen zijn, is dat er door de oscillerende golfbeweging een wisselende horizontale drukgradiënt ontstaat. Deze drukgradiënt kan een extra destabiliserende kracht op de steentjes zijn en ook deze kracht is niet evenredig met u^2 . Een grove afschatting voor een golf met een periode van 1 s en een golfhoogte van 0,12 m op een waterdiepte van 0,3 m, laat zien dat het maximale drukverschil² over een steentje met een diameter van 0,01 m, maximaal 12,8 N/m² is. De kracht op een steentje veroorzaakt door een wisselende horizontale drukgradiënt bedraagt ca. $1,0 \cdot 10^{-3}$ N. De invloed van deze kracht is dus niet zonder meer verwaarloosbaar t.o.v. de overige krachten!

2.3.3 Begin van bewegen door een combinatie van golven en stromen

Er is op het gebied van begin van bewegen van stortsteen door een combinatie van golven en stromen niets bekend. Soulsby en Whitehouse (1997) geven een overzicht van de beschikbare gegevens voor materiaal met een dimensieloze diameter (D_*) kleiner dan 100; deze resultaten zijn dus niet geldig voor stortsteen!

Soulsby en Whitehouse analyseerden de resultaten van een vijftal onderzoekers die het begin van bewegen van bodemmateriaal door een belastingscombinatie van golven en stroming onderzocht hebben. Op basis van deze resultaten concludeerden Soulsby en Whitehouse dat, wanneer in de mobiliteitsparameter de som van de schuifspanning van de golf en de stroming genomen wordt, het begin van bewegen bij dezelfde Shieldsparameter optreedt als bij stroming alleen. Het verband tussen de dimensieloze diameter en het begin van bewegen van bodemmateriaal is weergegeven in Figuur 2-5. In de Shieldsparameter is de som van de schuifspanning t.g.v. de stroming en de amplitude van de schuifspanning t.g.v. de golf als belastingparameter verwerkt.



Figuur 2-5: Begin van bewegen door een belastingscombinatie van golven en stromen volgens Soulsby en Whitehouse (1997)

Het grafische verband uit Figuur 2-5 is slechts geldig voor bodemmateriaal met een dimensieloze diameter (D_*) tot 100, en om het begin van bewegen van stortsteen te bepalen is Figuur 2-5 niet bruikbaar.

Uit de spreiding van de punten in Figuur 2-5 blijkt verder dat het twijfelachtig is of de som van de schuifspanning van de stroming en de amplitude van de schuifspanning van de golf, die dimensieloos op de y-as is uitgezet, een juiste indicatie is voor het begin van bewegen van bodemmateriaal belast door een combinatie van golven en stroming. In hun artikel geven Soulsby

² Deze waarde is berekend door de drukverdeling op de bodem onder een sinusvormige golf te berekenen m.b.v. de lineaire golftheorie (zie bijvoorbeeld Battjes (1997), pg. 3.19). De berekende waarde is het maximale drukverschil dat optreedt over een afstand van 0,01 m op de bodem. Deze afstand is gelijk aan de diameter van het steentje. Door dit drukverschil te integreren over het oppervlakte van het steentje is de resulterende kracht op het steentje berekend.

en Whitehouse ook aan dat ze geen duidelijk concept voor ogen hebben, maar dat ze slechts een poging doen om een maat voor de belasting op de steentjes te vinden.

Het idee dat bij een combinatie van golven en stroming een korrel gaat bewegen als de schuifspanning groter is dan een kritische waarde, blijkt experimenteel nauwelijks ondersteund te worden. Het krachtenspel op een steentje is te complex en de schuifspanning op zich vormt geen goede indicatie voor de belasting op een korrel. Toch wordt het schuifspanningsconcept ook voor de belastingscombinatie van golven en stroming toegepast, omdat er geen alternatieven zijn die een meer bevredigend resultaat geven.

2.4 Transport van stortsteen

Voordat een opsomming wordt gegeven van de beschikbare theorieën waarmee voor verschillende belastingsgevallen voorspeld kan worden hoeveel transport er optreedt, is het noodzakelijk het begrip transport nader te definiëren.

Transport is de hoeveelheid verplaatste steentjes of korrels door een meetraai per eenheid van breedte en per eenheid van tijd. In het algemeen wordt de hoeveelheid verplaatst bodemmateriaal uitgedrukt in een volume of een gewicht. De eenheid van transport verschilt dus per onderzoeker of theorie. Door het transport dimensieloos weer te geven is het mogelijk meerdere onderzoeken met elkaar te vergelijken, maar voor het dimensieloos weergeven van het transport zijn meerdere oplossingen mogelijk. In dit onderzoek wordt het transport dimensieloos weergegeven door de volgende parameter:

$$\phi = \frac{q_s}{\sqrt{\Delta g d_{50}^3}} \dots\dots\dots(2-15)$$

Hierin is:

- ϕ = transportparameter [-];
- q_s = het volume verplaatst bodemmateriaal door een raai per eenheid van tijd en per eenheid van breedte [$m^3/m/s$].

Het transport door een raai is opgebouwd uit steentjes die bewegen in het gebied vóór de raai, opgepikt worden en over een bepaalde afstand door de raai heen verplaatsen. Er is dus een verband tussen transport, het oppikken van steentjes en de verplaatsingslengte.

Het oppikken van steentjes wordt omschreven door de pick-up rate: het aantal steentjes, uitgedrukt in volume of gewicht dat per eenheid van bodemoppervlakte en per eenheid van tijd verplaatst. De pick-up rate wordt in dit onderzoek dimensieloos weergegeven met de volgende vergelijking:

$$\phi_p = \frac{p_s}{\sqrt{\Delta g d_{50}}} \dots\dots\dots(2-16)$$

Hierin is:

- ϕ_p = pick-up parameter [-];
- p_s = het volume verplaatst bodemmateriaal per eenheid van oppervlakte en per eenheid van tijd [$m^3/m^2/s$].

Volgens van Rijn (1984) is het verband tussen transport, de pick-up rate en de verplaatsingslengte gegeven door:

$$\text{Transport} = \text{pick-up rate} * \text{verplaatsingslengte} \dots\dots\dots(2-17)$$

Vergelijking (2-17) gaat uit van drie aannamen:

- Het erodeerbare bed waar de meetraai zich in bevindt, is oneindig lang. Daardoor is er voldoende aanvoer van bodemmateriaal en speelt de plaats van de meetraai geen rol in de meting of de bepaling van het transport.
- De pick-up rate is over het gehele bed gelijk.
- De verplaatsingslengte van ieder steentje is gelijk.

Onder deze aannamen kunnen alleen steentjes uit een gebied vóór de raai met een lengte gelijk aan de verplaatsingslengte de raai bereiken. Het aantal steentjes dat door de raai heen verplaatst kan nu met vergelijking (2-17) bepaald worden.

In werkelijkheid verschilt de verplaatsingslengte per korrel en verschilt de pick-up rate per gebied. Wanneer echter over een langere periode gemiddeld wordt, moet gelden dat het gemiddelde transport door een raai gelijk is aan de gemiddelde pick-up rate maal de gemiddelde verplaatsingslengte.

Wanneer een transportformule voor stortsteen wordt gegeven, dan betekent dit, dat er impliciet ook iets over de pick-up rate en de verplaatsingslengte wordt gezegd, ook al is dat in de formule niet te herkennen. Daarom wordt in dit rapport niet alleen een overzicht gegeven van het transport van stortsteen onder een bepaalde hydraulische belasting, maar wordt daarna ook de theoretische achtergrond van de pick-up rate en de verplaatsingslengte gegeven.

2.4.1 Transport van stortsteen door stromingsbelasting

Er zijn legio transportformules beschikbaar waarin een verband wordt gelegd tussen de mobiliteitsparameter en een transportparameter. Sleath (1984) geeft een zeer duidelijke opsomming van de beschikbare formules. Bijna alle formules maken gebruik van een kritische mobiliteitsparameter waardoor transporten bij een kleinere mobiliteitsparameter dan de kritische mobiliteitsparameter verwaarloosd worden.

Eerder is al gesteld dat het begin van bewegen zoals dat door Shields vastgesteld is te absoluut is. Ook bij een mobiliteitsparameter kleiner dan de Shieldsparameter bewegen er steentjes. Voor een bodemverdediging is juist het transport rondom en voorbij het begin van bewegen van belang. Dit betekent dat standaardtransportformules niet geschikt zijn om een bodemverdediging te ontwerpen.

Paintal (1971) heeft de volgende transportformule gevonden:

$$\phi = 6,56 \cdot 10^8 \Psi^{16} \text{ voor } \Psi < 0,050 \dots \dots \dots (2-18)$$

$$\phi = 13\Psi^{2,5} \quad \text{voor } \Psi > 0,050 \dots \dots \dots (2-19)$$

De Boer (1998) en Forschelen (1999) hebben in hun afstudeeronderzoeken aangetoond dat deze formules goed bruikbaar zijn voor het afschatten van het stenen transport van een bodemverdediging. Wel wijst met name Forschelen erop dat het correct bepalen van de mobiliteitsparameter essentieel is.

Het Waterloopkundig Laboratorium (rapport M1115) heeft de formule van Paintal gecorrigeerd voor viskeuze effecten. De aangepaste Paintal-formule ziet er als volgt uit:

$$\phi = 1,64 \cdot 10^{10} \Psi^{10,86} \text{ voor } \Psi < 0,085 \dots \dots \dots (2-20)$$

De Paintal- en de WL-formule zijn de enige formules die het transport van stortsteen bij lage hydraulische belasting voorspellen.

2.4.2 *Transport van stortsteen door golfbelasting*

Het transport van bodemmateriaal onder regelmatige golven is nul als de snelheid aan de bodem symmetrisch (oscillerend) is. Tijdens een halve golfperiode kunnen de korrels wel verplaatsen, maar tijdens de volgende halve periode verplaatsen de korrels weer terug. Voor het transport van stortsteen onder een oscillerende golfbelasting is Sleath (1978) de enige die onderzoek heeft gedaan naar grover bodemmateriaal. Hij vond voor het transport dat optreedt tijdens een halve periode de volgende formule:

$$q_{b1/2} = 47\omega d^2 (\Psi_w - \Psi_{cr})^3 \text{ voor } d < 4,24 \text{ mm} \dots \dots \dots (2-21)$$

Hierin is:

- $q_{b1/2}$ = het volume verplaatst bodemmateriaal door een raai per eenheid van breedte en per eenheid van tijd, tijdens een halve golfperiode [m^2/s];
- ω = hoekfrequentie ($2\pi/T$) van de golf [s^{-1}];
- $\Psi_w = \frac{\hat{\tau}_{b,w}}{(\rho_s - \rho_w)gd_{50}}$ = de mobiliteitsparameter met de amplitude van de bodemschuifspanning [-];
- Ψ_{cr} = de kritische mobiliteitsparameter voor golven volgens Sleath, zoals gedefinieerd in Figuur 2-3 [-].

Het is de vraag of vergelijking (2-21) bruikbaar is voor dit onderzoek. In de eerste plaats is er in vergelijking (2-21) sprake van een kritische mobiliteitsparameter, terwijl de verwachting is dat er ook beneden de kritische waarde transporten op zullen treden. In de tweede plaats is vergelijking (2-21) slechts geldig voor bodemmateriaal met een diameter tot 4,24 mm en dit materiaal is niet representatief voor stortsteen.

Het interessante van vergelijking (2-21) is dat Sleath vond dat het transport en het begin van bewegen van steentjes afhankelijk is van de maximale schuifspanning, terwijl in paragraaf 2.3.2 gesteld is dat Soulsby en Whitehouse en Van Rijn vermoeden dat het begin van bewegen afhangt van een gemiddelde schuifspanning. In hoofdstuk 6 zal gekeken worden welke schuifspanning voor de belastingscombinatie van golven en stromen in dit onderzoek beweging veroorzaakt.

2.4.3 *Transport van stortsteen door een combinatie van golven en stromen*

Over het transport van stortsteen t.g.v. een belasting door golven en stroming is niets bekend. Voor zand is er een groot aantal transportformules opgesteld. Het transportmechanisme van zand is echter compleet anders dan het transportmechanisme van stortsteen.

Het grootste verschil is dat bij stortsteen alleen het rollend transport over de bodem een rol speelt, terwijl zand ook in suspensie getransporteerd kan worden. Het is dus onmogelijk om computermodellen of formules waarmee het totale transport van zand berekend kan worden, te gebruiken om het transport van stortsteen te bepalen.

Er bestaan ook formules voor fijn materiaal die bodemtransport en het totale transport apart voorspellen. De toepasbaarheid voor dit onderzoek is zeer beperkt, aangezien deze bodemtransportformules zijn afgeleid voor materiaal met een kleine diameter. Het is dus niet mogelijk om de bodemtransportformules voor fijn materiaal toe te passen om het transport van stortsteen te voorspellen.

De gedaante van de transportformules voor zand verschilt, maar alle bodemtransportformules geven een verband aan tussen een mobiliteitsparameter en het transport. In de mobiliteitsparameter is dan op een of andere manier een schuifspanning uit de golven en de stroming verwerkt. Bijker (1967) en van Rijn (1989) formuleerden allebei een methode waarmee het bodemtransport van zand, veroorzaakt door de belastingscombinatie van golven en stroming, voorspeld kan worden. De structuur van beide methoden is hetzelfde:

$$\text{bodemtransport} \propto \text{meevoeringparameter}(\tau_{b,c}) * \text{opwoelparameter}(\tau_{m,wc}) \dots \dots \dots (2-22)$$

Hierin is:

- $\tau_{b,c}$ = de schuifspanning veroorzaakt door de stroming [N/m^2];
- $\tau_{m,wc}$ = de gemiddelde schuifspanning veroorzaakt door de golf-stroming interactie [N/m^2].

Uit hun experimenten bleek dat de golf via de gemiddelde gecombineerde schuifspanning er voor zorgt dat materiaal wordt omgewoeld. De stroming zorgt ervoor dat het materiaal wordt meegevoerd.

Het is opvallend om te zien dat de gemiddelde schuifspanning veroorzaakt door golven en stroming als belasting op de steentjes wordt gebruikt. In hoofdstuk zes zal uitgezocht worden welke resulterende schuifspanning als een goede maat voor de belasting kan worden beschouwd.

Alle onderzoekers proberen op een of andere manier de schuifspanning veroorzaakt door golven en stromen te koppelen aan een transport door middel van experimentele resultaten. Het schuifspanningsverloop op de bodem veroorzaakt door de combinatie van golven en stromen is echter nog niet eenduidig bepaald. Daarom wordt in hoofdstuk 3 uitgelegd hoe de schuifspanning varieert door de combinatie van golven en stroming.

2.4.4 Pick-up functies

Het onderzoek naar de pick-up van steentjes uit een bed is duidelijk nog in ontwikkeling, hoewel het een belangrijk onderdeel vormt van het transportproces. Er zijn een aantal theorieën opgesteld voor de belasting door een uniforme stroming, maar de toetsing van deze theorieën aan meetdata is schaars.

In deze modellen wordt de pick-up rate weergegeven als verplaatste massa per eenheid van oppervlak en eenheid van tijd. Het symbool van de pick-up parameter is E.

Einstein (1950) stelde een model op waar bij de pick-up afhankelijk is van de kans dat een deeltje opgepikt wordt. Deze kans is afhankelijk van de mobiliteitsparameter. Einstein vond dat:

$$E = \alpha \rho_s \sqrt{\Delta g d_{50}} P \dots\dots\dots(2-23)$$

Hierin is:

- E = pick-up rate [$kg/m^2/s$];
- P = kans dat een korrel bij een bepaalde belasting wordt opgepikt [-];
- α = coëfficiënt [-].

Yalin (1977) vermoedde dat de pick-up afhing van de schuifspanningssnelheid:

$$E = \alpha \rho_s u_* P \dots\dots\dots(2-24)$$

In vergelijking (2-24) is:

- E = pick-up rate [$kg/m^2/s$];
- P = kans dat een korrel bij een bepaalde belasting verplaatst. P is afhankelijk van de mobiliteitsparameter [-].

De bovenstaande theorieën zijn modellen en blijken niet goed te voldoen aan gemeten waarden. Voor stortsteen is er een onderzoek dat waardevol is. Nagakawa en Tsujimoto (1980) analyseerden de meetdata van een aantal onderzoekers. De mobiliteitsparameter varieerde in die onderzoeken tussen 0,03 en 0,2 en de mediane diameter van het korrelmateriaal varieerde van 3 tot 13,5 mm. Op basis van de meetgegevens van andere onderzoekers vonden zij een deterministische uitdrukking voor een pick-up functie:

$$E = \alpha \rho_s \sqrt{\Delta g d_{50}} \left(1 - \frac{0,035}{\Psi}\right)^3 \Psi \text{ voor } 0,035 < \Psi < 0,2 \dots\dots(2-25)$$

Hierin is:

$$\alpha = 0,03 [-].$$

Formule (2-25) is om te schrijven tot een verband tussen de dimensieloze pick-up parameter ϕ_p en de mobiliteitsparameter:

$$\phi_p = \frac{E}{\rho_s \sqrt{\Delta g d_{50}}} = \alpha \left(1 - \frac{0,035}{\Psi} \right)^3 \Psi \dots\dots\dots (2-26)$$

Voor de pick-up rate van stortsteen door een belasting van golven en stromen is niets bekend.

2.4.5 Verplaatsingslengte van bewegende korrels

Volgens vergelijking (2-17) is het transport recht evenredig met de verplaatsingslengte van een korrel.

De verplaatsingslengte van het bodemmateriaal speelt een belangrijke rol in de hoeveelheid transport die optreedt bij een bepaalde hydraulische belasting.

De theorie en onderzoeken over de verplaatsingslengte hebben een duidelijke ontwikkeling in de tijd doorgemaakt.

Einstein (1950) stelde dat, onafhankelijk van de belasting, de verplaatsingslengte van een korrel 100 keer de diameter bedroeg. Yalin (1977) stelde dat de verplaatsingslengte afhing van de belasting op een korrel en vond een evenredigheid tussen de verplaatsingsafstand en de mobiliteitsparameter.

Van Rijn (1984) vond dat de verplaatsingslengte met vergelijking (2-27) redelijk voldeed aan meetresultaten:

$$\frac{\lambda_b}{d} = 3D_*^{0,6} T^{0,9} \dots\dots\dots (2-27)$$

In vergelijking (2-27) is:

λ_b = de verplaatsingslengte van een korrel over de bodem [m];

$$T = \frac{\tau_{b,c} - \tau_{b,cr}}{\tau_{b,cr}} = \text{schuifspanningsparameter} [-].$$

Deze uitdrukking is voor dit onderzoek niet bruikbaar, omdat vergelijking (2-27) slechts getoetst is voor bodemmateriaal met een diameter van 1,9 mm en het concept van een kritische schuifspanning wordt toegepast, terwijl het interessegebied van dit onderzoek bij transportverschijnselen rondom de kritische schuifspanning ligt.

De Boer (1998) doet in zijn afstudeerrapport uitgebreid verslag van de in zijn onderzoek optredende verplaatsingslengten van steentjes. Hij concludeerde dat er afhankelijk van de belasting een spreiding in de verplaatsingsafstanden is en bracht een onderscheid aan tussen een afstand die door 50% van de steentjes onderschreden wordt en een afstand die door 90% van de steentjes onderschreden wordt. Empirisch leidde hij de volgende verbanden af:

$$\frac{X_{s,50}}{d_{n50}} = 1 \cdot 10^8 \Psi^{5,9} \text{ voor } 0,04 < \Psi < 0,07 \dots\dots\dots (2-28)$$

$$\frac{X_{s,90}}{d_{n50}} = 1 \cdot 10^6 \Psi^{3,55} \text{ voor } 0,04 < \Psi < 0,07 \dots\dots\dots (2-29)$$

Hierin is:

$X_{s,50}$ = de verplaatsingsafstand die door 50% onderschreden wordt [m];

$X_{s,90}$ = de verplaatsingsafstand die door 90% onderschreden wordt [m].

d_{n50} = nominale mediane diameter [m]

Alle in deze paragraaf genoemde theorieën gelden alleen voor belasting door een uniforme stroming. Het is de vraag of deze formules ook gelden voor belasting door golven en stromen. In hoofdstuk 6, de analyse van de resultaten van de experimenten, worden de verplaatsingslengten in dit onderzoek uitgewerkt.

In dit hoofdstuk is duidelijk geworden dat het transportproces opgebouwd is uit het oppikken van steentjes (de pick-up rate, zie 2.4.4) en het verplaatsen van steentjes (verplaatsingslengte, zie 2.4.5). Voor de combinatie van golven en stroming zijn alle aspecten van het transportproces voor stortsteen nog onbekend. Daarom zijn er experimenten uitgevoerd in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Technische Universiteit Delft, die meer informatie moeten verschaffen over transport, pick-up rate en verplaatsingslengte van stortsteen ten gevolge van een belastingscombinatie van golven en stroming. In hoofdstuk 6 wordt vergeleken in hoeverre formules die afgeleid zijn voor een uniforme stroming te vergelijken zijn met de resultaten van dit onderzoek.

3 Interactie tussen golven en stroming

3.1 Inleiding

In hoofdstuk 2 is uiteengezet dat in veel theorieën over het transport van bodemmateriaal of in transportformules de schuifspanning op de bodem, die veroorzaakt wordt door de waterbeweging, wordt gebruikt om de belasting op de korrels weer te geven. Hoewel in een uniforme stroming alle krachten op een korrel evenredig zijn met het kwadraat van de stroomsnelheid, is de schuifkracht misschien niet de oorzaak dat een korrel verplaatst, maar wel een goede parameter voor de belasting op de korrels.

Voor een oscillerende waterbeweging is het twijfelachtig of de schuifspanning nog een goede maat voor de destabiliserende kracht op de steentjes is, aangezien het krachtenspel op een steentje in een oscillerende waterbeweging wezenlijk verschilt van het krachtenspel op een korrel in een uniforme stroming. Toch geven alle theorieën en formules een verband tussen schuifspanning en een transportverschijnsel, zoals bijvoorbeeld de verplaatsingsafstand, het begin van bewegen of het transport van bodemmateriaal.

Het is dus essentieel dat voor het bestuderen en verklaren van transportverschijnselen die veroorzaakt worden door een belastingscombinatie van golven en stroming, een goede beschrijving wordt gegeven van het schuifspanningsverloop aan de bodem.

De golven en de stroming beïnvloeden elkaar wederzijds. Zo heeft de stroming, wanneer deze dezelfde richting heeft als de voortplantingsrichting van de golf, de neiging de golflengte te vergroten (Doppler-effect) en de golfhoogte te verminderen. Deze twee effecten waren tijdens het experimentele gedeelte van dit onderzoek duidelijk merkbaar en zijn meegenomen door de lokale golfhoogte te meten en de golflengte te bepalen uit de aangepaste dispersierelatie:

$$\omega = \sigma + k\bar{u} = \sqrt{gk \tanh(kh)} + k\bar{u} \dots\dots\dots(3-1)$$

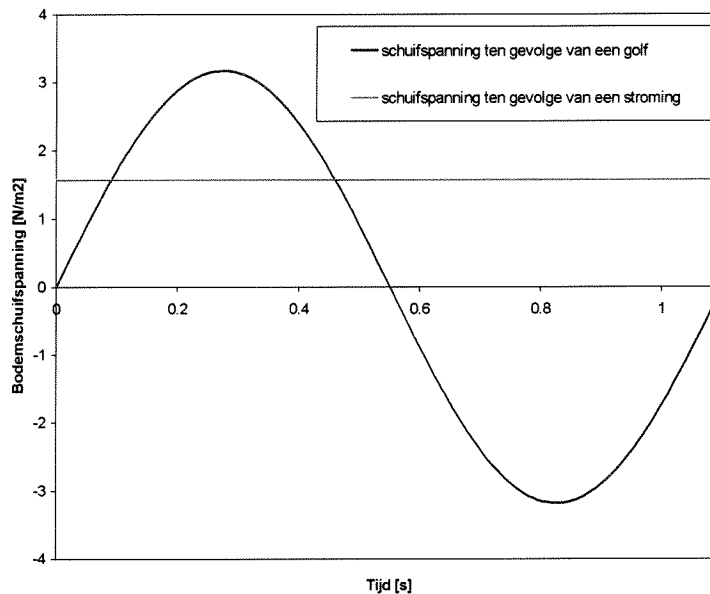
Hierin is:

- ω = hoekfrequentie t.o.v. een vast assenstelsel [s^{-1}];
- σ = relatieve hoekfrequentie: hoekfrequentie t.o.v. een met snelheid \bar{u} meebewegend assenstelsel [s^{-1}];
- k = golfgetal [m^{-1}];
- \bar{u} = gemiddelde stroomsnelheid van het water [m/s];
- h = waterdiepte [m].

De schuifspanning aan de bodem bestaat uit twee componenten.

De eerste component bestaat uit de bijdrage van de schuifspanning ten gevolge van de stroming. Wanneer de turbulente fluctuaties uitgemiddeld worden, kan men de schuifspanning ten gevolge van de stroming als constant beschouwen.

De tweede component is de bijdrage van de schuifspanning ten gevolge van de golf. Bij de lineaire golftheorie heeft deze schuifspanning een in de tijd sinusvormig verloop. In Figuur 3-1 staan beide componenten van de totale schuifspanning aan de bodem afgebeeld en in paragraaf 3.2 wordt uitgelegd hoe voor een stroming en een golf afzonderlijk, de schuifspanning op de bodem kan worden bepaald.



Figuur 3-1: Componenten waaruit de schuifspanning op de bodem opgebouwd is.

Uit onder meer de experimentele resultaten van Kemp en Simons (1982) blijkt dat er een niet-lineaire interactie is tussen de schuifspanning ten gevolge van de golf en die ten gevolge van de stroming. De vraag is welk resulterend schuifspanningsverloop er ontstaat door de belastingscombinatie van golven en stroming.

Naar de interactie tussen golven en stroming is veel onderzoek gedaan. De kennis over de interactie tussen golven en stroming en het resulterende schuifspanningsverloop is opgebouwd uit experimentele resultaten en mathematische modellen die de interactie tussen golven en stroming beschrijven en al dan niet door meetdata ondersteund zijn.

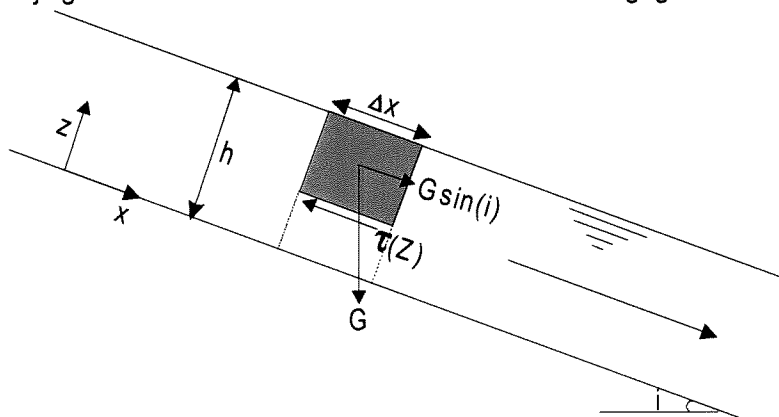
In paragraaf 3.3 worden de experimentele resultaten van Kemp en Simons besproken, waarna in paragraaf 3.4 een overzicht wordt gegeven van de meest gangbare mathematische modellen, die de interactie tussen golven en stroming beschrijven.

3.2 Schuifspanning voor golven en stroming afzonderlijk

3.2.1 Schuifspanning op de bodem door eenparige stroming

De schuifspanning op de bodem van een waterloop in een eenparige stroming kan eenvoudig afgeleid worden uit het krachterevenwicht van een waterpakketje in de stroming.

De schuifspanning op een waterpakketje moet evenwicht maken met de component van het gewicht van het water evenwijdig aan de bodem. Dit krachterevenwicht is weergegeven in Figuur 3-2.



Figuur 3-2: Schuifspanning in een eenparige stroming

In Figuur 3-2 is:

G = gewicht van het waterpakketje [N];

i = bodemverhang [-];

$\tau(z)$ = schuifspanning op een hoogte (z) boven de bodem [N/m^2].

Krachtenevenwicht op het waterpakketje vereist dat:

$$\tau(z)\Delta x = \rho g \Delta x (h - z) \sin(i) \dots\dots\dots(3-2)$$

Aangezien i klein is, geldt:

$$\sin(i) = i \dots\dots\dots(3-3)$$

Waarna volgt dat:

$$\tau(z) = \rho g (h - z) i \dots\dots\dots(3-4)$$

De schuifspanning neemt dus lineair toe van 0 in het wateroppervlak tot de waarde $\tau_{b,c}$ aan de bodem.

Voor de bodemschuifspanning ($\tau_{b,c}$) volgt dat:

$$\tau_{b,c} = \rho g h i \dots\dots\dots(3-5)$$

Wanneer vergelijking (3-5) gecombineerd wordt met de Chezy-formule voor het verhang,

$$i = \frac{\bar{u}^2}{C^2 h} \dots\dots\dots(3-6)$$

kan de bodemschuifspanning aan de dieptegemiddelde snelheid worden gekoppeld via de volgende uitdrukking:

$$\tau_{b,c} = \frac{\rho g \bar{u}^2}{C^2} = \rho \lambda \bar{u}^2 \dots\dots\dots(3-7)$$

De Chezy-coëfficiënt (C) is, voor een hydraulisch ruwe situatie, gegeven door:

$$C = 181 \log\left(12 \frac{h}{k_s}\right) \dots\dots\dots(3-8)$$

In vergelijking (3-8) is:

k_s = maat voor de ruwheid [m].

De snelheidsverdeling in een eenparige stroming kan goed worden beschreven met een logaritmisches profiel:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \dots\dots\dots(3-9)$$

Hierin is:

- κ = constante van von Kármán [-];
- u_* = schuifspanningssnelheid = $u(e \cdot z_0) \kappa$ [m/s];
- z_0 = de hoogte waarop de snelheid nul is [m].

De bodemschuifspanning kan ook worden berekend door:

$$\tau_{b,c} = \rho u_*^2 \dots\dots\dots(3-10)$$

3.2.2 Schuifspanning op de bodem door golfbelasting

De schuifspanning op de bodem onder een symmetrische sinusvormige golf is eveneens sinusvormig. De amplitude van de schuifspanning hangt af van de amplitude van de snelheid aan de bodem:

$$\hat{\tau}_{b,w} = \frac{1}{2} \rho f_w \hat{u}_{b,w}^2 \dots\dots\dots(3-11)$$

In deze vergelijking is:

- f_w = wrijvingscoëfficiënt onder golven [-];
- $\hat{u}_{b,w}$ = amplitude van de snelheid aan de bodem [m/s].

In de lineaire golftheorie is de amplitude van de snelheid op de bodem gegeven door:

$$\hat{u}_{b,w} = \omega a_b = \omega \frac{H}{2 \sinh kh} \dots\dots\dots(3-12)$$

Hierin is:

- a_b = amplitude van de orbitaalbeweging aan de bodem [m];
- H = golfhoogte [m].

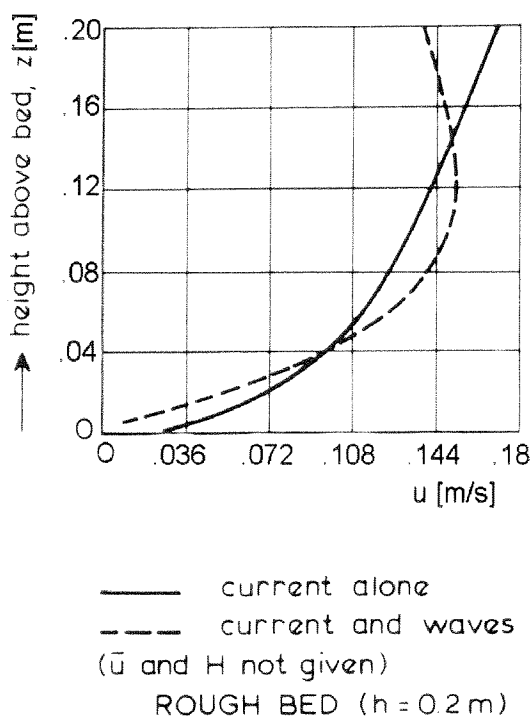
Om uiteindelijk de schuifspanning op de bodem te kunnen bepalen is het noodzakelijk een wrijvingscoëfficiënt onder golven vast te stellen. Swart (1974) heeft op basis van meetgegevens en een theoretische opzet uit het onderzoek van Jonnson (1966) een eenvoudige formule opgesteld voor de wrijvingscoëfficiënt onder golven.

$$\ln(f_w) = -5,977 + 5,213 \left(\frac{a_b}{k_s} \right)^{-0,194} \text{ voor } a_b/k_s > 1,57 \dots(3-13)$$

Formule (3-13) is alleen geldig voor een ruwe bodem onder turbulente omstandigheden.

3.3 Experimentele resultaten

Twee van de vele onderzoekers die de interactie tussen golven en stroming hebben onderzocht zijn Kemp en Simons (1982). Zij vonden bij hun proeven voor een ruw bed dat in het geval van combinatie van golven en stroming, de gemiddelde snelheid, uitgemiddeld over een duur van 180 golven, dichtbij de bodem en aan het wateroppervlak afnam ten opzichte van de experimenten zonder golven. Halverwege de waterdiepte neemt de gemiddelde snelheid juist toe. De golven hebben dus een duidelijke invloed op de snelheidsverdeling, en het gemiddelde snelheidsprofiel -uitgemiddeld over de duur van 180 golven- ziet er bij een combinatie van golven en stromen anders uit (zie Figuur 3-3) dan voor een stroming alleen.



Figuur 3-3: Over de tijd gemiddelde snelheid uitgezet tegen de waterdiepte voor een stroming met en zonder golven (naar Van Rijn (1993))

De afname van de over de tijd gemiddelde snelheid aan de bodem wordt veroorzaakt door de extra turbulentie die door de golf opgewekt wordt. De stroming ondervindt dus een grotere weerstand. Dit wordt uitgedrukt in een schijnbare ruwheid (k_a), die niet aan de afmetingen van het bodemmateriaal gekoppeld kan worden, omdat de schijnbare ruwheid alleen maar de extra weerstand weergeeft die de stroming ondervindt door de turbulentie van de golven.

De invloed van de golven is niet alleen merkbaar in het snelheidsprofiel maar heeft ook invloed op de schuifspanning op de bodem.

De gemiddelde schuifspanning die afgeleid werd uit het gemiddelde snelheidsprofiel was in sommige gevallen 2 keer zo hoog als de waarde voor de schuifspanning zonder golf. Uit de experimenten blijkt duidelijk dat er sprake is van een niet-lineaire interactie tussen golven en stroming.

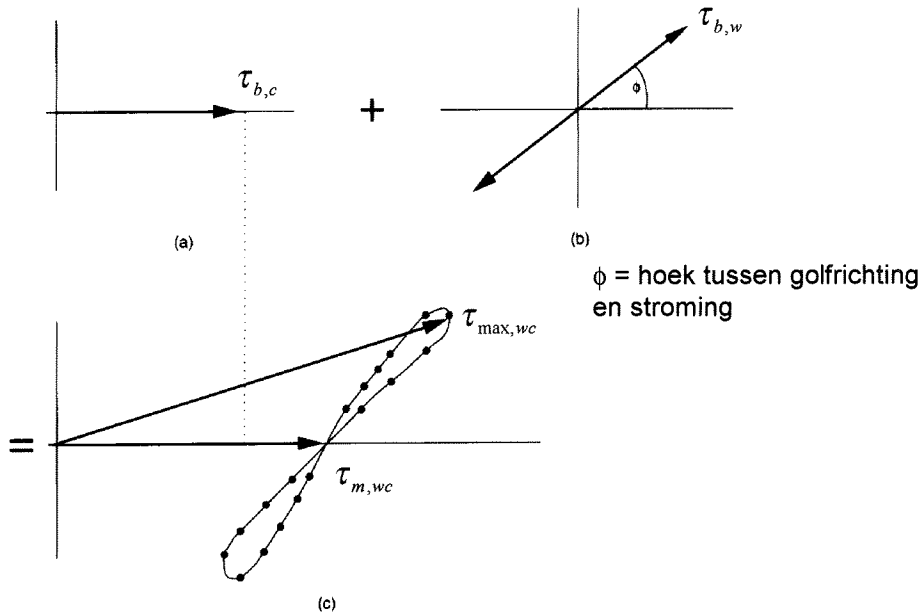
Immers, wanneer de interactie tussen de schuifspanning aan de bodem ten gevolge van de stroming en de oscillerende schuifspanning van de golf lineair was geweest, dan had moeten gelden dat de gemiddelde schuifspanning aan de bodem gelijk was aan de schuifspanning van de stroming.

Voor de maximaal optredende schuifspanning op de bodem moet bij lineaire interactie gelden dat deze gelijk is aan de som van de schuifspanning ten gevolge van de stroming en de amplitude van de schuifspanning ten gevolge van de golf. De maximale schuifspanning aan de bodem blijkt veel groter te zijn dan op grond van een lineaire interactie kan worden verwacht.

De niet-lineaire interactie tussen golven en stroming is grafisch weergegeven in Figuur 3-4. In Figuur 3-4 staat afgebeeld dat de resulterende schuifspanning uit twee componenten bestaat: (a) de schuifspanning aan de bodem ten gevolge van de stroming ($\tau_{b,c}$) en (b) de oscillerende schuifspanning ten gevolge van de golf ($\tau_{b,w}$). Uit het verloop van de resulterende schuifspanning, de met een lijn verbonden punten in deel (c), blijkt dat de gemiddelde schuifspanning ($\tau_{m,wc}$) ten gevolge van de golf-stroming interactie niet gelijk is aan de schuifspanning ten gevolge van de stroming ($\tau_{b,c}$, de gestippelde lijn van deel (a) naar deel (c)), maar dat de gemiddelde schuifspanning ten gevolge van de golf-stroming interactie groter is.

De maximale schuifspanning ten gevolge van de golf-stroming interactie is groter dan $\tau_{b,c} + \tau_{b,w}$.

Voor dit onderzoek geldt dat de hoek (ϕ), tussen de voortplantingsrichting van de golven en de stroming, nul graden bedraagt.



Figuur 3-4: Schematische weergave van de niet-lineaire interactie tussen de schuifspanning ten gevolge van een golf en de schuifspanning ten gevolge van een stroming (uit Soulsby (1993))

De interactie van de schuifspanning van de golf en de stroming is niet-lineair en dat wordt veroorzaakt door een niet-lineaire interactie van de grenslaag van de stroming en de grenslaag van de golf. De grenslagen van een golf en een stroming hebben een niet-lineaire interactie op elkaar omdat ze gedomineerd worden door turbulente schuifspanningen en in het algemeen is de opwekking van turbulentie een niet-lineair verschijnsel.

3.4 Theoretische modellen voor golf-stroming interactie

De modellen die de interactie tussen golven en stromen beschrijven spitsen zich allemaal toe op de manier waarop de grenslaag van de golf de grenslaag van de stroming beïnvloedt. De twee belangrijkste randvoorwaarden zijn voor alle modellen gelijk:

1. De golf wordt buiten de grenslaag geschematiseerd tot een potentiaalstroming over de hele diepte.
2. De golfpotentiaalstroming ondervindt geen invloed van de uniforme stroming en daarom worden buiten de grenslaag de stroming en de golf apart beschreven.

De verschillen tussen de modellen ontstaan in de manier waarop ze de turbulentie in de grenslaag beschrijven. Daarbij speelt de manier waarop het model het sluitingsprobleem van de Reynoldse vergelijking oplost een belangrijke rol. In de aanpak waarmee het sluitingsprobleem van de Reynoldse vergelijking opgelost wordt, kan iedere onderzoeker zijn opvatting over de interactie tussen golven en stroming in de grenslaag verwerken. Het sluitingsprobleem wordt in de volgende subparagraaf verder uitgewerkt.

3.4.1 Het sluitingsprobleem van de Reynoldse vergelijkingen

Stromingen in de waterbouw zijn (bijna) altijd turbulent, dat wil zeggen dat de beweging van de waterdeeltjes in de stroming wordt gekenmerkt door een warrige en driedimensionale beweging. Een ander kenmerk van de turbulentie in een stroming is dat door de onvoorspelbaarheid een statistische aanpak noodzakelijk is om de mate van turbulentie af te schatten.

Een veel gebruikte methode om de turbulentie statistisch te beschrijven is de ensemblemiddeling. De ensemblemiddeling bestaat uit een middeling over de tijd voor een ensemble van mogelijke snelheden. De stroming is nu op te vatten als een toevallige realisering uit het ensemble.

De snelheid in een bepaald punt is te beschrijven als de som van het tijdsgemiddelde en een fluctuatie t.o.v. het tijdsgemiddelde, zie vergelijking (3-14).

$$u = \bar{u} + u' \dots\dots\dots (3-14)$$

Wanneer uitdrukking (3-14) wordt ingevuld voor de snelheid in de Navier-Stokes-vergelijking, dan resulteert, na middeling over de tijd en na combinatie met de continuïteitsvergelijking, de zogenaamde Reynoldse vergelijking:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (3-15)$$

De laatste term in de Reynoldse vergelijking geeft de Reynolds-spanningen weer die veroorzaakt worden door de turbulente fluctuaties in een stroming. Voor een gedetailleerdere omschrijving van turbulentie in de waterbouwkunde wordt verwezen naar Booij (1992). Doordat over de tijd is gemiddeld is informatie over de turbulentie geëlimineerd. Er zijn te weinig vergelijkingen om (3-15) op te lossen. Dit wordt het sluitingsprobleem genoemd. Een veel gebruikte aanpak voor oplossing van het sluitingsprobleem is (citaat uit Booij (1992, pg. 37): "Een aanname van een gradiënt-type transport, d.w.z. een aanname dat de turbulente transporten evenredig zijn met de gradiënten van de betreffende hoofdstromen". Dit betekent dat er bijvoorbeeld een verband tussen de gemiddelde snelheid en de hoeveelheid turbulentie wordt gegeven.

Een veel gebruikte oplossing wordt verkregen door het toepassen van een turbulente viscositeit. De turbulente viscositeit is een parameter die aangeeft hoe de schuifspanning afhangt van een snelheidsgradiënt. De schuifspanning is dan gegeven door:

$$\tau = \rho(\nu + \nu_t) \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \dots\dots\dots (3-16)$$

Hierin is:

ν = moleculaire kinematische viscositeit [m^2/s];

ν_t = de turbulente kinematische viscositeit = $f \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)$ [m^2/s].

3.4.2 Beschrijving elementaire modellen

Grofweg zijn er twee aanpakken te onderscheiden in de manier waarop voor golf-stroming interactiemodellen het sluitingsprobleem van de Reynoldse vergelijking wordt opgelost. De eerste aanpak betreft de oudere modellen die gebruik maken van een in de tijd constante turbulente viscositeit. Deze modellen berekenen schuifspanningen door een aanname te doen over de turbulente viscositeit. De tweede aanpak betreft de modernere theorieën die gebruik maken van een hogere orde turbulentietheorie.

Voor een beschrijving van de beschikbare golf-stroming interactiemodellen wordt verwezen naar Van Rijn (1993). In dit rapport is er voor gekozen om slechts drie theorieën, namelijk de theorieën van Bijker, Grant-Madsen en Fredsoe, kort te omschrijven. Dit is gedaan omdat bestudering van alle golf-stroming interactietheorieën te ver voert binnen de beperkte duur van het afstuderen. De beschrijving van de turbulentie in de grenslaag is een ingewikkeld onderwerp, veel literatuur is moeilijk toegankelijk en het is zeer lastig om te concluderen welke theorieën het "beste" resultaat zullen geven.

De keuze om de theorieën van Grant-Madsen en Fredsoe te beschrijven is gebaseerd op het oordeel van Soulsby (1997) en Van Rijn (1993), die beide stellen dat deze modellen een redelijke schatting van de schuifspanning op de bodem geven, vergeleken met experimenteel vastgestelde

waarden van de gemiddelde schuifspanningen ten gevolge van een belastingscombinatie van golven en stroming.

Het model van Bijker wordt als eerste besproken, omdat dit model op eenvoudige wijze het resulterende schuifspanningsverloop op de bodem omschrijft, hoewel het model fysisch gezien te kort schiet.

In de tijd constante 'turbulente viscositeit' modellen

Bijker (1967) stelde als eerste een model op voor de interactie tussen golven en stroming. Het model is gebaseerd op het "mengweg lengte" concept. Hij veronderstelde dat zowel voor de snelheidsverdeling onder de golf als voor de snelheidsverdeling in de stroming een logaritmsch profiel in de grenslaag gold. Op een hoogte $z' = ez_0$ telt hij de schuifspanning van de stroming en de golf bij elkaar op.

Het resultaat van Bijker is een aantal formules (3-17, 3-18 en 3-19), waarmee op betrekkelijk eenvoudige wijze het schuifspanningsverloop, de gemiddelde schuifspanning en de maximale schuifspanning kan worden bepaald.

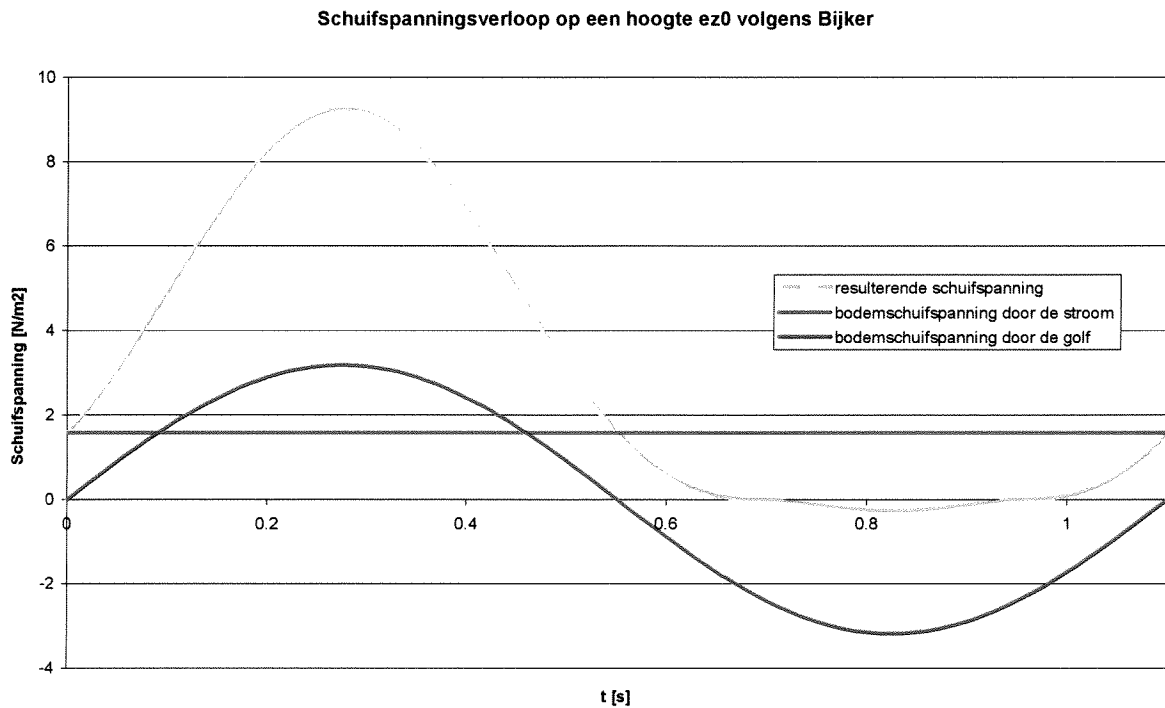
De schuifspanning voor een stroming met dezelfde richting als de voortplantingsrichting van de golven is volgens Bijker gegeven door:

$$\tau_{b,wc}(t) = \tau_{b,c} \left(1 + \xi \frac{\hat{u}_{b,w}}{\bar{u}} \sin(\omega t) \right) \sqrt{1 + \xi^2 \frac{\hat{u}_{b,w}^2}{\bar{u}^2} \sin^2(\omega t) + 2 * \xi \frac{\hat{u}_{b,w}}{\bar{u}} \sin(\omega t)} \dots\dots (3-17)$$

In vergelijking (3-17) is:

$$\xi = C \sqrt{\frac{f_w}{2g}} = \text{Bijker parameter [-].}$$

Figuur 3-5 geeft, ter illustratie, een voorbeeld van het schuifspanningsverloop zoals dat met vergelijking (3-17) berekend kan worden op basis van de afzonderlijke schuifspanningen ten gevolge van de golf en de stroming.



Figuur 3-5: Resultierend schuifspanningsverloop volgens Bijker

De maximale en de gemiddelde schuifspanning over een golfperiode zijn gegeven door:

$$\tau_{wc,max} = \tau_{b,c} \left(1 + \xi \frac{\hat{u}_{b,w}}{\bar{u}}\right) \sqrt{1 + \xi^2 \frac{\hat{u}_{b,w}^2}{\bar{u}^2} + 2 * \xi \frac{\hat{u}_{b,w}}{\bar{u}}} \dots\dots(3-18)$$

$$\tau_{m,wc} = \tau_{b,c} + \frac{1}{2} \hat{\tau}_{b,w} \dots\dots\dots(3-19)$$

Hierin is:

- $\tau_{b,c} = \rho g \frac{\bar{u}^2}{C^2} = \rho \lambda \bar{u}^2$ = schuifspanning ten gevolge van een uniforme stroming [N/m²];
- $\hat{\tau}_{b,w} = \frac{1}{2} \rho f_w \hat{u}_{b,w}^2$ = amplitude van de schuifspanning aan de bodem ten gevolge van de golf [N/m²];
- $\tau_{wc,max}$ = maximale schuifspanning ten gevolge van de combinatie van golven en stroming [N/m²];
- $\tau_{m,wc}$ = gemiddelde schuifspanning ten gevolge van de combinatie van golven en stroming [N/m²].

Voor een afleiding van de vergelijkingen (3-17), (3-18) en (3-19) wordt verwezen naar het proefschrift van Bijker.

De eenvoudige gedaante van de vergelijkingen (3-18) en (3-19) is voor ontwerpdoeleinden prettig, maar omschrijft het mechanisme niet correct. Het model houdt geen rekening met de afname van de over de tijd gemiddelde stroomsnelheid in de buurt van de bodem door de interactie van de golven en de stroming, zoals dat in paragraaf 3.3 uitgelegd is. De aanpak van Bijker geeft een relatief grote invloed van de amplitude van de golfschuifspanning op de gemiddelde bodemschuifspanning.

Een ingewikkelder en nauwkeuriger model is opgesteld door Grant en Madsen (1979). Het GM-model geeft de schuifspanning op de bodem als functie van de tijd als volgt weer:

$$\tau_b(t) = \frac{1}{2} \rho_w f_{wc} (u_{b,c} + \hat{u}_{b,w} \sin(\omega t))^2 \dots\dots\dots(3-20)$$

Hierin is:

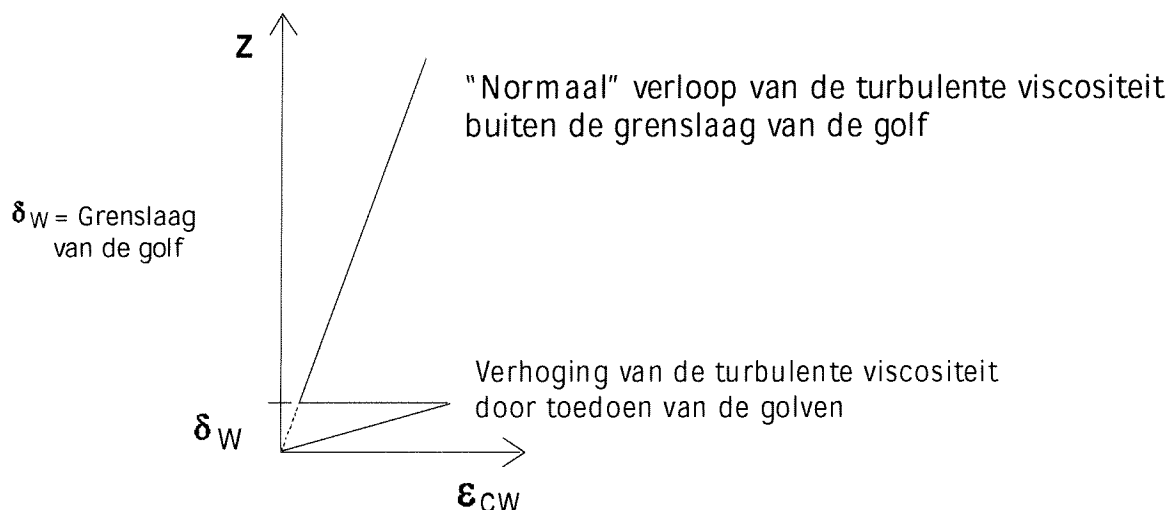
- f_{wc} = wrijvingscoëfficiënt voor de belastingscombinatie van golven en stroming [-];
- $u_{b,c}$ = de (onbekende) bijdrage van de stroomsnelheid aan de snelheid op de bodem [m/s];

In tegenstelling tot het model van Bijker is de stroomsnelheid ($u_{b,c}$) niet als bekend verondersteld, omdat er rekening moet worden gehouden met een aanpassing van het snelheidsprofiel van de stroming door de aanwezigheid van de golven. Op drie manieren wordt de invloed van de golven op de stroming in het model meegenomen.

1. De "extra", door de golf gecreëerde turbulentie, veroorzaakt in de grenslaag van de golf een veel steilere gradiënt in de verdeling van de turbulente viscositeit dan in het geval van een eenparige stroming kan worden verwacht (zie Figuur 3-6).
2. De "extra", door de golf gecreëerde turbulentie, veroorzaakt een afname van de tijdsgemiddelde snelheid aan de bodem. Er wordt vanuit gegaan dat een logaritmisch snelheidsprofiel voor de snelheidsverdeling ten gevolge van de stroming nog steeds geldig is, alleen moet er voor de ruwheid (k_s) een grotere waarde worden ingevoerd. Deze grotere waarde van de ruwheid, de schijnbare ruwheid, brengt de afname van de gemiddelde stroomsnelheid in de buurt van de bodem in rekening. De schijnbare ruwheid varieert, afhankelijk van de verhouding $\hat{u}_{b,w} / u_{b,c}$, van 1 tot 2200 maal de waarde van de bodemruwheid (k_s) zoals deze voor turbulente, ruwe omstandigheden geldt.

3. Er wordt in vergelijking (3-20) gebruik gemaakt van een gecombineerde wrijvingscoëfficiënt voor golven en stroming, die afhankelijk is van de verhouding $\hat{u}_{b,w} / u_{b,c}$.

De snelheidscomponent van de stroming ($u_{b,c}$) is op voorhand niet bekend en vormt een deel van de oplossing, maar de schijnbare ruwheid en f_{wc} zijn allebei afhankelijk van de snelheidscomponent van de stroming. Dit betekent dat er geïtereerd moet worden om f_{wc} en $u_{b,c}$ te vinden.



Figuur 3-6: Turbulente viscositeitsverdeling voor de combinatie van golven en stroming volgens Grant en Madsen

Het is niet mogelijk om in eenvoudige formules de maximale en de gemiddelde gecombineerde schuifspanning weer te geven zoals dat bij Bijker mogelijk was.

Hogere-orde sluitingstheorieën

Een van de meest toegepaste modellen is het model van Fredsoe (1984). Het voert te ver om in detail het model te verklaren, daarvoor wordt verwezen naar het artikel van Fredsoe. Het uitgangspunt van zijn model is dat de turbulente viscositeit niet meer constant in de tijd is maar varieert met de golfcyclus. Op ieder moment is er evenwicht van de turbulente energie in de grenslaag. Voor het model geldt dat het niet mogelijk is om eenvoudig te presenteren hoe het model van Fredsoe het schuifspanningsverloop over een periode weergeeft.

3.4.3 Model van Soulsby om schuifspanningen te berekenen

Soulsby (1993 en 1997) geeft een duidelijk overzicht van de belangrijkste golf-stroming interactiemodellen die er op dit moment zijn. Hij heeft de meetdata en modellen van acht auteurs geanalyseerd en geparametriseerd, zodat het eenvoudig mogelijk is om de modellen met elkaar te vergelijken. Met het model van Soulsby is het mogelijk om voor iedere golf-stroming interactietheorie de gemiddelde gecombineerde schuifspanning en de maximale gecombineerde schuifspanning te berekenen.

Daarbij dient opgemerkt te worden dat het model van Soulsby eigenlijk noodgedwongen wordt toegepast in dit onderzoek, omdat het met dit model wél eenvoudig mogelijk is om een soort resulterende belasting op de bodem te bepalen. De modellen van Fredsoe en Grant en Madsen zijn te complex om op zich zelf toegepast te worden in dit onderzoek. De aanpak van Bijker kan eventueel toegepast worden, maar er kleven enkele belangrijke theoretische bezwaren aan de aanpak van Bijker (zie paragraaf 3.4.2, pg. 43).

Het model van Soulsby maakt het mogelijk om complexe golf-stroming interactietheorieën praktisch toe te passen.

Het model vraagt slechts twee input parameters, namelijk de bodemschuifspanning t.g.v. de stroming en de amplitude van de schuifspanning t.g.v. de golf, waarmee de gemiddelde gecombineerde schuifspanning en de maximale gecombineerde schuifspanning berekend kunnen

worden. De verschillen tussen de golf-stroming interactietheorieën kunnen het best grafisch gepresenteerd worden met Figuur 3-7.

Op de x-as van Figuur 3-7 staat een parameter (X) uitgezet, die de verhouding weergeeft van de schuifspanning t.g.v. van de stroming ($\tau_{b,c}$) tot de som van de amplitude van de schuifspanning t.g.v. de golf ($\hat{\tau}_{b,w}$) en de schuifspanning t.g.v. van de stroming ($\tau_{b,c}$).

De parameter X vormt een indicator voor de golf- of de stromingsdominantie. Immers, wanneer de amplitude van de schuifspanning t.g.v. de golf nul is, dan geldt X=1. Wanneer de schuifspanning t.g.v. de stroming nul is, dan geldt X=0.

Op de y-as staat de gemiddelde resulterende schuifspanning t.g.v. de golf-stroming interactie dimensieloos weergegeven in de parameter Y en is de maximale schuifspanning t.g.v. de golf-stroming interactie dimensieloos weergegeven met de parameter Z.

In Figuur 3-7 worden de volgende dimensieloze parameters gebruikt:

$$X = \frac{\tau_{b,c}}{\tau_{b,c} + \hat{\tau}_{b,w}} \dots\dots\dots(3-21)$$

$$Y = \frac{\tau_{m,wc}}{\tau_{b,c} + \hat{\tau}_{b,w}} \dots\dots\dots(3-22)$$

$$Z = \frac{\tau_{\max,wc}}{\tau_{b,c} + \hat{\tau}_{b,w}} \dots\dots\dots(3-23)$$

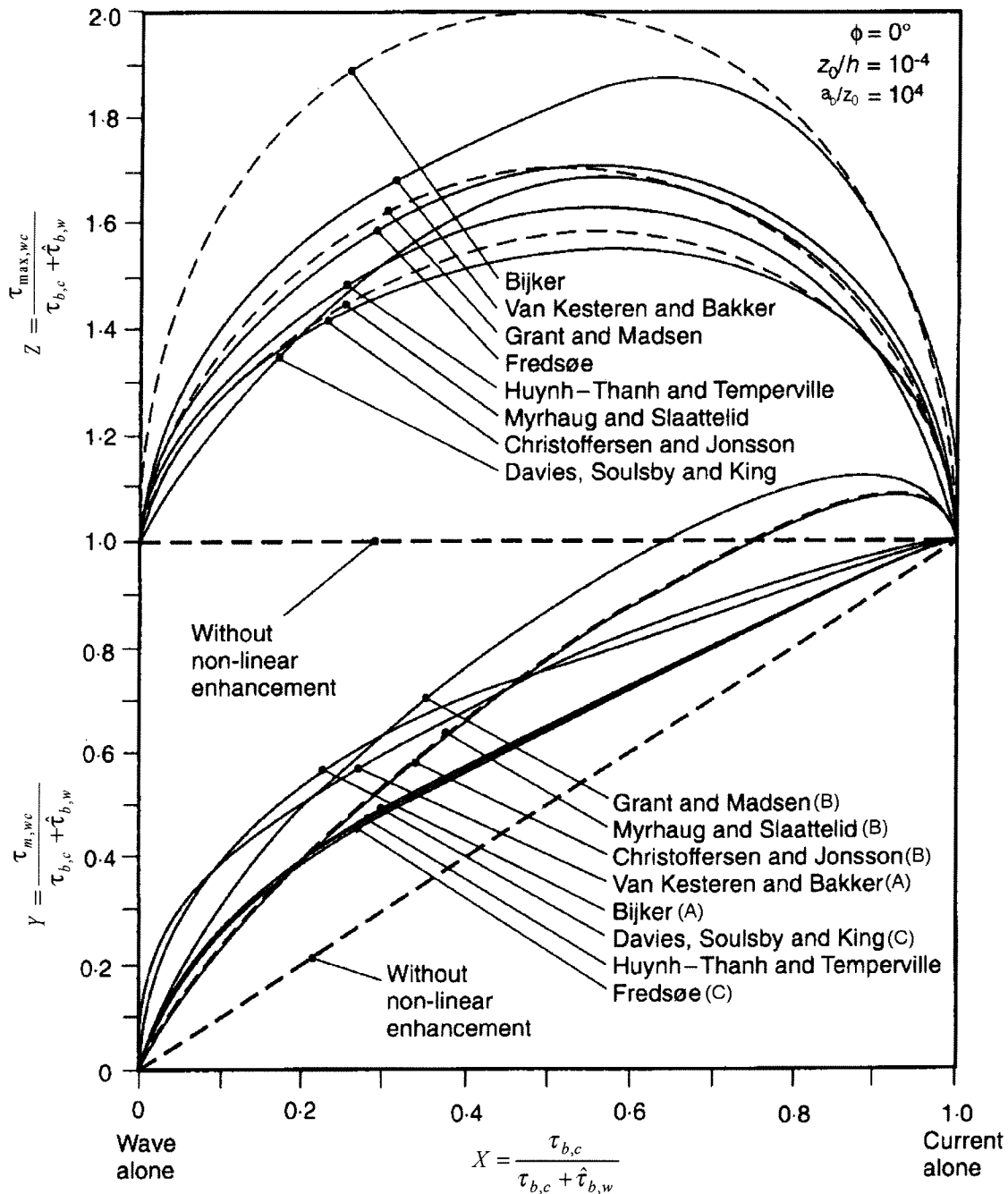
Hierin is

$\tau_{b,c}$ = de schuifspanning door de stroming zonder golven [N/m²];

$\hat{\tau}_{b,w}$ = de amplitude van de schuifspanning door de golf zonder stroming [N/m²];

$\tau_{m,wc}$ = de gemiddelde schuifspanning over een golfperiode door de golf-stroming interactie [N/m²];

$\tau_{\max,wc}$ = de maximale schuifspanning over een golfperiode door de golf-stroming interactie [N/m²];



Figuur 3-7: Vergelijking van acht modellen die de maximale schuifspanning en de minimale schuifspanning veroorzaakt door golf-stroming interactie weergeven (naar Soulsby (1997))

Uit Figuur 3-7 blijkt de grote spreiding in de resultaten van de verschillende modellen. De maximale schuifspanning kan 1,4 tot 2 keer de som van de schuifspanning door golf en stroming zijn. De gemiddelde schuifspanning kan 2 tot 3 keer zo groot zijn als de schuifspanning van de stroming afzonderlijk.

Wanneer echter de theorieën van Bijker en Van Kesteren en Bakker worden weggelaten, dan geven de overige modellen bij de voorspelling van de maximale schuifspanning een Z-waarde die nog maar maximaal 1,4 tot 1,6 keer de som van $\tau_{b,c}$ en $\hat{\tau}_{b,w}$ bedraagt. De theorieën geven, behalve die van Bijker en van Van Kesteren en Bakker, redelijk hetzelfde beeld bij de voorspelling van de maximale schuifspanning.

De spreiding in de bepaling van de gemiddelde gecombineerde schuifspanning kan men niet verkleinen door enkele theorieën buiten beschouwing te laten. In de voorspelling van de parameter Y zijn drie groepen theorieën te onderscheiden.

- A. Van Kesteren en Bakker en Bijker voorspellen in golfgedomineerde situaties ($X < 0,2$), de grootste gemiddelde resulterende schuifspanning in vergelijking met de andere theorieën.
- B. Grant en Madsen, Myrhaug en Slaattelid, Christoffersen en Jonsson voorspellen in stromingsgedomineerde situaties, vanaf $X > ca. 0,5$, de grootste gemiddelde resulterende schuifspanning in vergelijking met de andere theorieën.
- C. Davies, Soulsby en King, Huynh-Thanh en Temperville en Fredsoe geven voor alle stromingssituaties, vanaf $X=0$ tot $X=1$, de kleinste gemiddelde resulterende schuifspanning in vergelijking met de andere theorieën.

Een eenduidige bepaling van de schuifspanning door de belastingscombinatie van golven en stroming is niet te geven en daarom zal het experimentele gedeelte van dit onderzoek uit moeten wijzen welk model een goede weergave geeft van de belasting op het bodemmateriaal. Het is op voorhand niet duidelijk welk model toegepast moet worden en of een gemiddelde of een maximale schuifspanning de belasting goed weergeeft. Van iedere groep wordt een model gekozen, namelijk Bijker, Grant en Madsen en Fredsoe, en van deze drie modellen zal onderzocht worden of ze een goede maat vormen voor de belasting op de steentjes.

De keuze van deze drie modellen is willekeurig, maar Soulsby en Van Rijn stellen dat de modellen van Fredsoe en Grant Madsen in het algemeen goede resultaten geven (zie paragraaf 3.4.2).

In het vervolg van dit rapport zal een relatie worden gelegd tussen een gecombineerde schuifspanning zoals die met het model van Soulsby bepaald kan worden, en experimenteel gemeten verplaatsingen van steentjes.

Het toepassen van het model van Soulsby brengt twee belangrijke beperkingen met zich mee.

In de eerste plaats is het twijfelachtig of de schuifspanning wel een goede maat voor de belasting op het bodemmateriaal is (zie paragraaf 2.3.2).

In de tweede plaats voorspelt het model van Soulsby alleen maar de maximale of de gemiddelde gecombineerde schuifspanning t.g.v. de golf-stroming interactie. Over het verloop van de schuifspanning aan de bodem als functie van de tijd is dus niets bekend. Een maximale of een gemiddelde gecombineerde schuifspanning is waarschijnlijk een te simpele voorstelling van zaken is in een dergelijke complexe belastingsituatie.

Op dit moment is er geen alternatief beschikbaar en wordt het schuifspanningsconcept en het model van Soulsby (noodgedwongen) toegepast in dit onderzoek.

Beschrijving van de procedure van Soulsby

Het grafische verband in Figuur 3-7 is in principe alleen te gebruiken bij dezelfde hydraulische omstandigheden als in de rechter bovenhoek van Figuur 3-7 vermeld staan.

De procedure die Soulsby heeft gebruikt om de gemiddelde gecombineerde schuifspanning of de maximale schuifspanning ten gevolge van verschillende golf-stroming interactietheorieën te bepalen is als volgt:

1. Bepaal het golfgetal en de periode t.o.v. een met een snelheid \bar{u} meebewegend assenstelsel d.m.v. de aangepaste dispersierelatie (vergelijking 3-1)
2. Bereken de amplitude van de orbitaalsnelheid aan de bodem met de volgende vergelijking:

$$\hat{u}_{b,w} = \frac{H\sigma}{2 \sinh(kh)} \dots\dots\dots (3-24)$$

3. Bereken de ruwheid volgens de vergelijking van Swart (formule 3-13), waarbij de amplitude van de orbitaalbeweging op de bodem niet met de relatieve periode wordt berekend maar met de absolute periode t.o.v. een vast assenstelsel. Er dient wel met de werkelijke amplitude van de orbitaalsnelheid, berekend volgens (3-24), gerekend te worden. De amplitude van de orbitaalbeweging op de bodem volgt uit:

$$a_b = \frac{\hat{u}_{b,w}}{\omega} \dots\dots\dots(3-25)$$

4. Bereken de amplitude van de schuifspanning op de bodem met vergelijking (3-11).
5. Bereken een wrijvingscoëfficiënt (λ) of een Chezy-waarde volgens vergelijking (3-8).
6. Bereken de schuifspanning voor de stroming met vergelijking (3-7).
7. Met de waarden van de schuifspanningen ten gevolge van de stroming en de golf afzonderlijk is het mogelijk om het geparametriseerde model te gebruiken om een gemiddelde of een maximale schuifspanning te bepalen. In bijlage 1 vindt u de werkwijze van het model en de verschillende coëfficiënten die voor de verschillende golf-stroming interactietheorieën gebruikt dienen te worden.

4 Experimenten

4.1 Inleiding

In de probleemanalyse in hoofdstuk 1 is al aangegeven dat het transport van stortsteen onder invloed van een belastingscombinatie van stroming en golven onbekend is. Gezien de onbekendheid van het transportfenomeen en de onduidelijkheid over de formulering van de belasting is experimenteel onderzoek een noodzakelijke volgende stap om een relatie te kunnen leggen tussen verplaatsingen van breuksteen en een belasting.

Een van de uitgangspunten van het onderzoek is dat het transport door een combinatie van golven en stroming moet worden gerealiseerd. Daarom is gekozen om te stromen met lage mobiliteitsparameters (van 0,01 tot 0,025), zodat de stroming op zich zelf geen transport veroorzaakt en het bodemmateriaal puur verplaatst door de combinatie van golven en stroming.

Allereerst wordt in paragraaf 4.2 een overzicht gegeven van de structuur en de opbouw van de experimenten. Daarna wordt in paragraaf 4.3 een beschrijving van de meetopstelling gegeven. In paragraaf 4.4 worden de uitgevoerde metingen, de meetprocedure en de gebruikte meetinstrumenten beschreven.

4.2 Structuur van het experimentele onderzoek

Bij het opstellen van het meetprogramma voor dit onderzoek is het van belang te beseffen dat er een groot aantal parameters zijn die bij dit onderzoek invloed hebben op het verplaatsen van stortsteen. Om algemeen geldende resultaten te verkrijgen zouden alle relevante parameters gevarieerd moeten worden.

Een inventarisatie van de mogelijke parameters, die een invloed kunnen hebben op het verplaatsen van stortsteen, leidt tot de volgende opsomming:

Variabele	Symbol	Eenheid
<i>Belasting op de steentjes</i>		
Waterdiepte	h	[m]
Gemiddelde stroomsnelheid	\bar{u}	[m/s]
Periode van de golf t.o.v. een vast assensysteem	T	[s]
(Golflengte, is vastgelegd via de aangepaste dispersierelatie vergelijking (3-1))	L	[m]
Golfhoogte	H	[m]
Soortelijke massa water	ρ_w	[kg/m ³]
Duur van de belasting	t_q	[s]
<i>Eigenschappen van het stortebed</i>		
Soortelijke massa bodemmateriaal	ρ_s	[kg/m ³]
Karakteristieke diameter bodemmateriaal	d_{50} of d_{n50}	[m]
Gradatie van het materiaal (wijdte)	w	[-]
Vorm van het bodemmateriaal		
Lengte van het bed	l_b	[m]
<i>In dit onderzoek als constant te beschouwen "externe" parameters</i>		
Kinematische viscositeit	ν	[m ² /s]
Gravitatieversnelling	g	[m/s ²]

Tabel 4-1: Overzicht van alle relevante parameters voor het experimentele onderzoek

Hoofdstuk 4 Experimenten

Het was niet mogelijk om in de beperkte duur van het afstudeerproject alle relevante parameters uit Tabel 4-1 variëren.

Er is daarom voor gekozen om alleen enkele parameters te variëren die een duidelijk te onderscheiden invloed hebben op de interactie tussen golf- en stromingsbelasting. Dit betekent dat er gekozen is om de eigenschappen van het bed constant te houden, hoewel de eigenschappen van het bed essentieel zijn om algemeen geldende resultaten te krijgen.

Alleen de stroomsnelheid (\bar{u}), de golfperiode (T), de golfhoogte (H) en de duur van de experimenten (t_q) worden tijdens de experimenten gevarieerd en tevens is het effect van herhaling van experimenten onderzocht om de spreiding van de meetresultaten te onderzoeken. Het meetplan van dit onderzoek is weergegeven in Tabel 4-2.

Proeven	Periode golfschot (s)	Gemiddelde golfhoogte (cm)	Doel
Serie 1: gemiddelde snelheid ± 35 cm/s	1,1	0 -10,1 -15,4	Invloed variatie golfhoogte
Serie 2: gemiddelde snelheid ± 44 cm/s	1,1	0 -10,5 -11,2 13,2 -14,2 -15,1	Invloed variatie golfhoogte
Serie 3: gemiddelde snelheid ± 57 cm/s	1,1	5,5 - 6,5 - 7,6 - 8,5 9,5 - 10,6 - 11,9 - 13,1 14,2 - 15,0	Invloed variatie golfhoogte
Serie 4: gemiddelde snelheid ± 66 cm/s	1,1	0 - 4,5 - 5,6 - 6,7 7,5 - 8,5 - 9,8 - 10,4 11,9 - 12,8 - 13,4	Invloed variatie golfhoogte
Serie 5: gemiddelde snelheid ± 57 cm/s	1	0 - 5,2 - 6,5 - 7,5 8,4 - 9,9 - 11,0 11,5 - 12,7 - 13,3	Invloed variatie periode
Serie 6: gemiddelde Snelheid ± 57 cm/s	1,1	13,7 - 13,2	Invloed herhaling van experimenten

Geel gekleurd golfhoogten: proef bedoeld om invloed tijdseffecten te bepalen

Tabel 4-2: Meetplan van het experimentele onderzoek

Bij de experimenten is gezocht naar de invloed van de volgende vijf aspecten:

Invloed van de stroomsnelheid

De experimenten zijn met vier verschillende stroomsnelheden uitgevoerd. Per experiment is geprobeerd de waterdiepte constant op ± 30 cm te houden. Geen van de snelheden was hoog genoeg om op zichzelf doorgaande transporten te genereren, zodat verplaatsingen van steentjes steeds door de combinatie van golven en stroming veroorzaakt werden.

Invloed van de golfhoogte

Per stroomsnelheid is de hoogte van de golven opgevoerd met variabele stappen van 0 tot 15 cm maximaal. Allereerst zijn per serie stappen van 5 cm gemaakt om te kijken of er verplaatsingen optraden. De grove stappen bepaalden met welke andere golfhoogten er nog experimenten moesten worden uitgevoerd. Wanneer er bijvoorbeeld bij een golf van 5 cm hoog niets gebeurde, is daarna geen experiment meer uitgevoerd met een 3 cm hoge golf.

Invloed van de golfperiode

Oorspronkelijk was het de bedoeling om het effect van de periode mee te nemen door alle golfhoogte /stroomsnelheid-combinaties met een periode van 1 en 2 s toe te passen. Het bleek niet mogelijk om een nette regelmatige golf met een periode van 2 seconden op te wekken. Er zijn twee oorzaken waardoor dit niet mogelijk was:

- Bij perioden groter dan 1,1 s werden, bij golfhoogten hoger dan 10 cm, de hogere orde componenten in het golfbeeld zo groot dat er een duidelijk secundair maximum optrad. Dit golfbeeld voldeed niet meer aan het beeld van een nog enigszins sinusvormige symmetrische golf.
- Aan het eind van de goot bij het denkbeeldige strand (zie Figuur 4-1) moet het debiet onder de golfdemper door, door een relatief klein dwarsprofiel stromen. Op die plaats ontstonden grote onregelmatige draaikolken door de abrupte vernauwing van het dwarsprofiel van de stroming. Deze draaikolken vervormden en reflecteerden de golven. Daarna braken de golven op de golfdemper. Het resultaat van deze zeer turbulente uitstroom was dat er een in de tijd fluctuerend, staand karakter in de golven voor de golfdemper ontstond. Dit staande karakter van de golven verplaatste zich naarmate de periode of de golfhoogte toenam steeds verder de goot in.

Er wordt verder nog verwezen naar een onderzoek van Brevik en Aas (1980), die ook constateerden dat bij een willekeurige stroomsnelheid er maar bij één periode een stabiele golf ontstaat. Brevik en Aas vermelden niet waarom.

Deze twee overwegingen hebben er toe geleid dat de periode maar beperkt is gevarieerd. In experimentenserie 5 is voor dezelfde gemiddelde snelheid als bij serie 3 een periode van 1 s gebruikt.

Invloed van tijdseffecten

Voor het opstellen van een meetprocedure (zie paragraaf 4.4.3) en om het gedrag van een bodembescherming in de tijd te onderzoeken, zijn er bij zes proeven gedetailleerde metingen in de tijd gedaan. Bij deze experimenten werd het bed belast met 6000 golven waarbij om de 1200 golven de hoeveelheid verplaatste steentjes werd gemeten. De gele arcering van de golfhoogte in Tabel 4-2 geeft aan dat bij die proef de verplaatsingen van de steentjes als functie van de tijd zijn onderzocht. Op basis van deze resultaten is een meetprocedure afgeleid die in paragraaf 4.4.3 uitgelegd wordt.

Invloed van herhalingsseffecten

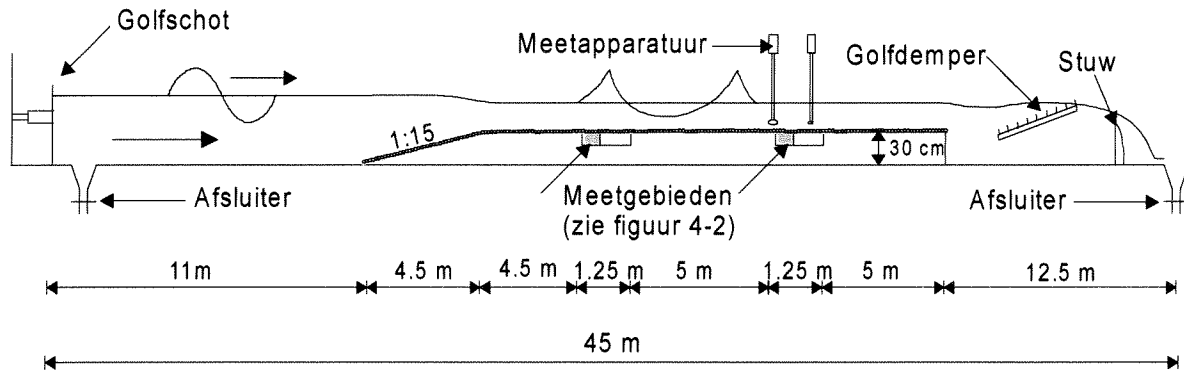
Om statistisch betrouwbare resultaten te verkrijgen zouden de proeven meerdere malen moeten worden uitgevoerd. Om te kijken naar de verschillende resultaten onder de dezelfde omstandigheden is in serie 6 nog twee keer een proef gedaan met dezelfde instellingen als de proef uit serie 3 met een golfhoogte van 13,1 cm.

Enkele parameters die voor het verplaatsen van steentjes onder golven en stroming van belang zijn, zoals bijvoorbeeld de waterdiepte, de diameter en de dichtheid van de steentjes, zijn niet gevarieerd, omdat daar in het onderzoek geen ruimte meer voor was.

4.3 Meetopstelling

De proeven zijn uitgevoerd in "de lange speurwerkgoet" van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Technische Universiteit Delft.

Deze goet heeft een lengte van 45 m, een breedte van 80 cm en is 1 m hoog. Aan het begin van de goet bevindt zich een golfschot. Voor het golfschot bevindt zich op 50 cm afstand een instroombak met een afsluiter waarmee een stroming ingelaten kan worden. Figuur 4-1 geeft een overzicht van de meetopstelling.



Figuur 4-1: De meetopstelling

Om in de goot gladde, regelmatige golven te doen ontstaan moet de instroom van het water rustig gebeuren. Bij grote debieten ontstaan omvangrijke 'turbulentiewolken' aan het begin van de goot, waardoor het (golf)oppervlak zeer onregelmatig wordt en het onmogelijk wordt om bij hogere golfhoogten nog nette regelmatige golven te maken. Om deze reden is er 11 meter na het golfshot een verhoogde bodem in de goot gemaakt, die de stroming doet versnellen. De instroom blijft rustig en de verhoogde bodem maakt het mogelijk om hogere stroomsnelheden te creëren.

De verhoogde bodem heeft in de aanstroomrichting een flauwe helling van 1:15. Deze helling garandeert een vloeiende overgang van het diepe gedeelte naar het ondiepe gedeelte van de goot. Op deze manier wordt loslating van de stroming aan het begin van de verhoging voorkomen en kunnen golven zich geleidelijk aanpassen aan de nieuwe diepte. De verhoging is beplakt met dezelfde steentjes als die in de meetgebieden gebruikt worden. De hoogte ervan is 30 cm.

Achter de verhoogde bodem bevindt zich een golfdemper. Deze demper is 30 cm boven de bodem aangebracht. Aan het eind van de goot is een stuw aangebracht om de waterstand te regelen.

Op de verhoogde bodem zijn twee meetgebieden aangebracht van $50 \times 50 \text{ cm}^2$ (zie daarvoor ook Figuur 4-2).

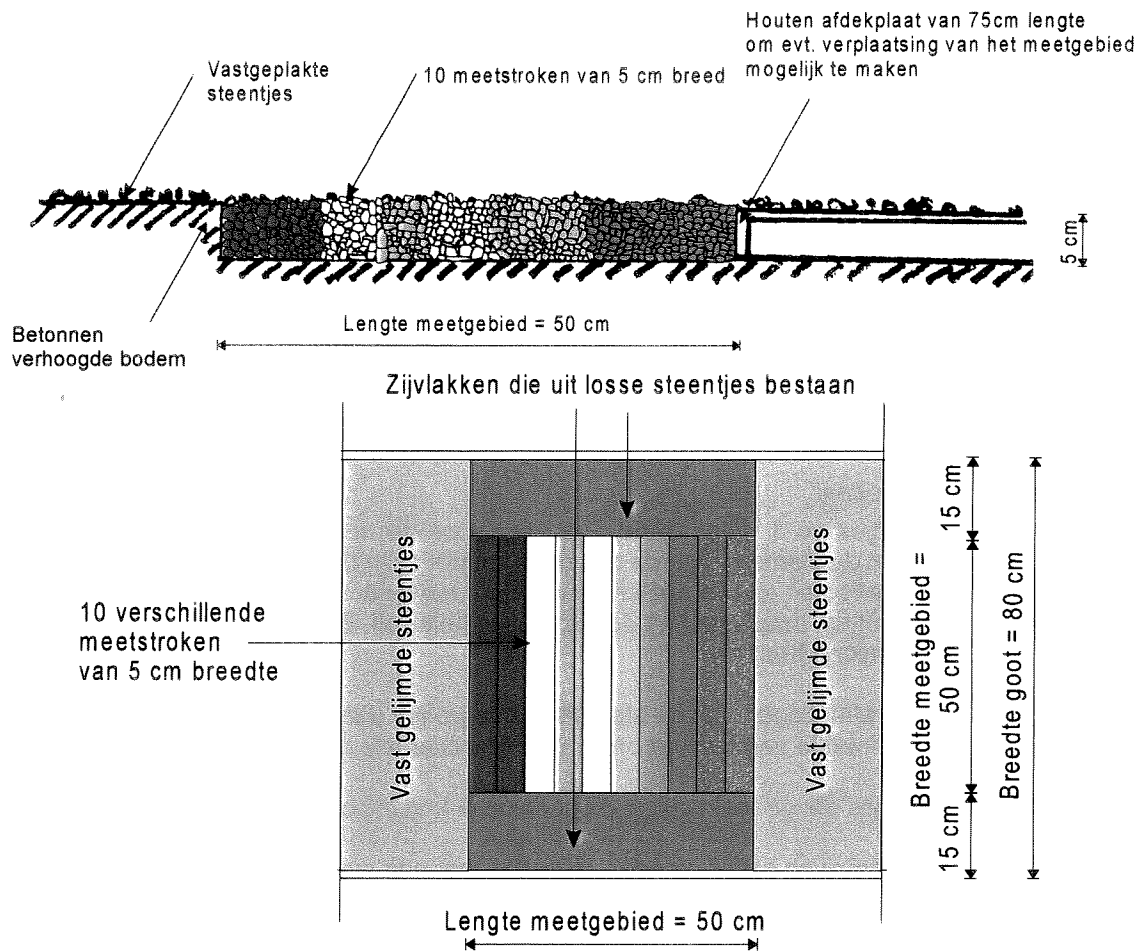
De meetgebieden zijn aangebracht in twee uitsparingen met een lengte van 1,25 m. De uitsparingen zijn over een lengte van 50 cm gevuld met steentjes. De resterende gedeeltes van de uitsparingen zijn afgedekt met planken van 75 cm lengte waarop dezelfde steentjes zijn vastgelijmd als in het meetgebied en op de rest van de verhoging. Die plankjes zijn verplaatsbaar waardoor het mogelijk was geweest de plaats en de lengte van de meetgebieden te variëren als daar aanleiding toe was geweest.

De waterdiepte boven de verhoogde bodem was bij de experimenten gemiddeld 29 cm met een maximale afwijking van 7%.

4.3.1 Opzet meetgebieden

Er zijn twee meetgebieden in de verhoogde bodem aangebracht. Het eerste meetgebied bevindt zich 4,5 m achter het begin van de bovenkant van de verhoging. Het tweede meetgebied bevindt zich 5 meter achter het eerste meetgebied. Deze afstand is gekozen omdat vooraf was aangenomen (maar die aanname bleek zeer discutabel) dat de steentjes in ieder geval niet verder zouden verplaatsen dan één maal de golflengte. De golflengte die op zou treden bij een gemiddelde snelheid van 0,7 m/s en een periode van 2 s was ongeveer 5 m. Uiteindelijk werden er geen experimenten uitgevoerd met een periode van 2 s. De afstand tussen de meetgebieden had waarschijnlijk kleiner kunnen zijn.

De opbouw van de meetgebieden staat in Figuur 4-2 vermeld.



Figuur 4-2: Opbouw van een meetgebied

Tussen de wand en het meetgebied bevindt zich aan iedere kant over 15 cm (=1/2 maal de waterdiepte) een vlak met losse maar ongekleurde steentjes. Deze steentjes verplaatsen maar worden niet meegeteld bij een meting. Deze aanpassing is gedaan naar aanleiding van het onderzoek van Forschelen (1999).

Hij concludeerde dat voor een smalle stroomgoot ($B/h \approx 2$) de totale weerstand die een stroming ondervindt voor een deel voor rekening komt van de wanden, ook al zijn de wanden veel minder ruw dan de bodem. Het verticale snelheidsprofiel in de buurt van de wanden zal anders zijn dan het snelheidsprofiel in het midden en daardoor zal de belasting op de bodem in de buurt van de wanden ook anders zijn dan de belasting op de bodem in het midden van de goot.

Forschelen ontdekte bij zijn experimenten dat het transport in een strook in het midden van de goot 50% bedroeg van het totale transport, terwijl de breedte van de middenstrook maar 1/3 bedroeg van de totale breedte van de goot (voor $B/h \approx 2$).

Tot een afstand vanaf de wanden, die de helft van de waterdiepte bedraagt, is de invloed van de wanden merkbaar op het snelheidsprofiel.

Daarom worden in dit onderzoek steentjes die verplaatsen uit de grijze vlakken (in Figuur 4-2) niet meegenomen in de bepaling van het transport.

Waarschijnlijk spelen wandinvloeden nu geen rol op de hoeveelheden verplaatste steentjes. Het is overigens de vraag of onder invloed van de oscillerende grenslaag van de golf de wandinvloed nog steeds zo ver de goot in reikt.

Ieder meetgebied is opgebouwd uit tien stroken van 5 cm breed met verschillende kleuren steentjes.

Het voordeel van deze opstelling is dat er nauwkeurig verplaatsingen van steentjes kunnen worden opgemerkt. Een steentje hoeft hoogstens 5 cm te verplaatsen om aangemerkt te worden als een verplaatst steentje. Om het begin van bewegen van een steentje aan te geven of om een beeld te geven hoeveel steentjes er uit een gebied zullen verplaatsen is deze opstelling zeer geschikt.

De grotere precisie gaat ten koste van een ander aspect. Door de smalle banen is de totale lengte van de meetgebieden 50 cm. Wanneer men geïnteresseerd is in volledig ontwikkelde transporten door een raai, moet het meetgebied zo lang zijn dat het transport door een raai niet afhankelijk is van de lengte van het meetgebied. Dit is alleen het geval als vóór de meetraai een vlak met losse gekleurde steentjes ligt, dat minstens de lengte heeft van de gemiddelde verplaatsingsafstand van de stenen.

Uit de berekening van de verplaatsingslengten uit dit onderzoek zal dus moeten blijken of het mogelijk is om transporten te kunnen meten.

4.3.2 Het bodemmateriaal

De keuze van de steentjes wordt afgebakend door twee voorwaarden. In de eerste plaats moet de diameter van de steentjes zo groot zijn dat de bodem hydraulisch ruw is. Anders gaan visceuze effecten een rol spelen en wordt de ruwheid van het bed niet alleen afhankelijk van de steentjes, maar ook van de stroomsnelheid zelf. Bodembeschermingen in de praktijk zijn bijna altijd hydraulisch ruw.

De bovengrens van de afmetingen van de steentjes is begrensd door de transportmogelijkheden. Het materiaal moet voldoende verplaatsen onder de experimentele omstandigheden.

De vorm van de steentjes die gebruikt zijn in dit onderzoek kan als onregelmatig aangemerkt worden.

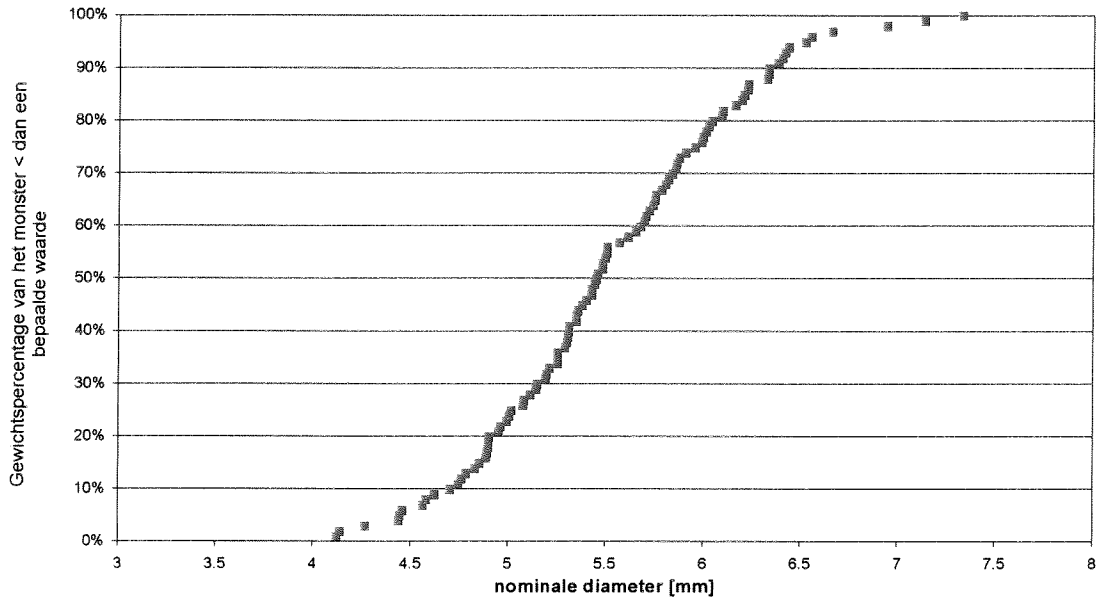
Het materiaal leek een mix van allerlei soorten steentjes met een diameter variërend van 1 tot 12 mm. Om een nauwere gradering te krijgen is het materiaal gezeefd met een zeef van 4 mm en een zeef van 8 mm. De kenmerkende gegevens van een willekeurig monster van 100 steentjes zijn weergegeven in Tabel 4-3 en in Figuur 4-3.

d_{n15}	[mm]	4,86
d_{n50}	[mm]	5,45
d_{n85}	[mm]	6,1
d_{n85}/d_{n15}	[-]	1,3
ρ_s	[kg/m ³]	2534

Tabel 4-3: Gegevens bodemmateriaal

Voor bodemmateriaal bestaande uit breuksteen kan de mediane diameter bepaald worden uit de mediane nominale diameter met vergelijking (4-1):

$$\frac{d_{n50}}{d_{50}} = 0,84 \dots\dots\dots(4-1)$$



Figuur 4-3: Korrelverdeling van het bodemmateriaal

De vraag is of de grenslaag bij de bodem als ruw en turbulent te beschouwen is bij deze diameter van het bodemmateriaal, zodat visceuze effecten geen rol spelen. Voor een belastingsgeval van een stroming betekent de eis dat de bodem hydraulisch ruw moet zijn, dat het korrel-Reynoldsgetal (Re_*) groter moet zijn dan ca. 200.

Wanneer de belasting alleen uit golven bestaat, zijn de hydraulische omstandigheden waarbij visceuze schuifspanningen geen rol meer spelen, afhankelijk van het golf-Reynoldsgetal

$$(RE = \frac{\hat{u}_b a_b}{\nu}) \text{ en van de verhouding } a_b/k_s.$$

In bijlage 2 vindt u in Figuur B2-1 de omstandigheden waarvoor de grenslaag onder een regelmatige golf hydraulisch ruw en turbulent is.

In Tabel 4-4 staan de Reynolds getallen die de experimenten van dit onderzoek karakteriseren.

Proevenserie	\bar{u} [m/s]	Re_*	RE (voor de laagste golfhoogte uit de serie)	a_b/k_s (voor de laagste golfhoogte uit de serie)
1	0,35	170	10000	2,5
2	0,44	215	10000	2,5
3 en 5	0,57	270	3300	1,5
4 en 6	0,66	320	2200	1

Tabel 4-4: Reynolds-getallen voor de verschillende proevenseries

Het korrel-Reynoldsgetal ($Re_* = u_* d/v$) is berekend door de ruwheid te schatten ($= 2,5 \cdot d_{50}$) en met deze ruwheid de Chezy-coëfficiënt te bepalen, waarna de schuifspanningssnelheid berekend kan worden met:

$$u_* = \sqrt{\frac{g \bar{u}^2}{C^2}} \dots \dots \dots (4-2)$$

Om het golf-Reynoldsgetal te bepalen zijn de amplitude van de orbitaalbeweging op de bodem en de amplitude van de orbitaalsnelheid op de bodem benodigd. Deze twee parameters zijn bepaald met behulp van vergelijkingen (3-24) en (3-25). Voor de ruwheid (k_s) is weer een waarde van $2,5 \cdot d_{50}$ aangenomen.

De RE-waarden in Tabel 4-4 zijn de waarden die behoren bij de laagste gemiddelde golfhoogte in de betreffende proevenserie. Uit de tabel blijkt dat bij de proevenseries 1 en 2 de golven altijd voor hydraulisch ruwe en turbulente omstandigheden zorgen. De stroming zorgt bij de proevenseries 3 t/m 6 voor hydraulische ruwe en turbulente omstandigheden aan de bodem en vanaf een golfhoogte van ca. 8,5 cm zorgen de golven ook voor een hydraulisch ruw en turbulent stromingsregime.

Het is mogelijk dat bij de combinatie van golven en stroming, wanneer de orbitaalsnelheid van de golf tegengesteld is aan de stroomsnelheid van het water, de impulsoverdracht aan de bodem gedomineerd wordt door visceuze schuifspanningen.

De dimensieloze diameter (D_*) van de gebruikte breuksteen bedraagt 160 (zie vergelijking 2-11). Het gebruikte materiaal bevindt zich zowel in de Shieldscurve (Figuur 1-1), als in de grafiek van Sleath (Figuur 2-3), aan het begin van het gebied waar de kritische mobiliteitsparameter onafhankelijk is van de diameter van het materiaal.

4.4 Metingen

Per experiment zijn de volgende parameters bepaald:

- Debiet
- Waterdiepte
- Golfhoogte en periode
- Verplaatsingen van de steentjes
- Voor de experimenten zonder golven is de snelheidsverdeling langs de verticaal in het midden van de goot gemeten.

4.4.1 Meetinstrumenten

Rehbock-stuw

Voordat de verhoogde bodem met de meetgebieden in de goot is aangebracht zijn eerst met behulp van een Rehbock-stuw de debieten gemeten en gemarkeerd op de afsluiter in de aanvoerleiding van de stroomgoot. Door de waterstand vóór de stuw te meten met een peilnaald kan het debiet nauwkeurig worden bepaald met de Rehbock-formule:

$$Q = \frac{2}{3} C_e b h_e^2 \sqrt{2g} \dots\dots\dots(4-3)$$

Hierin is (zie ook Figuur 4-4):

Q = debiet door de stroomgoot [m^3/s];

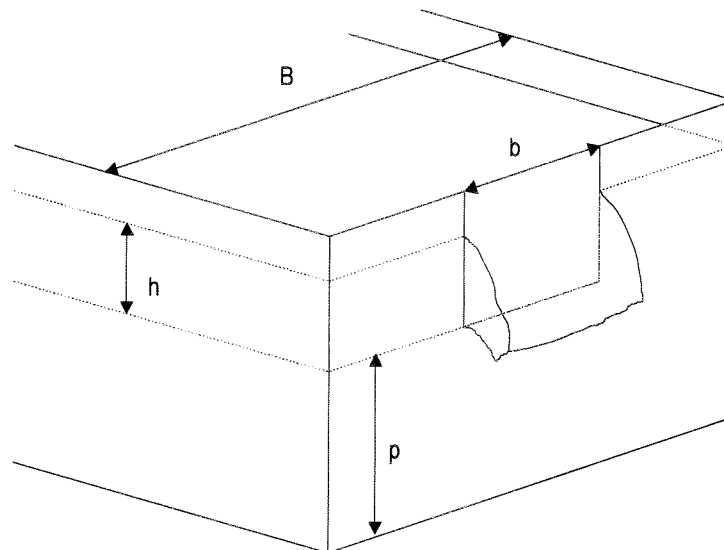
C_e = afvoercoëfficiënt gedefinieerd als $0,602 + 0,083 \frac{h}{p}$ [-];

h = gemeten waterhoogte t.o.v. de hoogte van de stuw [-];

p = hoogte van de stuw (=0,35 m) t.o.v. de bodem van de stroomgoot [m];

b = in dit onderzoek gelijk aan de breedte van de stroomgoot (B=0,8 m) [m];

h_e = effectieve waterhoogte (h+0,0012 m) [m].



Figuur 4-4: Schematische weergave van de Rehbock-stuw

Peilnaalden

Met een peilnaald kan het niveau van een waterspiegel of de bodem t.o.v een vast referentievlak bepaald worden. In dit onderzoek zijn de peilnaalden gebruikt om de waterstand vóór de Rehbock-stuw te meten. De meetfout van een peilnaald bedraagt naar schatting 0,5 mm. Verder zijn peilnaalden gebruikt om de bodemligging te bepalen.

Golfhoogtemeter (GHM)

Een GHM bestaat uit twee evenwijdige metalen elektroden die in het water hangen. Wanneer er stroom door de elektroden loopt is de weerstand voornamelijk afhankelijk van de kolom water en het geleidingsvermogen van het water tussen de elektroden. Door de weerstand te meten is het mogelijk om de waterstand of de golfhoogte te bepalen.

De GHM is gebruikt om de golven te registreren en om de schommelingen van het wateroppervlak te bepalen. De meetfout van een GHM wordt geschat op 0,5 mm.

Electro Magnetische Snelheidsmeter (EMS)

De EMS maakt gebruik van de inductiewet van Faraday voor snelheidsmetingen van een geleidende vloeistof door een magnetisch veld. De EMS geeft spanningen af die een maat zijn voor de snelheid van de vloeistof langs een sensor.

De EMS is gebruikt om het snelheidsprofiel in de verticaal te meten bij de experimenten die zonder golven uitgevoerd zijn.

De fout van een EMS wordt geschat op 0,5 cm/s

4.4.2 Gemeten Parameters

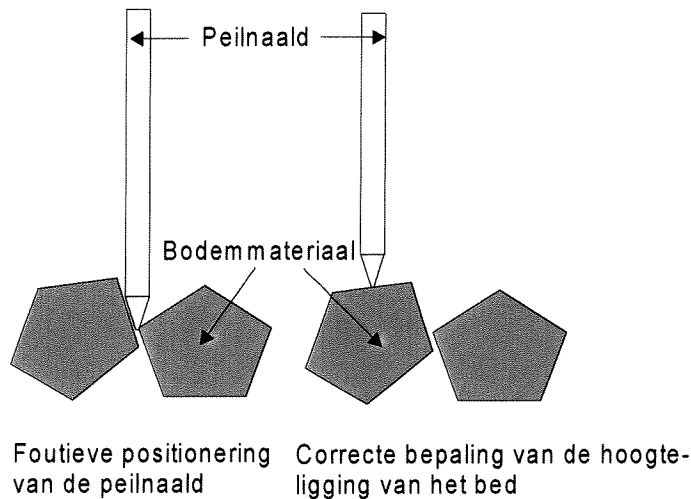
Bepaling van de waterdiepte

De waterdiepte wordt gevonden door de volgende uitdrukking:

$$\text{waterdiepte} = \text{niveau waterspiegel} - \text{niveau bodem} \dots (4-4)$$

Het niveau van de waterspiegel is in stilstaand water bepaald met een peilnaald. Het niveau van de bodem is bepaald door per meetstrook drie keer een peilnaald neer te laten tot aan de bovenkant van de steentjes.

Het risico van deze methode is dat de peilnaald niet per se op de bovenkant van de steentjes tot stilstand hoeft te komen, maar ook aan de zijkant van de steentjes terecht kan komen (zie Figuur 4-5), waardoor het bodemniveau lager wordt verondersteld, dan deze in werkelijkheid is. Daarom is er in dit onderzoek nauwkeurig opgelet dat de peilnaald op de bovenkant van de steentjes gepositioneerd is.



Figuur 4-5: Mogelijke afwijkingen bij het bepalen van het bodemniveau

Het gemiddelde van de 30 metingen is aangenomen als het niveau van de bodem. Het niveau van de bodem verschilt per experiment maximaal 5 mm. Met uitdrukking (4-4) volgt hier een waterdiepte uit. De golfhoogtemeter is geijkt op deze waterdiepte. Wanneer daarna de gewenste stroming wordt ingesteld, fungeert de GHM als een dieptemeter. Met behulp van het data-acquisitieprogramma DasyLab zijn de schommelingen van het wateroppervlak in de stroomgoot uit het signaal gemiddeld.

Golfwaarneming

Gedurende 10 minuten is met een GHM de oppervlakte uitwijking geregistreerd boven de meetgebieden. Niet iedere golf heeft precies dezelfde golfhoogte, omdat hogere orde effecten een grote rol spelen. De golf is duidelijk niet sinusvormig meer (zie voor een uitgebreide beschrijving paragraaf 5.2.1). Achteraf is met het programma Matlab de gemiddelde golfhoogte bepaald.

Transport van steentjes

Het verplaatsen van steentjes is gemeten door op twee of meerdere tijdstippen van iedere strook te noteren wat voor anders gekleurde steentjes er zich in die strook bevinden. Door de plaatsregistratie van de steentjes op verschillende tijdstippen te vergelijken, is het transport in de tijdsperiode tussen de verschillende tijdstippen bekend. Per tijdstip is er een overzicht gemaakt waarop nauwkeurig de plaats van de verplaatste steentjes is aangebracht.

In Figuur 4-6 is als voorbeeld een meetblad ingevuld, waarmee de verplaatsingen van de steentjes tijdens een experiment, voor één meetgebied, in kaart zijn gebracht. Horizontaal zijn de meetstroken uitgezet en verticaal kan men aflezen welke anders gekleurde steentjes zich in dat vak bevinden. Het cijfer 1 in het paars gekleurde hokje betekent bijvoorbeeld dat er één paars steentje in het witte vak ligt. Van de steentjes die zich buiten het meetgebied bevinden is tussen haakjes aangegeven op welke afstand ze buiten het meetgebied liggen.

Eerste meting											totaal # verplaatst
Bijvoorbeeld: meting na 30 min stromen en 2400 golven											
vlakken	wit	roze	geel	groen	turq.	grijs	oranje	bruin	buiten		
steentjes											
paars	1	0	3	2	1	0	0	1	1(5 cm)	9	
wit	1	4	2	3	2	0	0	0	0	11	
roze		1	2	2	0	1	2	1	0	8	
geel			1	0	1	1	2	3	1(5 cm)	8	
groen				1	1	2	4	1	0	8	
turquoise					1	2	2	1	1(5 cm)	6	
grijs						1	2	0	2(10,20 cm)	4	
oranje							1	3	0	3	
# door geel/groene raai: 24											

Tweede meting											totaal # verplaatst	# verpl. tijdens meting
Bijvoorbeeld: meting na 30 min stromen en 6000 golven												
vlakken	wit	roze	geel	groen	turq.	grijs	oranje	bruin	buiten			
steentjes												
paars	2	0	1	4	1	0	0	2	1(5 cm)	11	2	
wit	2	3	2	4	2	0	0	0	0	11	0	
roze		1	3	0	0	1	4	1	0	9	1	
geel			1	1	0	2	0	4	2(5,10 cm)	9	1	
groen				1	3	2	4	0	1(25 cm)	10	2	
turquoise					1	0	4	1	1(5 cm)	6	0	
grijs						1	4	0	2(10,20 cm)	6	2	
oranje							1	4	0	4	1	
# door geel/groene raai: 29												

Figuur 4-6: Meetblad om verplaatsingen tussen twee tijdstippen te bepalen

Met behulp van het meetblad kan men het volgende afleiden:

- Hoeveelheid steentjes die uit een bepaald vak is verplaatst gedurende de proef. Bij voorbeeld, uit het gele vak is tijdens het experiment van Figuur 4-6, één geel steentje verplaatst. Deze waarde is af te lezen uit het geel gekleurde hokje. Verder valt af te lezen dat er twee paarse steentjes uit de gele meetstrook zijn verplaatst en dat er één roze steentje is bijgekomen.
- Hoeveelheid steentjes die door een bepaalde doorsnede is verplaatst gedurende de proef. Bijvoorbeeld door een raai tussen de gele en de groene meetstrook zijn (29 – 24=) vijf steentjes van verschillende kleuren verplaatst.
- Verplaatsingsafstanden van de steentjes. Dit is mogelijk tot op 5 cm nauwkeurig. Uit Figuur 4-6 blijkt bijvoorbeeld dat er vier gele steentjes verplaatst zijn die respectievelijk vijf, vijf, vijf en twintig cm verplaatst zijn:

Aantal verplaatste gele steentjes	Uit meetstrook	Naar meetstrook	Afgelegde afstand [cm]
1	Geel	Groen	5
1	Turquoise	Grijs	5
1	Oranje	Bruin	5
1	Oranje	Buiten	20

Tabel 4-5: Verplaatsingen van de gele steentjes uit Figuur 4-6

Snelheidsprofiel

In de series 1,2,3 en 4 zijn de eerste experimenten van iedere serie zonder golven uitgevoerd. Tijdens deze experimenten is boven het achterste meetgebied, vanaf 2 cm boven de bodem om de 2 cm gedurende vijf minuten een snelheidsmeting gedaan met behulp van een EMS.

Bepaling van het debiet

Het debiet is nauwkeurig gemeten met een Rehbock-stuw, volgens vergelijking (4-2). Bij iedere proef is vervolgens geprobeerd om op exact dezelfde manier het gewenste debiet in te stellen door vanaf de gesloten toestand de afsluiter op de gewenste stand in te stellen. Hoewel er bij iedere proef veel zorg is besteed aan het op dezelfde manier instellen van het debiet, is het mogelijk dat de afsluiter niet bij iedere proef exact op de gewenste positie is ingesteld.

Vervolgens is met het ingestelde debiet en een gemeten waterstand, de gemiddelde stroomsnelheid bepaald met:

$$\bar{u} = \frac{Q}{bh} \dots\dots\dots(4-5)$$

Hierin is:

- Q = debiet door de stroomgoot [m³/s];
- b = breedte van de stroomgoot [m].

Het is duidelijk dat een juiste instelling van het debiet zeer belangrijk is bij de bepaling van de gemiddelde snelheid.

De enige vorm van controle op de gemiddelde snelheid zoals die uit het debiet berekend is, zijn de metingen van het snelheidsprofiel met de EMS. Het probleem bij het controleren van de ingestelde snelheid door vergelijking (4-4) is dat de controlemetingen met de EMS niet over het hele profiel kunnen worden uitgevoerd.

De EMS geeft betrouwbare waarden vanaf 2 cm boven de bodem en vanaf 8 cm onder het wateroppervlak. De trapeziumregel is gebruikt om de dieptegemiddelde snelheid te bepalen:

$$\bar{u} = \frac{0.5}{h} [u_1 z_1 + (u_1 + u_2)(z_1 - z_2) + (u_2 + u_3)(z_2 - z_3) \dots + (u_{n-1} + u_n)(z_n - z_{n-1}) + 2u_n(h - z_n)] \dots\dots(4-6)$$

In de tweede kolom van Tabel 4-6 is de ingestelde gemiddelde snelheid aangegeven zoals deze uit het ingestelde debiet is berekend. In de derde kolom staat de gemiddelde snelheid berekend met vergelijking (4-6) uit het met de EMS gemeten snelheidsprofiel.

Controle meting van experimentenreeks	Ingestelde snelheid volgens debiet (zie verg. (4-5)) [m/s]	\bar{u} bepaald met de EMS-meting (zie verg. (4-6)) [m/s]
1	0,35	0,35
2	0,43	0,42
3	0,54	0,51
4	0,66	0,63

Tabel 4-6: Vergelijking tussen de gemiddelde snelheid bepaald uit het debiet en de gemiddelde snelheid bepaald uit de EMS-meting

Uit Tabel 4-6 blijkt dat de gemiddelde snelheid zoals deze uit het ingestelde debiet is berekend redelijk overeenkomt met de gemiddelde waarde die uit de EMS-meting wordt bepaald. De afwijking is groter bij een groter debiet, en de gemiddelde snelheid uit de instelling van het debiet wijkt maximaal 5% (0,03 m/s) af van de gemeten gemiddelde snelheid met de EMS.

De afwijking bij het instellen van het debiet is gelijk aan de afwijking van de ingestelde snelheid maal het doorstroomde oppervlak. In dit onderzoek wordt de fout bij het instellen van het debiet geschat op: $0,03 \text{ [m/s]} * 0,8 \text{ [m]} * 0,3 \text{ [m]} \approx 8 \text{ l/s}$.

4.4.3 Meetprocedure

Per experiment is bepaald hoeveel steentjes er uit een meetstrook verplaatsten gedurende een bepaalde periode. De meetprocedure is opgesteld aan de hand van de zes experimenten die verricht zijn om de invloed van tijdseffecten op het verplaatsen van steentjes te onderzoeken.

Tijdstip van transportmetingen

Bij vergelijkbare onderzoeken waarbij het transport van breuksteen wordt onderzocht brengt men vaak voordat een proef begint een voorbelasting aan die zorgt dat het bed zogenaamd gerijpt is. Deze voorbelasting is groot genoeg om ongunstig liggende steentjes te verplaatsen, al dan niet naar een gunstiger plek in het bed. Dit rijpingsproces waarbij het bed zichzelf versterkt, is kenmerkend voor experimenten waarbij verplaatsingen van breuksteen worden onderzocht.

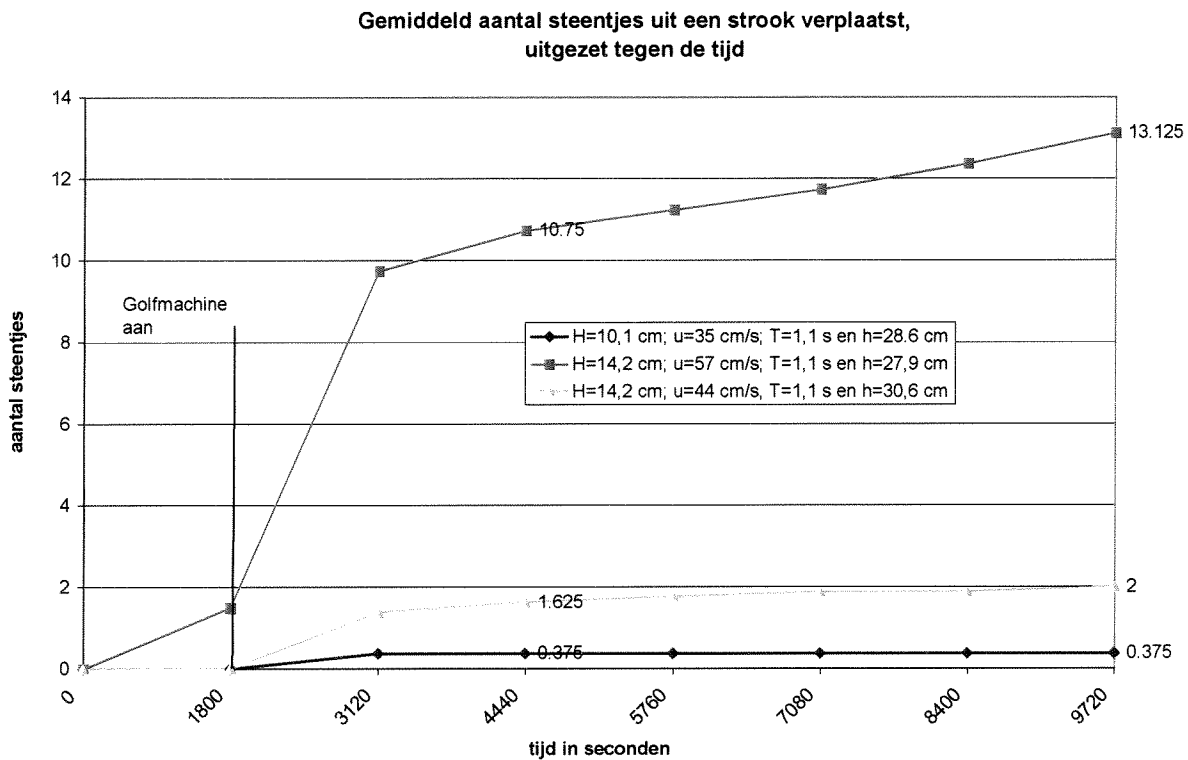
Tijdens het rijpingsproces verplaatsen in korte tijd veel steentjes. Wanneer de belasting langer duurt verstevigt het bed zichzelf: de ongunstige steentjes zijn verplaatst en het aantal verplaatsingen per tijdseenheid zal afnemen. Bij een kort durende belasting zal de bijdrage van het initiële transport (tijdens het rijpen) aan het totale transport van de steentjes zeer groot zijn. In de praktijk zal echter de belasting zolang duren dat het transport tijdens het rijpingsproces geen rol meer speelt.

Vanuit dit oogpunt is het noodzakelijk om verplaatsingen van steentjes te meten na het rijpingsproces. Tijdens dit onderzoek was het niet mogelijk om in alle gevallen dezelfde voorbelasting op te leggen. Dit heeft te maken met de regeling van de waterstand aan de achterkant van de goot. Een stuw werd met kleine plankjes precies op hoogte gesteld, zodat bij een bepaalde gewenste snelheid de waterstand ongeveer 30 cm bedroeg. Daarna was het niet meer mogelijk om de hoogte van de stuw te veranderen om bij dezelfde waterstand een andere stroomsnelheid te verkrijgen.

De voorbelasting verschilt dus per stroomsnelheid. Daarom zijn een aantal proeven uitgevoerd om te onderzoeken wanneer het rijpingsproces of het initiële transport overgaat in het transportproces dat hoort bij langdurige belasting. Deze proeven zijn in Tabel 4-2 geel gekleurd.

Eerst is er een half uur voorbelast met de gewenste stroomsnelheid. Daarna is de golfmachine aangezet en zijn er 6000 golven over het bed gestuurd. Daarbij is om de 1200 golven gemeten hoeveel steentjes er uit een vak verplaatsten. De uitgezette waarden in Figuur 4-7 geven het gemiddelde aantal verplaatste steentjes per vak van de middelste acht stroken.

In bijlage 3 vindt u van alle proeven waarbij het rijpingsproces onderzocht is de resultaten.



Figuur 4-7: Verplaatste steentjes uit een strook als functie van de tijd

Figuur 4-7 toont aan dat na 3120 s (deze tijdsduur is opgebouwd uit 1800 s stromen en een belasting van 1200 golven met een periode van 1,1 s), het rijpingsproces overgaat in het proces dat bij langdurige belasting het transport bepaalt. Op grond van deze resultaten is er bij alle proeven met een voorbelasting van een half uur gestroomd en zijn er 2400 golven over het bed gestuurd. Het aantal verplaatste steentjes tussen 2400-6000 golven wordt gemeten als het aantal verplaatste steentjes bij die belasting. Op deze manier heeft het rijpingsproces geen invloed op het gemeten transport. De begincondities zijn in iedere proef anders.

Het is van belang nog te vermelden dat het aantal steentjes dat initieel verplaatst niet zo groot is dat de bodemverdediging al bezwaken is, voordat de transportmeting begint.

Het criterium van bezwijken hangt af van de functie die de bodemverdediging heeft en de daarmee samenhangende eisen, die een ontwerper stelt.

Dit onderzoek spitst zich toe op verplaatsingen van breuksteen uit de toplaag en er is geen criterium voor bezwijken van de totale bodemverdediging aangehouden, maar de initiële verplaatsingen zijn dermate laag, dat dit in het algemeen geen problemen oplevert.

Wanneer bijvoorbeeld de initiële verplaatsingen van de roze lijn uit Figuur 4-7 wordt bekeken, dan is procentueel gezien, bij een aanname dat er 1000 steentjes in een meetstrook zitten, slechts (10/1000) één procent van de steentjes verplaatst. Een bodemverdediging waarbij een procent van de steentjes verplaatst, lijkt in het algemeen nog stabiel genoeg om haar functie te kunnen vervullen.

Verrichte handelingen

Voordat een experiment gestart kon worden moest eerst het bed hersteld worden. Alle steentjes moesten weer op de goede plaats gelegd worden. Dit gebeurde door, voorafgaande aan iedere proef, de meetgebieden weer strook voor strook netjes op te bouwen en vervolgens met een plankje af te rijden om een vlak bed te verkrijgen. In de praktijk is het lastig om een bed zo vlak te krijgen. Toch is bij dit onderzoek het bed steeds goed afgereden omdat de stroken anders een soort bergjes vormden waarachter steentjes bleven liggen.

Vervolgens werd de hoogte van het bed gemeten volgens de methode uit paragraaf 4.4.2. Samen met een bekend waterniveau leverde dit een ijkwaterdiepte voor de golfhoogtemeter op. Daarna werd de gewenste stroming aangebracht en werd de diepte met de golfhoogtemeter gemeten. Op dat moment kon het debiet nog aangepast worden indien dat noodzakelijk was, zodat de gewenste snelheid verkregen werd. Na een half uur stromen werd het bed belast met 2400 golven.

Nadat 2400 golven het bed belast hadden werd het golfschot uitgezet en werden de verplaatste steentjes geteld.

Hierna werd het bed met 3600 golven belast. De tweede telling werd verricht aan het eind van de belasting met 3600 golven. Het verschil tussen beide tellingen is het transport dat bij het betreffende experiment optreedt.

5 Afleiding van de belasting uit de experimenten

Om de resulterende belasting veroorzaakt door de interactie van golven en stroming te kunnen bepalen is het noodzakelijk om eerst de schuifspanning van de golven en de stroming apart te berekenen. Daarna kan met het golf-stroming interactiemodel van Soulsby, zoals uitgelegd in paragraaf 3.4.3 een resulterende belasting op de bodem worden bepaald. In dit hoofdstuk zullen uit de waarden van de stroomsnelheid en de golfhoogten, zoals die gemeten zijn tijdens de experimenten, de belastingen door de stroming en de golven afzonderlijk bepaald worden.

5.1 Bepaling stromingsbelasting

5.1.1 Inleiding

In paragraaf 3.2.1 is aangegeven dat de schuifspanning op de bodem ten gevolge van een eenparige stroming berekend kan worden met de gemiddelde stroomsnelheid volgens vergelijking (3-7):

$$\tau_c = \rho \frac{g}{C^2} \bar{u}^2 \dots\dots\dots(3-7/5-1)$$

Vergelijking (5-1) is echter alleen geldig voor een eenparige stroming met een logaritmisch snelheidsprofiel. Bij ieder experiment is de gewenste gemiddelde snelheid vooraf ingesteld door een bepaald debiet in te stellen en met een stuw aan het einde van de goot de gewenste waterstand te regelen. De gemiddelde snelheid kan dan berekend worden met:

$$\bar{u} = \frac{Q}{bh} \dots\dots\dots(4-4/5-2)$$

Door een schatting te maken van de Chezy-coëfficiënt kan in het geval van een eenparige stroming met vergelijking (5-1) de stromingsbelasting op de bodem bepaald worden.

In een laboratoriumgoot met een gefixeerde horizontale bodem zal zich geen eenparige stroming instellen. In de stroomgoot zal een verhang optreden, waardoor de stroming versnelt en strikt genomen niet als eenparig te beschouwen is, hoewel de versnellingen waarschijnlijk klein zullen zijn.

Een ander belangrijk aspect is de invloed van de wandwrijving. In een smalle stroomgoot ($B/h \approx 2$) kan men de invloed van de wandwrijving niet verwaarlozen. De wanden kunnen een aanzienlijk deel van de totale weerstand vormen die de stroming ondervindt. De invloed van de wandwrijving is vooral merkbaar in de buurt van de wanden, aan de bovenkant van de stroming bij het wateroppervlak, waar het duidelijkst merkbaar is dat de stroming zich niet volledig kan ontwikkelen. De wandwrijving kan een van de redenen zijn dat er geen logaritmisch snelheidsprofiel in de goot ontstaat.

Aangezien de stroming niet eenparig is en de invloed van de wandwrijving een rol speelt, is het noodzakelijk om meer informatie te verkrijgen over het verticale snelheidsprofiel dat tijdens de experimenten optrad.

5.1.2 Gemeten verticale snelheidsprofielen

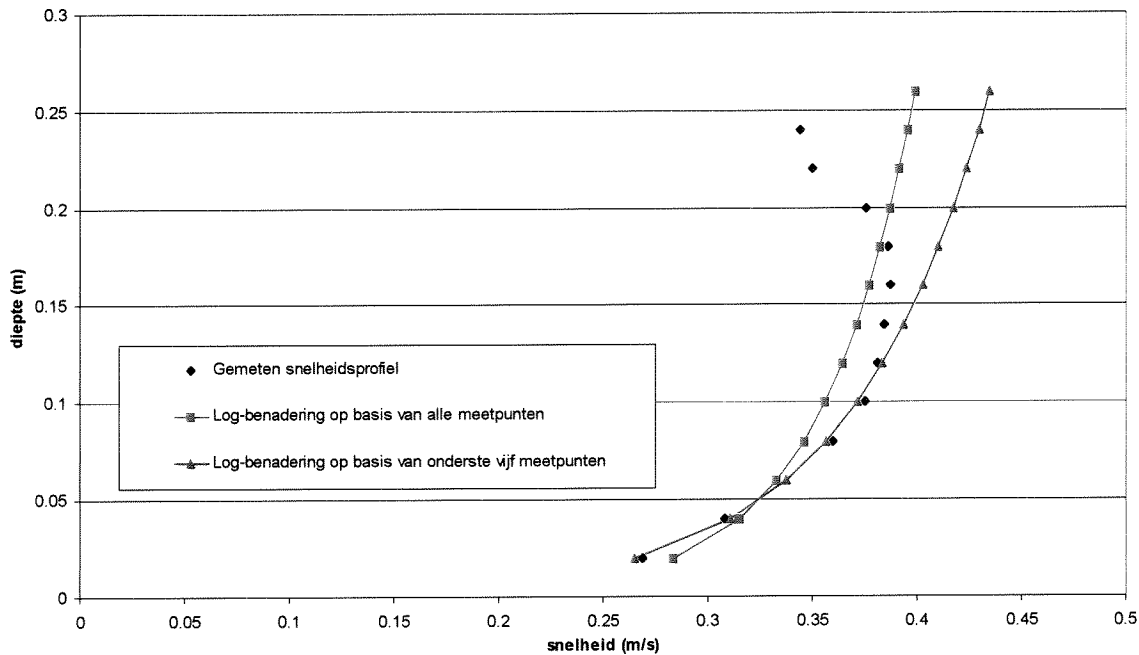
Bij iedere stroomsnelheidsreeks (0,35 m/s, 0,44 m/s, 0,57 m/s en 0,66 m/s) is een experiment zonder golven uitgevoerd. Tijdens deze experimenten is in het midden van de stroomgoot boven het achterste meetgebied het verticale snelheidsprofiel gemeten met een EMS. Deze metingen werden om de 2 cm verricht vanaf 2 cm boven de bodem tot 8 cm onder het wateroppervlak. Op iedere hoogte is over een duur van vijf minuten de gemiddelde stroomsnelheid bepaald.

In Figuur 5-1 is het gemeten snelheidsprofiel uitgezet voor de laagste stroomsnelheid (0,35 m/s). Het blijkt dat het profiel duidelijk niet logaritmisch is: waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt door de wandwrijving, waardoor de stroming zich niet volledig kan ontwikkelen. Voor meer informatie over de invloed van wandwrijving bij laboratoriumonderzoek wordt verwezen naar Forschelen (1999) die een goed overzicht geeft van dit verschijnsel. In het midden van de goot

Hoofdstuk 5 Afleiding van de belasting uit de experimenten

is nog steeds de invloed van de wanden merkbaar, hoewel in het rapport van Forschelen wordt gesteld dat op een afstand die een 1/2 maal de waterdiepte vanaf de wanden bedraagt, de invloed van de wanden te verwaarlozen zou moeten zijn.

Vergelijking tussen gemeten snelheidsprofiel en logaritmische benadering, de gemiddelde snelheid is 0,35 m/s



Figuur 5-1: Twee logaritmische benaderingen op basis van een gemeten snelheidsprofiel

In bijlage 4 vindt u van de vier verschillende stroomsnelheden waarmee de experimenten uitgevoerd zijn het gemeten snelheidsprofiel. Bij de hoogste drie stroomsnelheden voldoet het gemeten profiel beter aan een logaritmisch profiel dan bij de laagste stroomsnelheid. De gemeten afwijking t.o.v. een logaritmisch snelheidsprofiel betekent dat het niet zonder meer mogelijk is om vergelijking (5-1) te gebruiken om de bodemschuifspanning te berekenen. Uit Figuur 5-1 blijkt duidelijk dat de logaritmische benadering op basis van alle meetpunten een overschatting geeft van de snelheid aan de bodem. De logaritmische benadering op basis van alle meetpunten geeft geen goede benadering voor het snelheidsprofiel.

Het gemeten profiel geeft echter informatie over de snelheidsgradiënt in het onderste gedeelte van de stroming. Met behulp van het snelheidsprofiel is het mogelijk om de schuifspanning op de bodem te bepalen, aangezien voor de schuifspanning op de bodem alleen de snelheidsgradiënt bij de bodem van belang is.

Uit Figuur 5-1 blijkt dat de onderste vijf meetpunten van het snelheidsprofiel goed te benaderen zijn met een logaritmische benadering. Er wordt vanuit gegaan dat dit profiel een redelijke benadering geeft van het snelheidsprofiel in de grenslaag, hoewel de metingen buiten de grenslaag zijn verricht. Het is onmogelijk om met een EMS metingen in de grenslaag te verrichten.

In Figuur 5-2 is duidelijk te zien dat een logaritmische benadering op basis van de onderste vijf meetpunten een goede benadering geeft van het snelheidsprofiel.

De logaritmische benadering gebaseerd op de onderste vijf meetpunten moet aan de volgende vergelijking voldoen:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \dots\dots\dots (5-3)$$

Deze vergelijking kan omschreven worden tot:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln(z) - \frac{u_*}{\kappa} \ln(z_0)$$

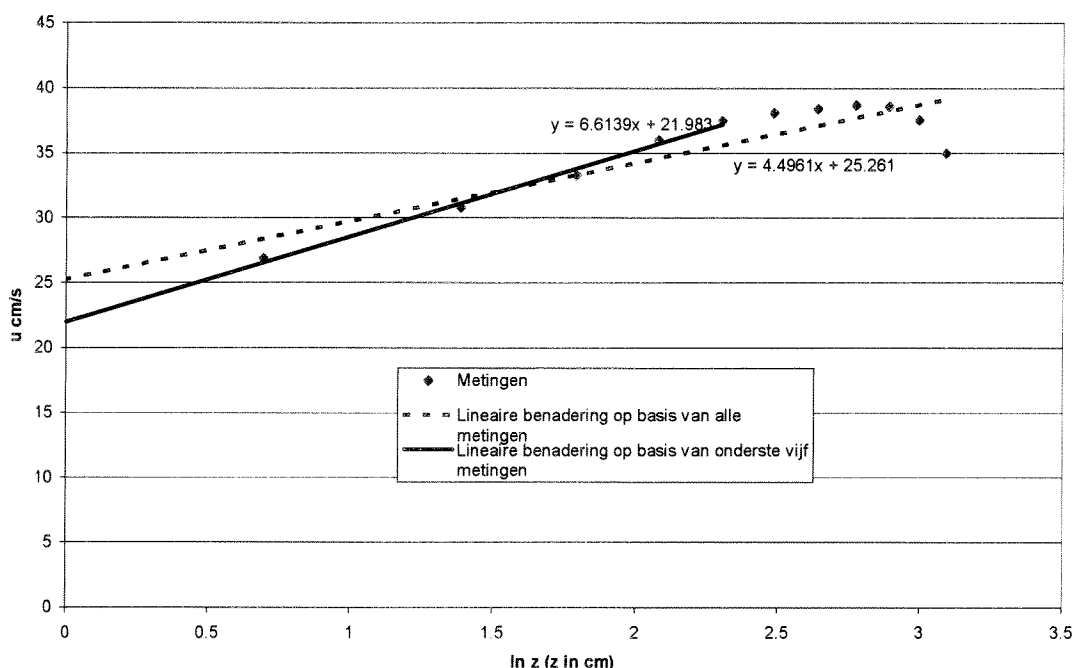
Voor de meting uit Figuur 5-1 (proevenreeks 1, $\bar{u} = 0.35$ m/s) is deze lijn getrokken in Figuur 5-2. Deze lijn is gefit op de onderste data van de meting en voldoet aan de vergelijking:

$$y = ax + b \dots\dots\dots(5-4)$$

De waarden van a en b staan in Figuur 5-2 vermeld. De twee onbekenden zijn eenvoudig te vinden:

$$u_* = \kappa a \text{ en } z_0 = e^{\left(\frac{b}{a}\right)} \dots\dots\dots(5-5)$$

Snelheid tegen de diepte uitgezet, de gemiddelde snelheid is 0,35 m/s



Figuur 5-2: Twee mogelijke benaderingen van het snelheidsprofiel

Het profiel blijkt in het onderste gedeelte goed te benaderen te zijn met een logaritmische profiel met de volgende kenmerkende parameters:

- De schuifspanningsnelheid $u_* = 0,0265$ m/s
- De z_0 -hoogte = 0,00036 m
- De bodemschuifspanning = $\rho u_*^2 = 0,7$ N/m²

Op deze manier is het mogelijk om voor de vier experimenten waarbij het snelheidsprofiel is gemeten de bodemschuifspanning te bepalen. In Tabel 5-1 is voor ieder snelheidsprofiel de schuifspanning op de bodem bepaald.

In de tabel is nogmaals het verschil aangegeven tussen de gemiddelde snelheid zoals deze uit het vooraf ingestelde debiet berekend is en de gemiddelde snelheid zoals deze afgeleid is uit het snelheidsprofiel (zie voor meer informatie paragraaf 4.4.2).

De laatste kolom van Tabel 5-1 bevat de bodemruwheid die in de volgende paragraaf wordt bepaald.

Ingestelde \bar{u} Volgens debiet (m/s)	\bar{u} volgens EMS (m/s)	u_* (m/s)	z_0 (m)	$\tau_{b,c}$ (N/m ²)	k_s (* d_{50})
0,35	0,35	0,027	0,00036	0,70	1,8
0,43	0,42	0,028	0,00042	0,81	2,1
0,54	0,51	0,037	0,00037	1,39	1,8
0,66	0,63	0,045	0,00033	2,04	1,7

Tabel 5-1: Schuifspanningen en ruwheden, afgeleid uit gemeten snelheidsprofielen

5.1.3 *Bepaling van de ruwheid van de bodem*

Nikuradse heeft ontdekt dat de ruwheid van de bodem voor een hydraulisch ruwe situatie gelijk is aan:

$$k_s = 33z_0 \dots\dots\dots(5-6)$$

De berekende ruwheden staan in de zesde kolom van Tabel 5-1. De ruwheid varieert in dit onderzoek tussen de 1,8 en 2,1 maal de d_{50} van het gebruikte breuksteen. Schiereck (1998) stelt dat voor een vlak bed de ruwheid gelijk is aan $2,5 \times d_{50}$ en voor een ruw bed $3 \times d_{90}$. Het bed is dus zeer vlak en dat komt overeen met de manier waarop het bed is aangelegd. Het bed is bewust afgevlakt om te voorkomen dat de meetstroken een soort ribbels vormden waarachter steentjes makkelijk konden blijven liggen.

5.1.4 *Bepaling van de schuifspanning t.g.v. de stroming in een willekeurig experiment*

De schuifspanningen bepaald uit de gemeten snelheidsprofielen zoals die in de vijfde kolom van Tabel 5-1 staan, kunnen niet beschouwd worden als de schuifspanningen die de stroming veroorzaakt bij een willekeurig experiment met dezelfde stroomsnelheid.

De EMS-metingen zijn uitgevoerd als afsluiting van het experimentele gedeelte. Het bleek lastig om dezelfde combinaties van stroomsnelheid en waterdiepte in te stellen als bij de respectievelijke meetseries. De verschillen tussen de EMS-meting en de meetseries zijn weergegeven in Tabel 5-2. Bij meetserie 1,2 en 4 is het alleen de waterdiepte die afwijkt t.o.v. de EMS-metingen; bij meetserie 3 verschilt ook de snelheid.

Meetserie	Experimenten met golven		Meting snelheidsprofiel met EMS, zonder golven	
	ingestelde u volgens debiet (cm/s)	H (cm)	ingestelde u volgens debiet (cm/s)	h (cm)
1	35	28,6	35	28,1
2	42-44	30,6 -31,7	43	31,0
3	57-58	27,5 - 28,2	54	29,6
4	65-66	28,2 - 28,7	66	28,2

Tabel 5-2: Verschillen tussen de EMS-metingen en de overige experimenten

Bij een willekeurig experiment zijn alleen de gemiddelde snelheid en de waterdiepte bekend, maar het toepassen van vergelijking (5-1) om de schuifspanning te bepalen, leidt tot een onderschatting van de werkelijke schuifspanning. Het werkelijk optredende snelheidsprofiel levert immers een grotere schuifspanning dan op basis van vergelijking (5-1) kan worden verwacht.

Om de afwijking van het snelheidsprofiel mee te nemen in de bepaling van de schuifspanning bij een willekeurig experiment wordt de volgende methode aangehouden.

Uit een gemeten EMS-profiel kan de schuifspanning worden bepaald die optreedt bij een bepaalde opgelegde gemiddelde snelheid. Met vergelijking (5-7) kan dan een wrijvingscoëfficiënt worden bepaald die de afwijking van het snelheidsprofiel t.o.v. een logaritmisch profiel verwerkt:

$$C_{ijk} = \sqrt{\frac{\rho g \bar{u}_{debiet}^2}{\tau_{b,c,profiel}}} \dots\dots\dots(5-7)$$

Uit vergelijking (5-7) volgt, voor een EMS-meting waarbij de schuifspanning bekend is, een kunstmatige ijkcoëfficiënt waarmee een ijkruwheid kan worden bepaald:

$$k_{ijk} = \frac{12h}{10^{\left(\frac{C_{ijk}}{18}\right)}} \dots\dots\dots (5-8)$$

Deze ijkruwheid kan worden gebruikt om in een experiment met een willekeurige golfhoogte en een andere waterdiepte, maar met ongeveer dezelfde gemiddelde snelheid als tijdens de EMS-meting zonder golven, een wrijvingscoëfficiënt te bepalen. De schuifspanning kan nu wel berekend worden met vergelijking (5-1), omdat er een aangepaste wrijvingscoëfficiënt gebruikt is.

EMS-profiel meting	Ingestelde snelheid volgens debiet (m/s)	$\tau_{b,c}$ zoals bepaald uit het profiel (N/m ²)	C_{ijk} uit verg. (5-7) (m ^{0.5} /s)	$k_{ijk} = x*d_{50}$ verg. (5-8)	h/k_{ijk}
1	0,35	0,7	41,43	2,6	16,7
2	0,43	0,81	47,32	1,4	34,2
3	0,54	1,39	45,36	1,7	26,8
4	0,66	2,04	45,77	1,5	29

Tabel 5-3: Bepaling van de ijkruwheden

Tabel 5-3 geeft een overzicht van de ruwheden waarmee gerekend moet worden om bij een opgelegde snelheid dezelfde waarde van de bodemschuifspanning te krijgen als de waarde die uit het snelheidsprofiel bepaald is. Het valt op dat de ijkruwheid van de eerste EMS-profielmeting relatief hoog is t.o.v. de andere EMS-metingen. Dit komt doordat het gemeten profiel in dat geval het meest afwijkt van een logaritmisch profiel.

De ijkruwheden van de EMS-profielmetingen 2 t/m 4 zijn lager dan de uit het snelheidsprofiel afgeleide ruwheden, zoals deze in Tabel 5-1 vermeld staan. Dit komt doordat het gemeten profiel weinig afwijkt van een logaritmisch profiel, maar de gemiddelde snelheid die uit het debiet berekend is hoger is dan de gemiddelde snelheid die bepaald is uit het profiel. Om bij die hogere ingestelde gemiddelde snelheid, toch de schuifspanning behorend bij het profiel te krijgen, moet er met een lagere ruwheid worden gerekend.

De ijkruwheid heeft geen fysische betekenis, maar is een kunstmatige parameter die het mogelijk maakt om met iets andere waterdiepten en stroomsnelheden te rekenen.

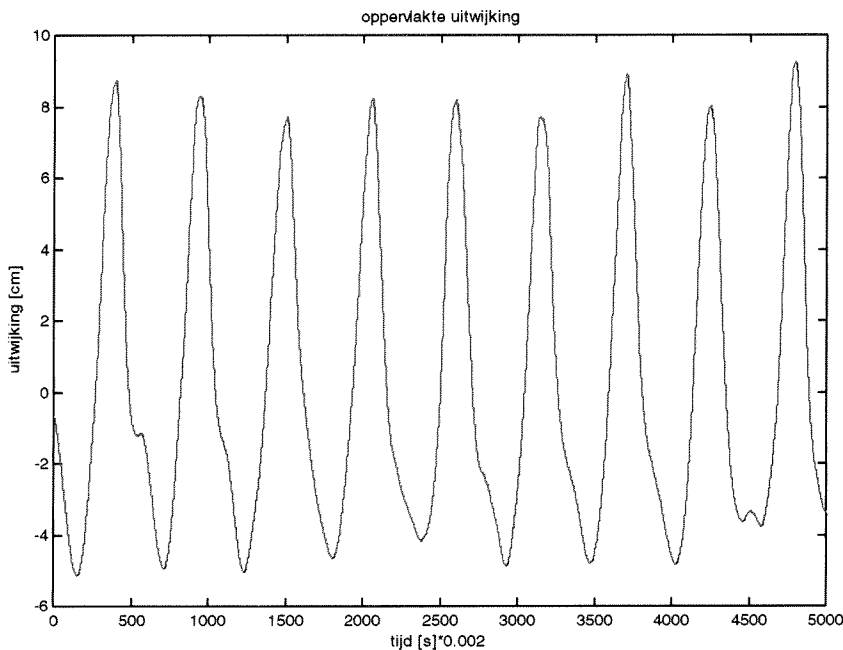
Bijvoorbeeld, wanneer de stromingsbelasting voor een experiment uit serie 3 berekend moet worden, dan kan met $k=1,7*d_{50}$ en de optredende waterdiepte een wrijvingscoëfficiënt worden berekend. De schuifspanning volgt dan uit vergelijking (5-1) waar voor de gemiddelde snelheid de waarde moet worden ingevuld zoals die met het debiet is ingesteld. Op deze manier is voor ieder experiment berekend welke schuifspanning de stroming op de bodem veroorzaakt.

5.2 Bepaling van de belasting door de golven

5.2.1 Beschrijving van het golfbeeld

Tijdens de experimenten bleek dat de uitwijking van het wateroppervlak boven de verhoogde bodem duidelijk niet sinusvormig was.

Op de verhoogde bodem ontstaat een ondiepwater-golf. De dalen van deze golf zijn vlakker en langer en de toppen zijn hoger en steiler. Een voorbeeld van een willekeurige golfregistratie staat in Figuur 5-3



Figuur 5-3: Golfbeeld boven de drempel tijdens een experiment

De maximale uitwijking van de golf uit Figuur 5-3 bedraagt 9 cm en de minimale uitwijking is 5 cm. Dit betekent dat de lineaire golftheorie waarvoor geldt dat de oppervlakte uitwijking:

$$\eta(x, t) = a \sin(\omega t - kx) \dots\dots\dots(5-9)$$

niet meer van toepassing is.

In vergelijking (5-9) is:

η = oppervlakte-uitwijking [m];

a = amplitude van de oppervlakte-uitwijking [m].

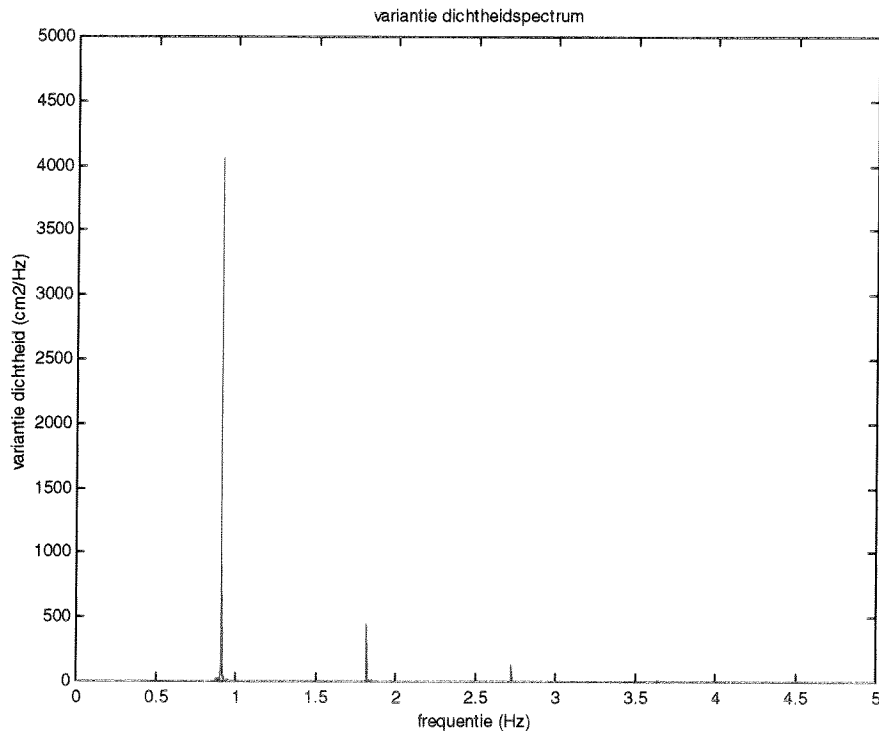
Vergelijking (5-9) beschrijft alleen symmetrische profielen. Om een asymmetrisch oppervlakteprofiel te beschrijven moeten er hogere orde termen aan vergelijking (5-9) toegevoegd worden:

$$\eta(x, t) = a_1 \sin(\omega_1 t - k_1 x) + a_2 \sin(\omega_2 t - k_2 x) \dots\dots\dots + \dots\dots a_n \sin(\omega_n t - k_n x) \dots\dots\dots(5-10)$$

De oppervlakte uitwijking is nu opgebouwd uit de som van een aantal sinussen of cosinussen. Bij de analyse van onregelmatige golven is het gebruikelijk om vergelijking (5-10) voor de registratie in een punt als volgt weer te geven:

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N a_n \sin(\omega_n t + \alpha_n) \dots\dots\dots(5-11)$$

Met behulp van een Fourier-transformatie is het signaal van de golfhoogte registratie geanalyseerd. Uit deze analyse blijkt dat het signaal niet alleen opgebouwd is uit een golf met een frequentie die overeenkomt met de frequentie van het golfschot (f_1), maar dat er ook hogere orde golven door heen lopen met frequenties $2f_1$ en $3f_1$. Dit wordt het duidelijkst weergegeven in het golfspectrum. Figuur 5-4 presenteert het spectrum van het golfbeeld van Figuur 5-3, waarbij de stroomsnelheid 0,57 m/s bedraagt. De periode waarmee het golfschot aangestuurd is bedraagt 1,1s. De gemiddelde golfhoogte is 13,4 cm.



Figuur 5-4: Variantie-dichtheidspectrum voor de golfregistratie uit Figuur 5-3

De duidelijk zichtbare hogere orde componenten zijn golven die onlosmakelijk verbonden zijn aan het kunstmatige karakter van een regelmatige laboratoriumgolf. Door middel van een verticaal oscillerend golfschot wordt een golf opgewekt met dezelfde frequentie als het golfschot. Deze golf gaat zich aanpassen aan de goot en gaat zelf hogere orde componenten maken. Dit effect wordt versterkt door het ondieper worden. Het asymmetrische profiel kan alleen maar veroorzaakt worden door hogere orde componenten.

In dit specifieke geval (Figuur 5-3) zijn de hogere orde componenten ook zichtbaar doordat er zich een secundair maximum in de oppervlakte uitwijking bevindt. Dat secundaire maximum doet zich voor als:

$$U \equiv \frac{HL^2}{h^3} \geq 25 \dots\dots\dots(5-12)$$

De parameter U wordt het getal van Ursell genoemd en geeft aan of hogere orde componenten visueel waarneembaar zijn. Wanneer het getal van Ursell groter is dan 25, is de Stokes tweede orde theorie niet langer toepasbaar (Battjes, 1997). In dat geval is de oppervlakte-uitwijking niet meer te beschrijven met 2 componenten en moeten er nog hogere orde componenten worden meegenomen. Voor het golfbeeld uit Figuur 5-3 geldt dat $U=34$. In de analyse van het golfsignaal moeten dus hogere orde componenten worden meegenomen.

5.2.2 Splitsing van het gemeten golfsignaal in verschillende componenten

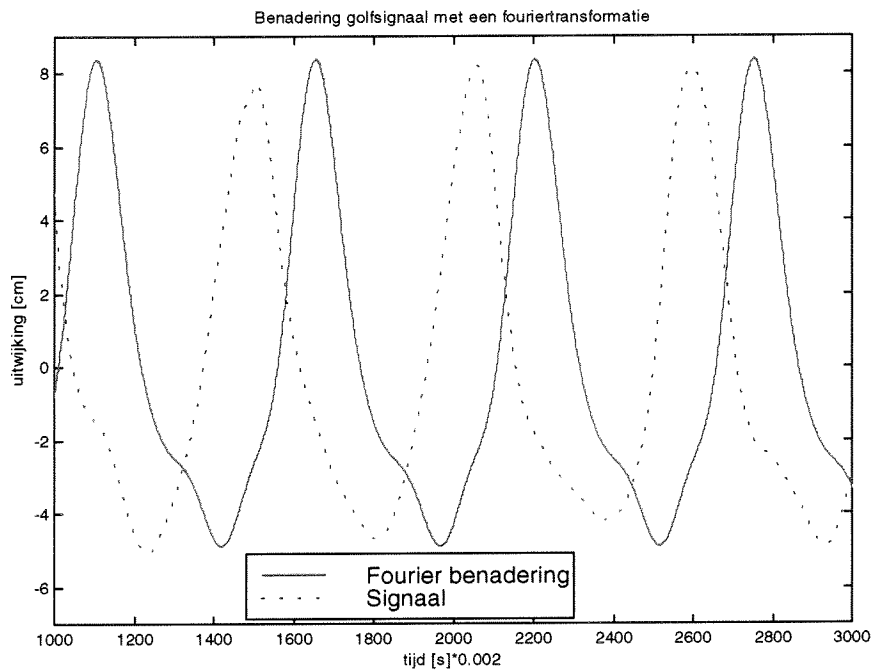
Uit het spectrum is per "piek" de oppervlakte onder het spectrum bepaald. Deze oppervlakte is gelijk aan de variantie die een component bezit. Deze variantie wordt toegewezen aan een sinusvormige golf met een frequentie die bij de "piek" hoort. Op deze manier is het mogelijk om de amplitude en de faseverschuiving van een component te berekenen.

Hoofdstuk 5 Afleiding van de belasting uit de experimenten

Uit het spectrum in Figuur 5-4 blijkt dat dit signaal teruggebracht kan worden tot 3 componenten:

$$\eta(t) = 0,058 \sin(2\pi f_1 t + 1,39) + 0,019 \sin(4\pi f_1 t + 1,58) + 0,009 \sin(6\pi f_1 t + 1,13) \dots\dots\dots(5-13)$$

f_1 is gelijk aan de frequentie waar het golfschot mee aangestuurd is (0,9095 Hz).

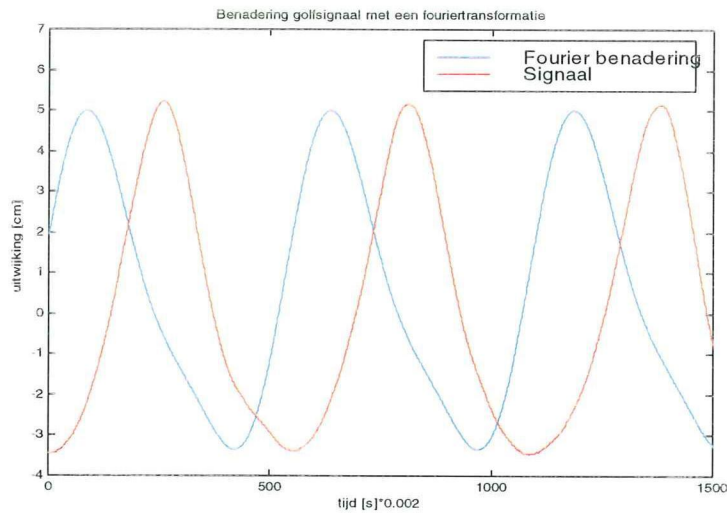


Figuur 5-5: Vergelijking tussen het gemeten signaal en een benadering op basis van vier componenten

In Figuur 5-5 is het gemeten signaal uitgezet tegen de benadering met vergelijking (5-13). Hierin bevindt zich nog een faseverschil om de verschillen tussen de benadering en het signaal te accentueren. Verder lijkt de benadering goed te kloppen met het signaal. Ook de gemiddelde golfhogten van de benadering en van het signaal zijn aan elkaar gelijk (13,4 cm). De Fourierbenadering (formule 5-13) vormt dus een uitstekende benadering voor het signaal.

In Figuur 5-6 staat een voorbeeld van een registratie van een golfbeeld met een kleinere Ursell parameter dan in Figuur 5-3. De kenmerkende gegevens van deze registratie zijn:

- Ursell getal = 21
- Gem. stroomsnelheid = 0,57 m/s
- Frequentie golfschot = 0,90485 Hz
- Waterdiepte = 0,28 m



Figuur 5-6: Vergelijking tussen het gemeten signaal en de Fourier-benadering (5-7)

De vergelijking waarmee het gemeten signaal benaderd wordt is:

$$\eta(t) = 0,039 \sin(2\pi f_1 t + 0,36) + 0,0092 \sin(4\pi f_1 t + 0,096) \dots \dots (5-7)$$

Dit signaal is veel regelmatiger en er zijn geen secundaire maxima waarneembaar. De gemiddelde golfhoogten van de Fourier-benadering en het signaal zijn exact gelijk aan elkaar ($H=8,49$ cm).

Tijdens de experimenten bleek duidelijk dat, naarmate de golven hoger werden, de onregelmatigheid in het golfbeeld steeds groter werd. In alle gevallen is een hogere orde component te onderscheiden. In paragraaf 5.2.3 wordt bekeken in hoeverre deze hogere orde componenten doorwerken in de snelheid op de bodem.

5.2.3 De snelheid op de bodem t.g.v. de golven

Voor ieder golfcomponent die bijdraagt aan de uitwijking van het wateroppervlak kan met de lineaire golftheorie worden berekend wat de bijdrage van de component aan de snelheid op de bodem is. De amplitude van de snelheid op de bodem voor een component is gegeven door:

$$\hat{u}_{b,i} = \sigma_i a_{b,i} = \sigma_i \frac{a_i}{\sinh(k_i h)} \dots \dots \dots (5-14)$$

Wanneer echter de snelheid op de bodem in een vast punt moet worden bepaald, moet er gerekend worden met de periode die in een vast punt gemeten zou worden:

$$u_{b,i} = \hat{u}_{b,i} \cos(\omega_i t - \varphi_i) \dots \dots \dots (5-15)$$

In een vast punt is de snelheid op de bodem veroorzaakt door een golfcomponent sinusvormig, met een periode ($2\pi/\omega$). Met vergelijkingen (5-14) en (5-15) kan voor iedere component de bijdrage aan de snelheid op de bodem bepaald worden. Voor iedere component zijn via de dispersierelatie (3-1), de golflengte en de periode t.o.v. een met een snelheid \bar{u} meebewegend assenstelsel bekend. De amplitude en de faseverschuiving volgen uit de Fourier-analyse van het golfsignaal.

Voor het voorbeeld uit Figuur 5-3 is per golfcomponent de bijdrage aan de bodemsnelheid bepaald.

De kenmerkende gegevens voor dit voorbeeld zijn:

- Gemiddelde golfhoogte = 0,134 m
- Frequentie golfschot (f_1) = 0,909 Hz
- Waterdiepte = 0,276 m
- Gemiddelde stroomsnelheid = 0,57 m/s

De oppervlakte uitwijking is gegeven door de volgende vergelijking:

$$\eta(t) = 0,058 \sin(2\pi f_1 t + 1,39) + 0,019 \sin(4\pi f_1 t + 1,58) + 0,009 \sin(6\pi f_1 t + 1,13) \dots\dots(5-14/5-16)$$

Wanneer het totale snelheidsverloop op de bodem wordt beschreven, moet ook de bijdrage van de stroomsnelheid worden meegenomen. Deze component is echter afhankelijk van de golf-stroming interactie, zoals eerder bij de uitleg van de theorie van Grant en Madsen in paragraaf 3.4.2 gesteld is. De bijdrage van de stroomsnelheid aan de totale snelheid op de bodem is dus onbekend.

Het totale snelheidsverloop op de bodem in een vast punt kan beschreven worden met:

$$u_b(t) = u_{b,c} + 0,28 \cos(5,71t + 1,39) + 0,051 \cos(11,42t + 1,58) \dots\dots\dots(5-17)$$

Hierin is:

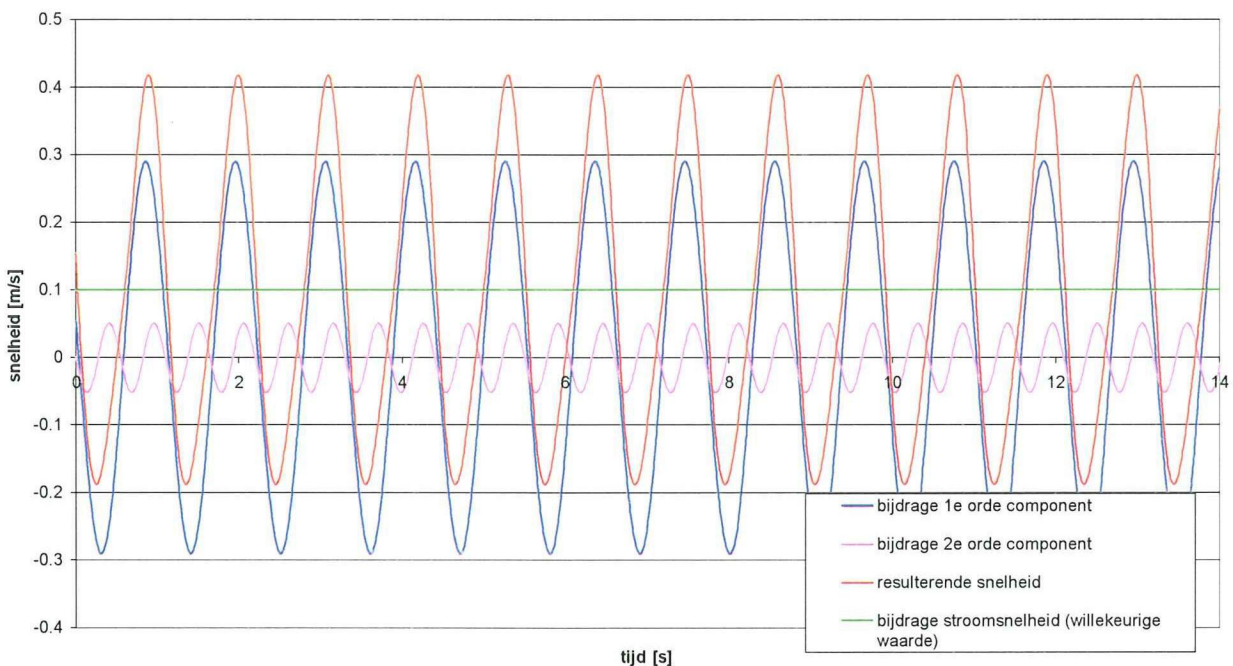
$u_{b,c}$ = de (onbekende) bijdrage van de stroomsnelheid aan de snelheid op de bodem [m/s].

Vergelijking (5-17) is geplot in Figuur 5-8.

Uit Figuur 5-8 blijkt dat de asymmetrie in de bodemsnelheid niet zo nadrukkelijk aanwezig is als bij de oppervlakte-uitwijking. De maximale uitwijking van de snelheid onder een top van de golf bedraagt 0,32 m/s ten opzichte van de gemiddelde stroomsnelheid en de minimale uitwijking van de snelheid onder een dal bedraagt 0,28 m/s. Dit verschil bedraagt 10 %.

De amplitude van de snelheid van de tweede orde component is 19% van die van de eerste component. Dit is een aanzienlijke bijdrage en deze bijdrage kan niet verwaarloosd worden. De hogere orde componenten moeten dus meegenomen worden in de berekening van de snelheid aan de bodem.

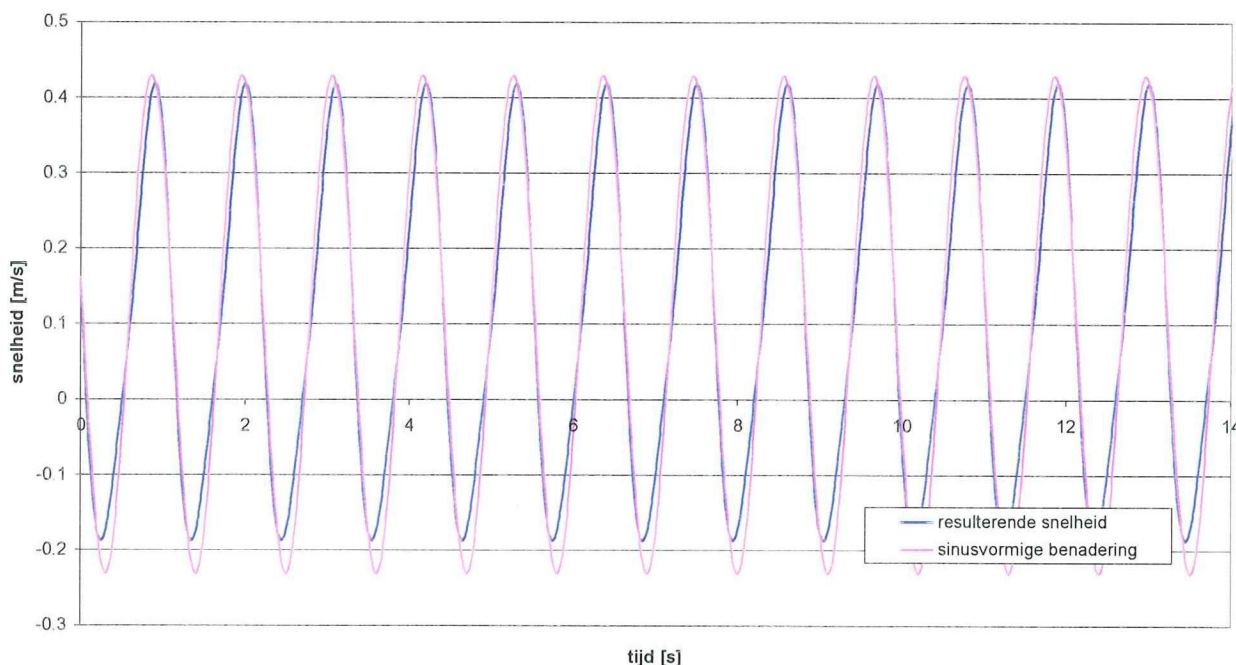
Resulterende snelheid op de bodem opgebouwd uit verschillende componenten



Figuur 5-8: Resulterende snelheid op de bodem

In paragraaf 3.2.2 is al aangegeven dat om het schuifspanningsverloop onder golven te bepalen gebruik wordt gemaakt van een weerstandfactor onder golven (f_w). Deze weerstand is alleen afhankelijk van de verhouding a_b/k_s . Er wordt gevraagd naar een amplitude aan de bodem. Per definitie is de weerstandsfactor dus afgeleid voor regelmatige golven. Bij dit onderzoek is er sprake van een duidelijke invloed van hogere orde componenten waardoor het begrip amplitude niet meer opgaat. Dit wordt opgelost door de golven te benaderen met een sinus met een amplitude die de helft van de gemiddelde golfhoogte bedraagt. De periode van de golf wordt gelijk gesteld aan de periode waarmee het golfschot is aangestuurd. Figuur 5-9 geeft een vergelijking tussen de snelheden op de bodem en de benadering met een sinus.

Vergelijking tussen de bodemsnelheid opgebouwd uit twee componenten en een sinusvormige benadering



Figuur 5-9: Benadering van het snelheidsverloop met een sinus

5.2.4 Berekening van de schuifspanning t.g.v. de golven in een willekeurig experiment

Uit Figuur 5-9 blijkt dat de maximale snelheden onder de golftoppen goed benaderd kunnen worden door het golfbeeld terug te brengen tot een sinus met een golfhoogte gelijk aan de gemiddelde golfhoogte van het signaal.

De amplitude van de schuifspanning op de bodem veroorzaakt door de golf is voor ieder experiment met deze vereenvoudiging volgens de procedure van Soulsby (1993 en 1997) uit paragraaf 3.4.3 berekend.

1. De amplitude van de snelheid aan de bodem t.g.v. de golf, waarmee de werkelijke oppervlakte uitwijking benaderd wordt, is bepaald met:

$$\hat{u}_{b,w} = \frac{\bar{H}\sigma}{2 \sinh(kh)} \dots\dots\dots(5-18)$$

Hierin is:

\bar{H} = de gemiddelde golfhoogte zoals gemeten bij de experimenten [m].

2. De amplitude van de orbitaalbeweging op de bodem volgt uit:

$$\frac{\hat{u}_{b,w}}{\omega} = a_b \dots\dots\dots(5-19)$$

3. Voor de bodemruwheid (k_s) is dezelfde waarde aangenomen als de waarde waarmee de stromingsschuifspanning bij hetzelfde experiment wordt bepaald (zie Tabel 5-3).

4. De weerstandsfactor onder golven is bepaald met:

$$\ln(f_w) = -5.977 + 5.213 \left(\frac{a_b}{k_s} \right)^{-0.194} \dots\dots\dots(3-13/5-20)$$

5. De amplitude van de schuifspanning aan de bodem volgt dan uit:

$$\hat{\tau}_{b,w} = \frac{1}{2} \rho f_w \hat{u}_{b,w}^2 \dots\dots\dots(3-11/5-21)$$

Voor ieder experiment is op deze manier de amplitude van de schuifspanning op de bodem bepaald. In Bijlage 5 vindt u per experiment een overzicht van de berekende waarden van de stromings- en golfschuifspanning.

Met het golf-stroming interactie model van Soulsby (zie daarvoor paragraaf 3.4.3) kan nu voor verschillende interactietheorieën de interactie tussen de schuifspanning t.g.v. golven en stroming berekend worden.

6 Analyse van de resultaten

6.1 Inleiding

In hoofdstuk 2 is aangegeven dat het transportproces van breuksteen de volgende aspecten bevat:

1. De pick-up rate: het volume van het aantal steentjes dat per eenheid van oppervlakte en per tijdseenheid is verplaatst.
2. Verplaatsingsafstanden van de steentjes.
3. Transporten: het volume van het aantal steentjes dat door een doorsnede verplaatst per eenheid van breedte en tijd.

In de uitwerking van de resultaten van de experimenten is duidelijk gezocht naar deze drie aspecten. Per experiment zijn in dit onderzoek deze kenmerkende aspecten van het transportproces bepaald. In paragraaf 6.3 wordt de pick-up rate geanalyseerd, in paragraaf 6.4 worden de verplaatsingsafstanden van de steentjes bekeken en in paragraaf 6.5 worden transporten bepaald. Voordat het transportproces in detail wordt geanalyseerd wordt in paragraaf 6.2 uitgelegd welke dimensieloze parameters de experimenten karakteriseren.

De betrouwbaarheid van de resultaten vormt een belangrijk aandachtspunt in dit onderzoek. In paragraaf 6.6 vindt u een betrouwbaarheidsanalyse van de resultaten van dit onderzoek. Tot slot wordt in paragraaf 6.7 een overzicht gegeven van de belangrijkste beperkingen.

Tijdens de eerste proeven bleek dat de steentjes van het eerste meetgebied, dat zich 5 meter achter de helling van de verhoogde drempel bevond, veel minder ($\pm 50\%$) verplaatsten dan de steentjes van het tweede meetgebied.

De steentjes in het eerste meetgebied waren veel minder mobiel dan de steentjes in het tweede meetgebied. Het is onduidelijk waardoor dit veroorzaakt werd, maar het eerste meetgebied van de meetopstelling is niet meer gebruikt tijdens dit onderzoek.

Een andere belangrijke constatering was dat verplaatsingen van steentjes uit de eerste meetstrook van een meetgebied en uit de laatste meetstrook van een meetgebied sterk afweken van de verplaatsingen in de overige meetstroken. Deze stroken vormen een overgang tussen de vaste steentjes op de drempel en de losse steentjes in het meetgebied en kennelijk zorgt deze discontinuïteit in de bodem ervoor dat de verplaatsingen in deze meetstroken afweken t.o.v. de overige meetstroken. De verplaatsingen in de randstroken weken zodanig af van de overige stroken dat er besloten is om de stroken aan de randen van het meetgebied niet mee te rekenen.

6.2 Dimensie-analyse

6.2.1 Stromingssituatie

Om de experimenten op een heldere wijze weer te geven en om een indruk te krijgen welke parameters de experimenten goed beschrijven is het noodzakelijk om een dimensie-analyse te maken waarin het relatieve belang van een aantal eigenschappen van de stroming wordt weergegeven.

Een dimensie-analyse vormt ook de eerste aanzet tot een schalingsanalyse. Twee verschillende stromingssituaties zijn alleen gelijkvormig aan elkaar qua geometrie, dynamica en kinematica, wanneer elke relevante dimensieloze parameter dezelfde waarde heeft in beide stromingen (Battjes, 1990).

Een gevolg van een "slim" gekozen aanpak van een dimensie-analyse kan zijn dat meetdata bij een grafische presentatie samenvallen, waardoor er verbanden tussen de dimensieloze parameters duidelijk worden.

Het is gebruikelijk om in de vloeistofmechanica bij het creëren van relevante dimensieloze parameters eerst een opsomming te maken van alle relevante onafhankelijke variabelen. Daarna kunnen er uit deze reeks dimensieloze parameters worden samengesteld.

Hoofdstuk 6 Analyse van de resultaten

In dit onderzoek wordt een experiment gekenmerkt door de volgende parameters.

Variabele	Symbool	Eenheid
Gravatieversnelling	g	[m/s ²]
Soortelijke massa water	ρ_w	[kg/m ³]
Soortelijke massa bodemmateriaal	ρ_s	[kg/m ³]
Mediane diameter bodemmateriaal	d_{50}	[m]
Waterdiepte boven de verhoogde bodem	h	[m]
Kinematische viscositeit	ν	[m ² /s]
Golflengte	L	[m]
Golfhoogte	H	[m]
Gemiddelde stroomsnelheid	\bar{u}	[m/s]

Tabel 6-1: Relevante variabelen waarmee de dimensie-analyse uitgevoerd is

Tabel 6-1 vormt een vereenvoudiging van de eerdere opsomming van de relevante variabelen in Tabel 4-1.

De grootste vereenvoudiging t.o.v. de opsomming in Tabel 4-1 schuilt in de manier waarop de bodem geschematiseerd wordt. De bodem wordt geschematiseerd tot een verzameling bollen en de enige twee variabelen die de eigenschappen van de bodem beschrijven zijn de soortelijke massa van de steentjes en een karakteristieke diameter van de steentjes. De vorm en gradatie van de steentjes worden dus verwaarloosd. Het is echter twijfelachtig of die twee parameters verwaarloosd kunnen worden, maar in het beperkte kader van dit onderzoek kon dit niet meegenomen worden.

Verder wordt er geen rekening mee gehouden dat de lengte van het bed van invloed kan zijn op de verplaatsingen van de steentjes. In paragraaf 6.4 wordt dit aspect verder uitgewerkt.

In Tabel 4-1 stond als variabele ook nog de duur van de belasting vermeldt. De metingen zijn echter verricht aan een volledig gerijpt bed, zodat het effect van de duur van de belasting niet meer speelt (zie daarvoor paragraaf 4.4.3).

Uit de lijst blijkt dat er maar drie basisdimensies zijn namelijk massa, lengte en tijd. Uit de lijst met onafhankelijk variabelen worden drie variabelen gekozen, waarin de basisdimensies in een andere verhouding voorkomen, in dit geval ρ_w , h en \bar{u} . Met deze drie variabelen worden de andere variabelen dimensieloos gemaakt.

Deze aanpak resulteert in de volgende dimensieloze verhoudingen die het experiment volledig beschrijven.

Het Froude-getal:
$$Fr = \frac{\bar{u}}{\sqrt{gh}} \dots\dots\dots(6-1)$$

De dimensieloze golflengte:
$$\frac{h}{L} \dots\dots\dots(6-2)$$

De dimensieloze golfhoogte:
$$\frac{H}{h} \dots\dots\dots(6-3)$$

De dimensieloze dichtheid:
$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \dots\dots\dots(6-4)$$

De dimensieloze diameter van de steentjes:
$$r = \frac{h}{d_{50}} \dots\dots\dots(6-5)$$

(Dit is dus een soort maat voor de bodemruwheid)

Het getal van Reynolds: $Re = \frac{\bar{u}h}{\nu}$ (6-6)

6.2.2 Verplaatsingen

De gemeten verplaatsingen van de steentjes worden op de volgende manier dimensieloos gemaakt.

Pick-up rate van het bodemmateriaal

- Gemeten tijdens de experimenten: aantal steentjes verplaatst per 3600 golven per strook.
- Pick-up rate (p_s): volume van het aantal verplaatste steentjes per m^2 per seconde.

$$p_s = \frac{m^3}{m^2 s} = \frac{\text{aantal verplaatste steentjes uit een strook} \times d_{n50}^3}{\text{strookbreedte} * \text{strooklengte} * \text{meetduur}} \dots\dots\dots(6-7)$$

- Dimensieloze pick-up rate (ϕ_p):

$$\phi_p = \frac{p_s}{\sqrt{\Delta g d_{50}}} \dots\dots\dots(6-8)$$

- Rekenvoorbeeld: als er binnen een uur gemiddeld één steentje uit een strook verplaatst, dan is:

$$p_s = \frac{1 * (5,45 \cdot 10^{-3})^3}{0,5 * 0,05 * 3600} = 1,80 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3 / \text{s} \text{ en } \phi_p = \frac{1,80 \cdot 10^{-9}}{\sqrt{1,55 * 9,81 * 6,46 \cdot 10^{-3}}} = 6,65 \cdot 10^{-9} .$$

Verplaatsingslengte van het bodemmateriaal

- Gemeten tijdens de experimenten: de verplaatsingsafstand van ieder verplaatst steentje.
- 50 % onderschrijdingsafstand ($X_{s,50}$): afstand die door 50% van de verplaatsingen onderschreden wordt.
- 90 % onderschrijdingsafstand ($X_{s,90}$): afstand die door 90% van de verplaatsingen onderschreden wordt.
- De onderschrijdingsafstanden worden dimensieloos gemaakt door ze te delen door de nominale mediane diameter.

Transport van bodemmateriaal

- Gemeten tijdens experimenten: aantal steentjes verplaatst door een meetraai per 3600 golven.
- Transportparameter (q_s): volume van het aantal steentjes dat door een raai per eenheid van tijd en per eenheid van breedte verplaatst:

$$q_s = \frac{m^3}{ms} = \frac{\text{aantal steentjes verplaatst door een raai} \times d_{n50}^3}{\text{raai breedte} * \text{meetduur}} \dots\dots\dots(6-9)$$

- Dimensieloze transportparameter (ϕ):

$$\phi = \frac{q_s}{\sqrt{\Delta g d_{50}^3}} \dots\dots\dots(6-10)$$

- Rekenvoorbeeld: als er binnen een uur gemiddeld één steentje door een raai verplaatst, dan is:

$$q_s = \frac{1 * (5,45 \cdot 10^{-3})^3}{0,5 * 3600} = 8,99 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 / \text{s} \text{ en } \phi_p = \frac{8,99 \cdot 10^{-11}}{\sqrt{1,55 * 9,81 * (6,49 \cdot 10^{-3})^3}} = 4,41 \cdot 10^{-8}$$

6.3 Pick-up rate

6.3.1 Analyse van de waarnemingen

Van ieder experiment is opgeschreven hoeveel steentjes uit een strook verplaatsten gedurende het experiment. Voor een uitgebreide beschrijving van de gehanteerde meetmethode wordt verwezen naar paragraaf 4.4.3.

In Bijlage 7 vindt u per proevenserie van iedere golfhoogte het aantal steentjes dat verplaatst tijdens de experimenten. De aantallen steentjes die in de grafiek zijn uitgezet, zijn de aantallen steentjes die uit een strook verplaatst zijn. De kleur van het verplaatste steentje is in de grafiek niet vermeld.

Uit de waarnemingen komt het volgende naar voren.

Het oppikken van steentjes is onregelmatig; zowel de plaats waar de steentjes opgepikt worden, als de aantallen steentjes die opgepikt worden, wisselen sterk.

Het verplaatsen van steentjes uit een strook wisselt sterk per experiment. Het beste voorbeeld is het laatste experiment uit serie 3 met een golfhoogte van 15 cm. Na 3600 golven waren er negen steentjes uit de "turquoise" strook verplaatst. In het voorafgaande experiment met een golfhoogte van 14,2 cm verplaatsten er geen steentjes uit de "turquoise" strook. (Zie daarvoor Figuur B7-4)

Het verplaatsen van steentjes verschilt sterk per strook. Bij het voorafgaande voorbeeld verplaatsten er negen steentjes uit de "turquoise" strook. Onder precies dezelfde omstandigheden verplaatste er uit het oranje gebied geen enkel steentje.

Er zijn twee soorten pick-up, namelijk primaire en secundaire pick-up te onderscheiden.

Primaire pick-up

Dit is de pick-up van steentjes die vanaf hun oorspronkelijke plaats verplaatsen. Dit zijn dus bijvoorbeeld de gele steentjes die gedurende de meetperiode uit de gele meetstrook verplaatsen. De primaire pick-up is niet afhankelijk van de plaats van een meetstrook in het meetgebied. Voor iedere strook is de kans even groot dat een steentje opgepikt wordt, mits de omstandigheden gelijk zijn, en gemiddeld genomen is de primaire pick-up over de meetstroken gelijk. De primaire pick-up is niet afzonderlijk aangegeven in de grafieken, maar de gemiddelde waarden van de primaire pick-up over de achterste zes stroken zijn onder de grafieken in een tabel vermeld.

Secundaire pick-up

De totale pick-up is gedefinieerd als het aantal steentjes dat per eenheid van oppervlakte wordt opgepikt. Dit betekent dat ook steentjes die niet oorspronkelijk in een meetstrook aanwezig waren, maar daar tijdens de voorbelasting in terecht zijn gekomen, nog meegenomen moeten worden in de bepaling van de totale pick-up, wanneer deze anders gekleurde steentjes opgepikt worden uit de betreffende meetstrook. Wanneer bijvoorbeeld een geel steentje tijdens het voorbelasten in de groene meetstrook terechtkomt en vervolgens tijdens de proef opgepikt wordt uit de groene meetstrook, dan wordt deze verplaatsing in dit onderzoek aangemerkt als secundaire pick-up.

Het oppikken van steentjes uit een ander meetvak dan hun oorspronkelijke meetvak wordt omschreven als secundaire pick-up.

Dit betekent dat de totale pick-up rate aan de voorkant van het meetgebied lager is dan aan de achterkant van het meetgebied. Aan de voorkant is er geen aanvoer van steentjes en kan er geen secundaire pick-up plaatsvinden.

Aan de achterkant van het meetgebied verplaatsen ook steentjes die gedurende het voorbelasten afkomstig zijn uit de eerste meetstroken. Soms verplaatst er inderdaad een steentje een tweede keer. De secundaire pick-up heeft grote invloed op de werkelijk pick-up; in sommige gevallen is de werkelijke pick-up 80% hoger dan de primaire pick-up.

De kans dat een steentje nog een keer verplaatst is dus veel groter dan dat een steentje in eerste instantie verplaatst. Kennelijk komt een steentje ergens tot stilstand maar ligt het nog steeds meer blootgesteld aan de belasting dan de overige steentjes.

Vanaf de derde strook (de roze strook) is duidelijk waarneembaar dat er uit een strook ook steentjes met een andere kleur verplaatsen. In de eerste twee stroken bevinden zich te weinig anders gekleurde steentjes om binnen de beperkte meetduur voor de tweede keer te verplaatsen.

Daarom wordt de totale pick-up berekend over de achterste zes van de tien stroken, zodat het effect van de secundaire pick-up meegenomen wordt.

De totale pick-up is dus gegeven door de sommatie van primaire en secundaire pick-up. De totale pick-up staat uitgezet in de grafieken van Bijlage 7. In de tabel onder de grafieken is het verschil tussen de totale pick-up en de primaire pick-up zichtbaar.

6.3.2 *Pick-up parameter uitgezet tegen dimensieloze parameters*

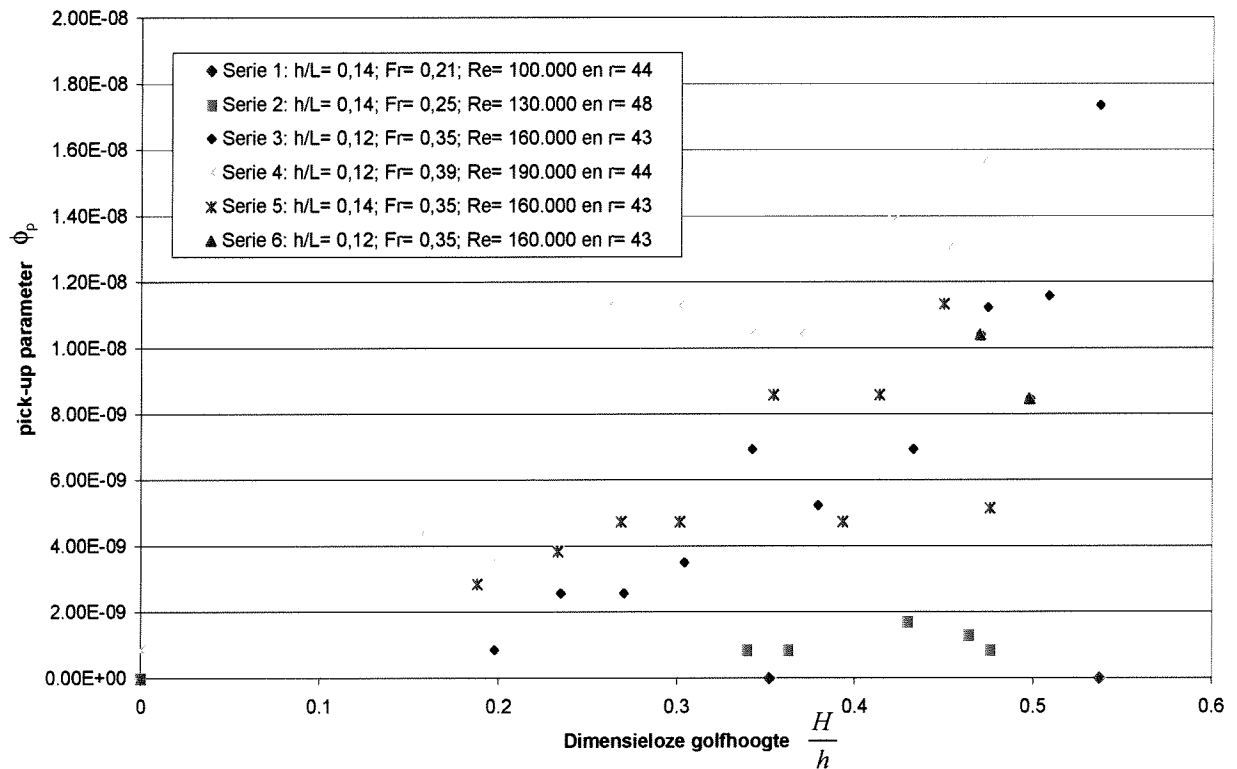
Wanneer voor alle experimenten de gemiddelde totale pick-up rate over de laatste zes meetstroken wordt genomen, kan men een trend onderscheiden. Deze trend wordt het duidelijkst weergegeven in Figuur 6-1 waarin per proevenserie de dimensieloze pick-up parameter tegen de dimensieloze golfhoogte staat uitgezet. De pick-up parameter is berekend volgens de methode uit paragraaf 6.2.2 en in Bijlage 6 vindt u voor alle experimenten de waarde van de pick-up parameter.

De verschillende series staan voor de verschillende proevenseries die gedaan zijn. De waarden van de andere relevante dimensieloze parameters staan in de grafiek vermeld. Uit Figuur 6-1 valt af te leiden dat:

1. wanneer per stroomsnelheid de golfhoogte groter wordt gemaakt, het aantal verplaatsingen toeneemt en dat, wanneer de golfhoogte constant wordt gehouden, het aantal verplaatsingen toeneemt bij een hogere stroomsnelheid.
2. wanneer op de y-as van de grafiek een vaste waarde voor de pick-up parameter wordt genomen, blijkt dat dezelfde pick-up bij verschillende combinaties van golfhoogte en stroomsnelheid op kan treden. Blijkbaar is de belasting hetzelfde in die gevallen. Het is dus noodzakelijk om een resulterende belastingsparameter te formuleren die opgebouwd is uit een golf- en een stromingscomponent. In hoofdstuk 2 is al gesteld dat alle transportformules een schuifspanning als belastingsindicatie nemen. Het is dus logisch in dit onderzoek een gecombineerde schuifspanning als belasting te gebruiken.
3. de invloed van de golfbelasting af lijkt te hangen van de stromingsbelasting. Bij serie 1 en serie 2 verplaatst er pas bij een zeer hoge golf een steentje. Bij de andere twee stroomsnelheden gebeurt dit al bij lagere golfhoogte en heeft een verhoging van de golfhoogte een grote invloed op het verplaatsen van steentjes.

Deze constatering leidt tot de veronderstelling dat de maximale optredende schuifspanning waarschijnlijk geen goede parameter voor de belasting is. Wanneer de maximale optredende schuifspanning maatgevend zou zijn, dan zouden ook bij lagere snelheden grotere pick-up waarden mogelijk moeten zijn. De maximale schuifspanning is voornamelijk afhankelijk van de golfbelasting. Op grond van deze beschouwing is de pick-up waarschijnlijk afhankelijk van de gemiddelde schuifspanning aan de bodem. In paragraaf 6.3.3 wordt deze veronderstelling verder uitgewerkt.

Pick-up van steentjes, uitgezet tegen kenmerkende dimensieloze parameters, $\Delta = 1,55$

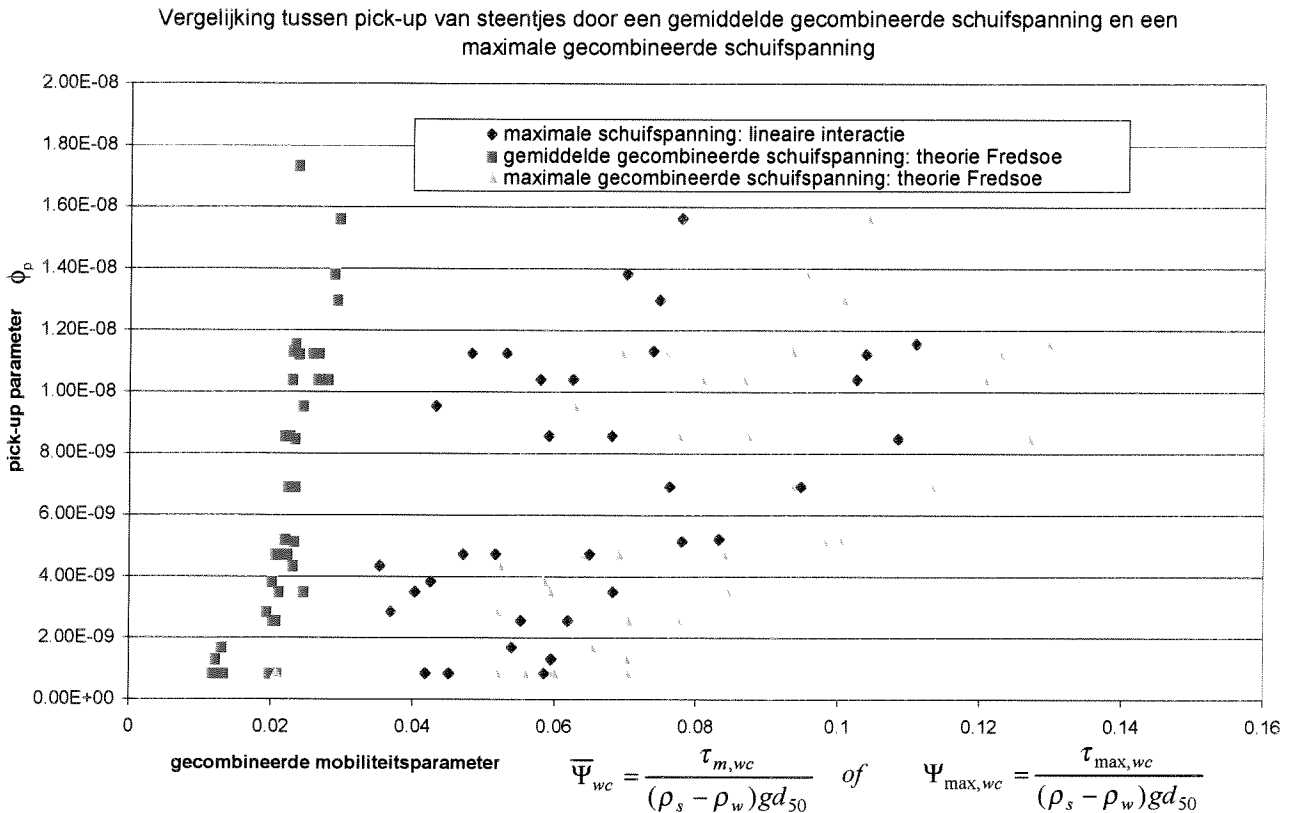


Figuur 6-1: Pick-up parameter van de verschillende experimenten, dimensieloos uitgezet

6.3.3 Pick-up uitgezet tegen een gecombineerde belasting

In Figuur 6-2 zijn de gemiddelde gecombineerde schuifspanning en de maximale gecombineerde schuifspanning ten gevolge van de interactie van golven en stroming dimensieloos uitgezet tegen de gemeten pick-up parameter. Voor alle grafieken in dit hoofdstuk geldt dat het model van Soulsby is gebruikt om een resulterende schuifspanning te berekenen. Voor meer informatie over het model van Soulsby wordt verwezen naar paragraaf 3.4.3.

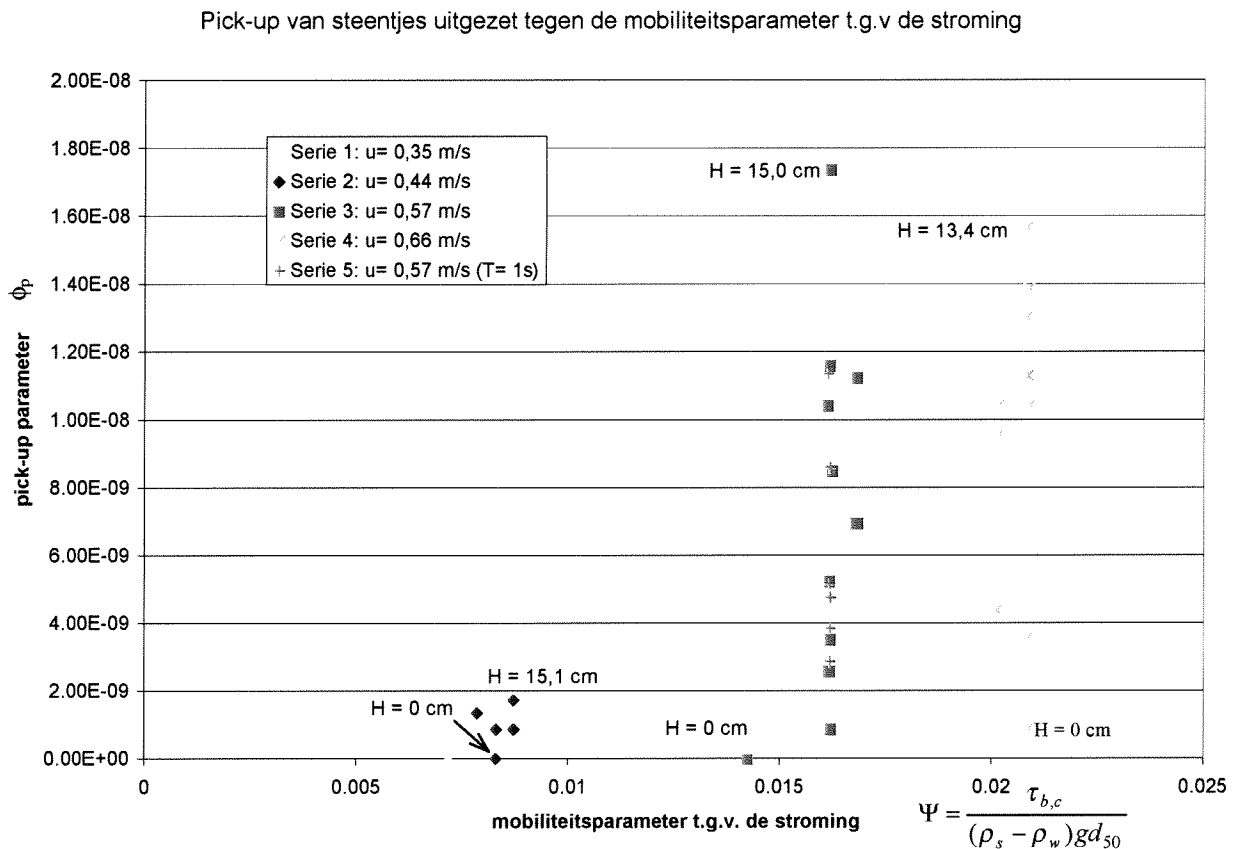
De gemiddelde gecombineerde schuifspanning en de maximale gecombineerde schuifspanning zijn bepaald met het model van Soulsby (1993 en 1997) volgens de golf-stroming interactietheorie van Fredsoe (1984), maar met een andere theorie had ook aangetoond kunnen worden dat de gemiddelde gecombineerde schuifspanning de smalste 'puntenwolk' oplevert.



Figuur 6-2: Pick-up parameter uitgezet tegen een gecombineerde mobiliteitsparameter

Het oppikken van steentjes blijkt afhankelijk te zijn van de gemiddelde schuifspanning, afgeleid uit de schuifspanning t.g.v. de stroming en de amplitude van de schuifspanning t.g.v. aan de bodem. Dit komt overeen met de waarnemingen. Een hogere golf zorgt er vooral voor dat de steentjes harder tegen elkaar aan bewegen, maar ze blijven op hun plaats. Pas als de stromingsbelasting groot genoeg is verplaatsen de steentjes.

Op grond van Figuur 6-2 zou men kunnen constateren dat er weinig invloed van de golven is op het oppikken van steentjes en dat vooral de stroming voor het verplaatsen van steentjes zorgt. Deze conclusie is niet gerechtvaardigd en in Figuur 6-3 wordt de invloed van de golven duidelijk aangetoond. Een hogere golfhoogte veroorzaakt wel degelijk meer transport, alleen de stroomsnelheid moet voldoende hoog zijn om verplaatsingen te veroorzaken. De invloed van een hogere golf uit zich in een hogere gecombineerde gemiddelde schuifspanning en deze hogere gemiddelde schuifspanning is in staat om meer steentjes te verplaatsen. In serie 1 verplaatste ook bij de hoogste golven geen enkel steentje. Deze waarneming ondersteunt de aanname dat een gemiddelde gecombineerde schuifspanning een goede maat voor de belasting op de steentjes is.

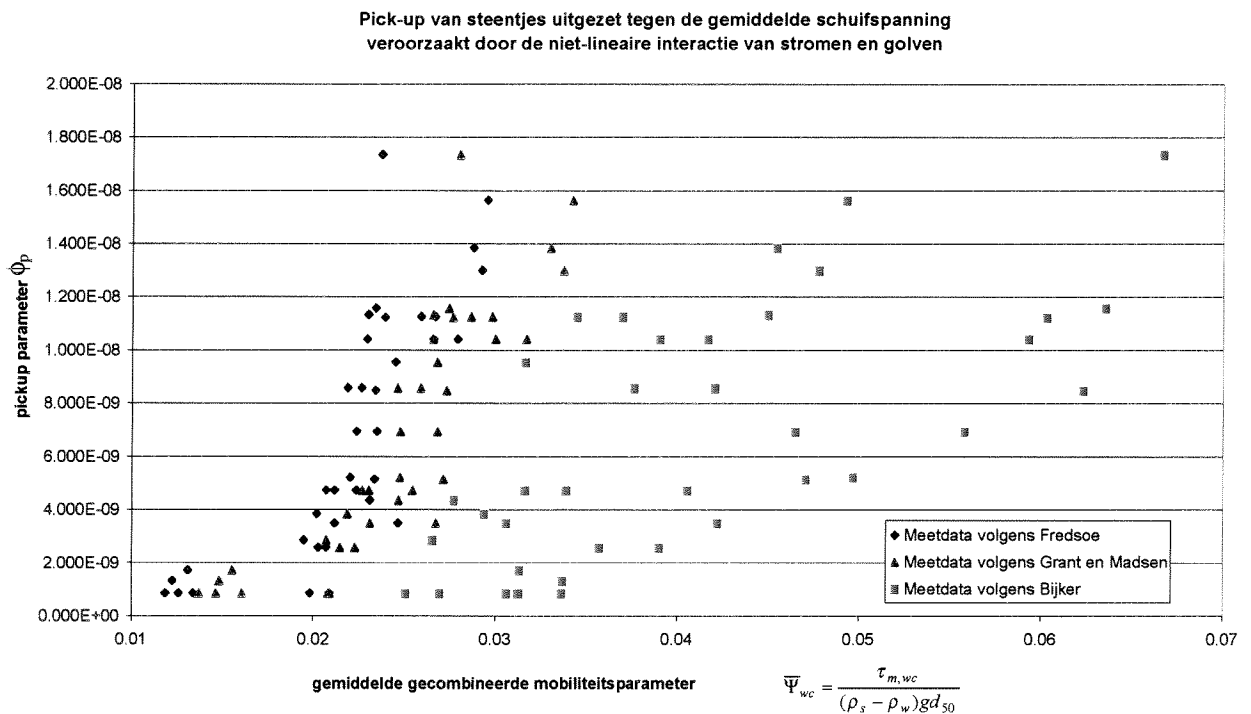


Figuur 6-3: Pick-up parameter uitgezet tegen de mobiliteitsparameter t.g.v. stroming; in de figuur is aangegeven met welke 'range' van golfhogten een proevenserie uitgevoerd is

Er is gelijkenis met het mechanisme dat Bijker (1967) en Van Rijn (1989) veronderstelden voor zandtransport. In hun beschrijving van bodemtransport van zand (zie vergelijking 2-20), is een transportgedeelte en een 'opwoel' -gedeelte te onderscheiden. Het 'opwoel' -gedeelte is afhankelijk van de gemiddelde schuifspanning, veroorzaakt door de interactie van de schuifspanningen van golven en stroming. Voor stortsteen is bij deze experimenten gebleken dat de gemiddelde schuifspanning maatgevend is voor de pick-up van steentjes. De golven kunnen gezien worden als een 'extra ruwheid' voor de stroming waardoor de gemiddelde schuifspanning op de bodem toeneemt.

De constatering dat een gemiddelde schuifspanning transport van steentjes veroorzaakt, vormt een bevestiging van het vermoeden van Soulsby en Whitehouse (1997), dat de maximale schuifspanning geen goede maat voor de belasting op de steentjes is (zie daarvoor paragraaf 2.3.2).

De vraag blijft welke golf-stroming interactietheorie de beste beschrijving van de resulterende schuifspanning aan de bodem geeft. Voor de drie golf-stroming interactietheorieën, zoals deze in paragraaf 3.4.2 besproken zijn, is in Figuur 6-4 de gemeten pick-up uitgezet tegen de gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter, omdat de gemiddelde gecombineerde schuifspanning een goede maat voor de belasting wordt geacht.



Figuur 6-4: Pick-up van steentjes uitgezet tegen drie verschillende golf-stroming interactiemodellen

Uit deze grafiek blijkt dat de theorie van Bijker (1967) niet voldoet om een relatie tussen de pick-up en de belasting te leggen. Wanneer de theorie van Bijker gebruikt zou worden, zou de spreiding van de pick-up parameter veel te groot zijn.

De gemiddelde schuifspanning volgens de theorie van Bijker vormt geen goede indicatie voor de belasting. Bijker geeft een veel te grote invloed van de golfbelasting.

De theorieën van Grant en Madsen (1979) en van Fredsoe (1984) lijken allebei redelijk te voldoen aan de metingen: ze geven een puntenwolk die meer in elkaar geschoven is.

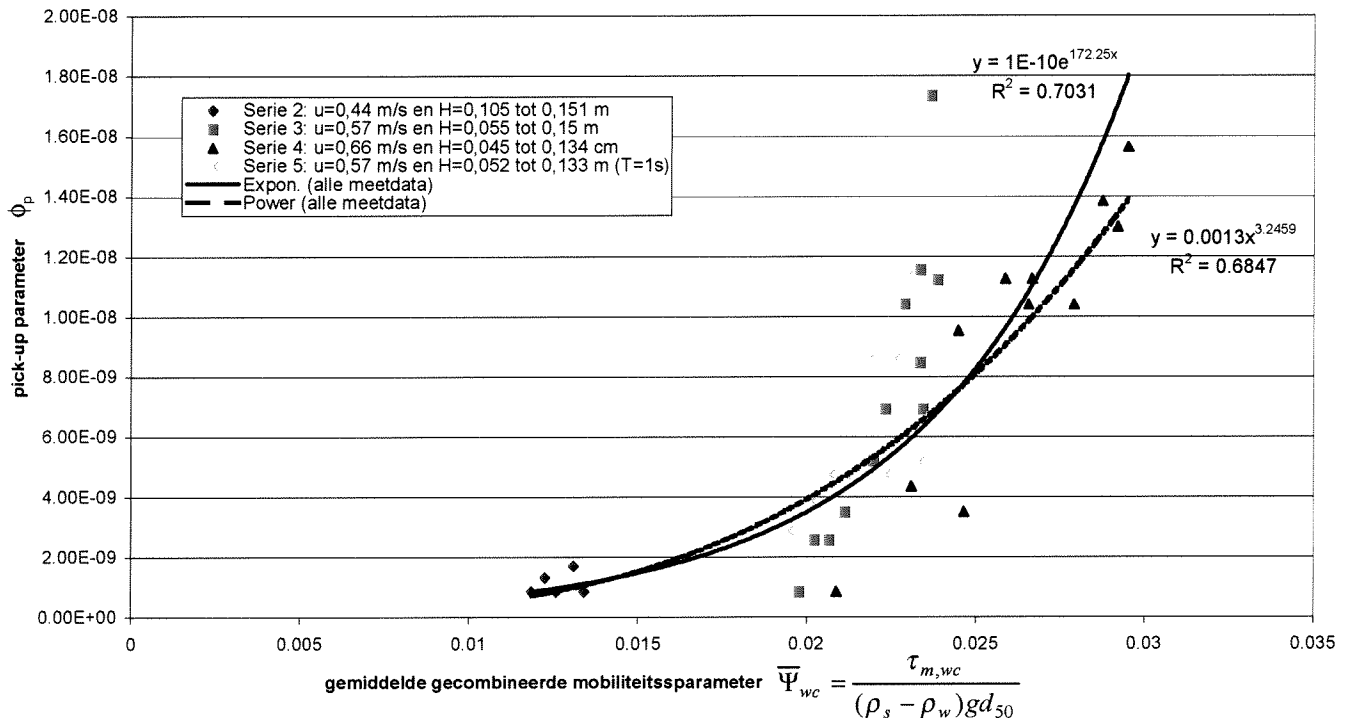
Het is mogelijk om op basis van deze grafiek een lijn te trekken die het beste voldoet aan de metingen. De covariantie (R^2) tussen de gefitte lijn en de meetwaarden is dan een maat voor de mate waarin de lijn overeenkomt met de meetwaarden.

In Figuur 6-5 en Figuur 6-6 zijn voor de theorie van Grant en Madsen (1979) en die van Fredsoe (1984) een aantal mogelijke benaderingen aangegeven.

De theorie van Grant en Madsen (1979) lijkt de best passende theorie te zijn, aangezien de beide covarianties van de trendlijnen op basis van de theorie van Grant en Madsen hoger zijn dan de covarianties van de trendlijnen gebaseerd op de theorie van Fredsoe (1984).

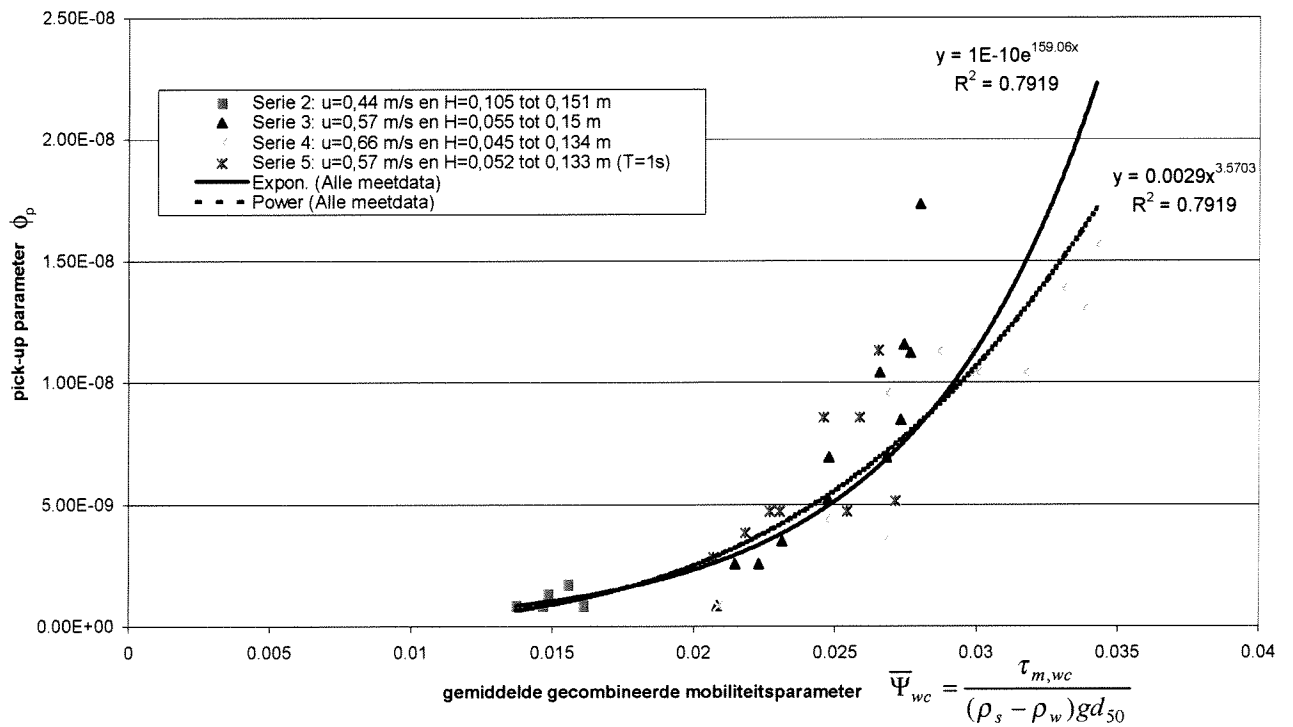
Verder lijken de meetwaarden van serie 4 bij de theorie van Fredsoe meer af te wijken van de overige meetwaarden dan bij de theorie van Grant en Madsen. Het model gebaseerd op de interactietheorie van Fredsoe geeft een zelfde beeld als de theorie van Grant en Madsen maar met een grotere spreiding.

Pick-up van steentjes, uitgezet tegen de gemiddelde gecombineerde schuifspanning door golf-stroming interactie op basis van de theorie volgens Fredsoe (1984)



Figuur 6-5: Pick-up van steentjes uitgezet tegen een dimensieloze gemiddelde schuifspanning, berekend volgens de interactietheorie van Fredsoe (1984)

Pick-up van steentjes, uitgezet tegen de gemiddelde gecombineerde schuifspanning door golf-stroming interactie op basis van de theorie volgens Grant en Madsen (1979)



Figuur 6-6: Pick-up van steentjes uitgezet tegen een dimensieloze gemiddelde schuifspanning, berekend volgens de interactietheorie van Grant en Madsen (1979)

De covarianties van de exponentiële benadering en van de machtsbenadering voor het model van Grant en Madsen (1979) zijn even groot. Er is dus geen voorkeur voor een exponentiële functie of een machtsfunctie. In dit onderzoek kan volstaan worden met een verband tussen de pick-up rate van steentjes en de gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter weergegeven door:

$$\phi_p = 1 \cdot 10^{-10} e^{(159,06 \bar{\Psi}_{wc,GM})} \dots\dots\dots (6-11)$$

$$\phi_p = 0,0029 \bar{\Psi}_{wc,GM}^{3,57} \dots\dots\dots (6-12)$$

voor $0,013 < \bar{\Psi}_{wc,GM} < 0,034$ en $d_{50} = 0,00648$ m.

Hierin is:

$\bar{\Psi}_{wc,GM}$ = de gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter volgens de golf-stroming interactietheorie van Grant en Madsen (1979)

De pick-up lijkt sterk af te hangen van de gemiddelde schuifspanning veroorzaakt door stromen en golven. Dit komt overeen met het algemene beeld van de experimenten. Is er eenmaal een bepaalde stroomsnelheid dan heeft verhoging van de golfhoogte tot gevolg dat er ineens veel meer steentjes bewegen. Een verhoging van de golfhoogte heeft bij lage stroomsnelheden relatief weinig effect.

Het is op zijn plaats om hier twee kritische opmerkingen te plaatsen over het afleiden van de formules (6-11) en (6-12).

In de eerste plaats is de covariantie van de formules, waarmee de meetwaarden benaderd worden in Figuur 6-6, niet groot genoeg (namelijk < 90%) om het gevonden verband tussen een gemiddelde schuifspanning en de pick-up van steentjes onomstotelijk voor "waar" aan te nemen. In Figuur 6-6 zijn duidelijk de verschillende stroomsnelheden nog te onderscheiden. Wanneer men per stroomsnelheid in Figuur 6-6 een lijn zou trekken die het verband tussen $\bar{\Psi}_{wc}$ en ϕ_p voor die ene stroomsnelheid weergeeft, dan zou deze lijn niet overeenkomen met de lijn die het verband weergeeft tussen $\bar{\Psi}_{wc}$ en ϕ_p voor alle stroomsnelheden. De invloed van de stroomsnelheid lijkt nog steeds zichtbaar te zijn en het is dus niet zeker of de gemiddelde gecombineerde schuifspanning de juiste maat voor de belasting op de steentjes is. Om met zekerheid te kunnen stellen dat de gemiddelde gecombineerde schuifspanning de juiste maat voor de belasting is, is het essentieel om bij hogere waarden (>0,035) van de gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter meetwaarden te verzamelen!

In de tweede plaats moet er benadrukt worden dat het onmogelijk is om algemeen geldende formules zoals formule (6-11) en (6-12) af te leiden zonder dat alle parameters gevarieerd zijn. In dit onderzoek zijn drie belangrijke parameters niet gevarieerd: de waterdiepte, de grootte van de steentjes en de periode van de golf. Zelfs de stroomsnelheid is maar in een beperkte range gevarieerd. De gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter is alleen gevarieerd door verandering van de golfhoogte. Om een algemeen geldende formule te krijgen zal er dus vervolgonderzoek plaats moeten vinden. In paragraaf 6.6 wordt dieper ingegaan op de betrouwbaarheid van de benadering in de formules (6-11) en (6-12).

Aan de ene kant is het opvallend hoe meetdata gaan samenvallen wanneer $\bar{\Psi}_{wc}$ als belastingparameter wordt gebruikt, maar aan de andere kant blijkt dat, wanneer het verband tussen $\bar{\Psi}_{wc}$ en ϕ_p in detail wordt bekeken, er reden is om de juistheid van dit verband in twijfel te trekken.

6.3.4 *Vergelijking met een bestaande pick-up functie voor stroming*

Voor stortsteen is door Nagakawa en Tsujimoto (1980) een formule afgeleid op basis van experimentele resultaten met bodemmateriaal met een diameter variërend van 3,5 mm en 13,5 mm, onder belasting van een uniforme stroming alleen.

Zij vonden de volgende vergelijking:

$$\phi_p = 0,03 \left(1 - \frac{0,035}{\Psi} \right)^3 \Psi \dots\dots\dots (6-13)$$

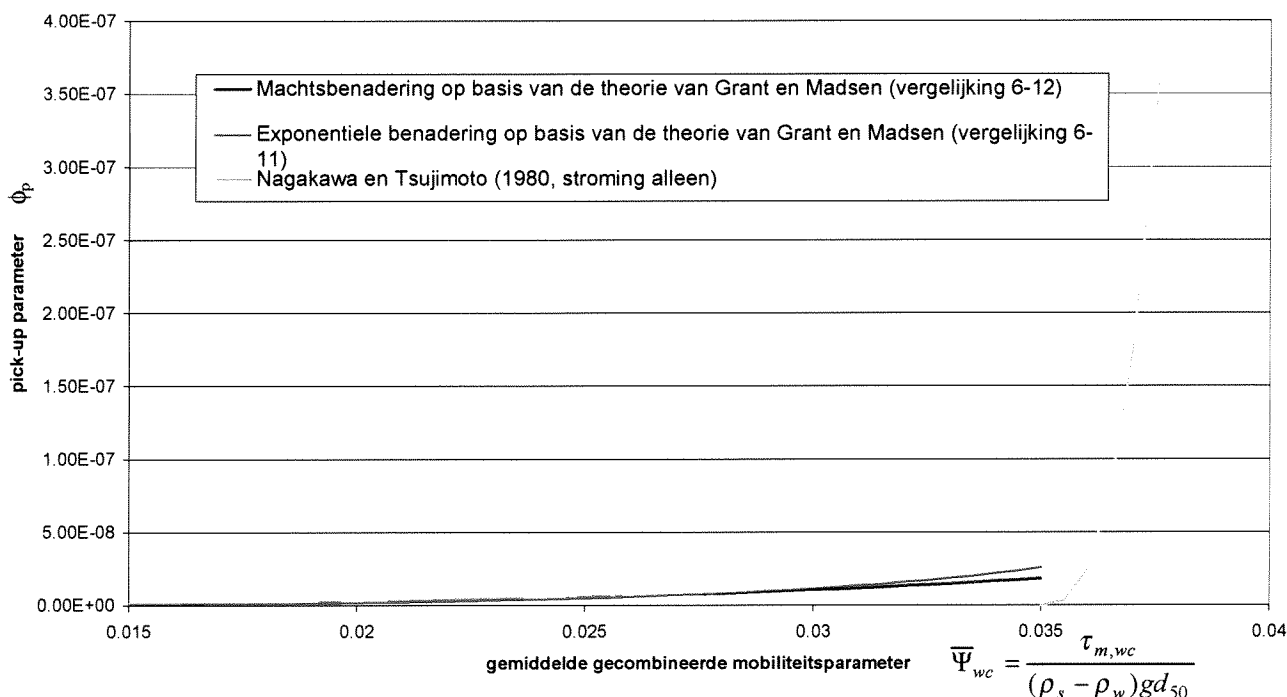
geldig voor $\Psi > 0,035$.

In Figuur 6-7 staan de twee pick-up functies volgens de interactietheorie van Madsen en Grant en de pick-up functie volgens de interactietheorie van Fredsoe uitgezet. Verder is vergelijking (6-13) erbij geplot.

Op de x-as staat de gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter. Het is wel van belang om onderscheid te maken tussen de mobiliteitsparameter van de stroming en de gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter van de golf-stroming interactie. In de gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter is de gemiddelde schuifspanning over een golfperiode verwerkt; zowel turbulente fluctuaties als de golfbeweging zijn hierdoor uitgemiddeld. De middeling van de schuifspanning in de stroming betreft puur de uitmiddeling van de turbulente fluctuaties.

Toch zijn de pick-up functies voor stroming en voor de combinatie van golven en stroming samen geplot, zodat het mogelijk is om ze met elkaar te vergelijken en eventueel algemene conclusies te trekken, bijvoorbeeld dat de gemiddelde schuifspanning t.g.v. golf-stroming interactie meer of minder transport veroorzaakt dan de gemiddelde schuifspanning t.g.v. een stroming.

Vergelijking tussen een pick-up functie voor stroming afzonderlijk en pick-up functies voor stroming en golven, die in dit onderzoek zijn gevonden



Figuur 6-7: Vergelijking tussen experimenteel vastgestelde pick-up functies en de pick-up functie van Nagakawa en Tsujimoto (1980)

Het blijkt dat bij een gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter kleiner dan 0,035 er toch steentjes opgepikt worden hoewel Nagakawa en Tsujimoto dat bij een belasting door stroming niet verwachten. De hoeveelheid steentjes die verplaatst is zeer klein, maar niet gelijk aan nul. De pick-up functies die in dit onderzoek gevonden zijn, hebben maar een zeer klein geldigheidsgebied. Binnen dit geldigheidsgebied lijkt een combinatie van stroming en golven meer pick-up te veroorzaken dan een stroming alleen. Om concreet te kunnen stellen dat een gemiddelde gecombineerde schuifspanning door golven en stromen meer pick-up veroorzaakt dan de gemiddelde schuifspanning door een stroming, zouden er meer meetdata bij grotere mobiliteitsparameters bekend moeten zijn.

Voor het ontwerpen van een stabiele bodemverdediging is de pick-up van stortsteen bij een mobiliteitsparameter rondom de Shieldparameter van belang. Dit onderzoek bekijkt gecombineerde mobiliteitsparameters die kleiner zijn dan 0,035; de pick-up rate die optreedt bij deze belastingsgevallen is zeer klein. De onderzochte belastingsgevallen vallen dus eigenlijk buiten het interessegebied. Om een hogere gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter te verkrijgen moet er harder gestroomd worden in de goot en het is dan zeer lastig om regelmatige golven te maken.

Verder valt het op dat de pick-up volgens Nagakawa en Tsujimoto gevoeliger is voor de mobiliteitsparameter dan de pick-up functies uit dit onderzoek, maar door gebrek aan data bij een grotere mobiliteitsparameter kan men de gevonden pick-up functies uit dit onderzoek niet goed vergelijken met de pick-up functie van Nagakawa en Tsujimoto.

6.4 Verplaatsingslengte

De verplaatsingslengte van de steentjes is een belangrijk aandachtspunt in dit onderzoek. De verplaatsingslengte geeft aan of de opstelling ook gebruikt kan worden om transporten te meten en te voorspellen. Transport van steentjes is gedefinieerd als het volume van het aantal steentjes dat verplaatst door een raai per eenheid van tijd en per eenheid van breedte. De lengte van de bodemverdediging speelt daarbij dus geen rol meer. Transportformules voorspellen het transport door een raai in een bed met een bij benadering oneindige lengte. De vraag is of het bed in deze opstelling beschouwd kan worden als een bed met een oneindige lengte.

In dit onderzoek is het meetgebied opgebouwd uit tien smalle stroken van 5 cm breed, ingeklemd tussen vastgelijmde steentjes. Er is dus duidelijk sprake van een eindig bed en de transporten door een raai aan het begin van het meetgebied zullen lager zijn, omdat er minder aanvoer van steentjes is dan aan het eind van het bed. Wanneer er weinig steentjes vanuit de eerste meetstrook over het meetgebied heen verplaatsen, kunnen er toch reële transporten gemeten worden. De veronderstelling dat een bed als oneindig te benaderen is hangt af van de verplaatsingslengte van de steentjes.

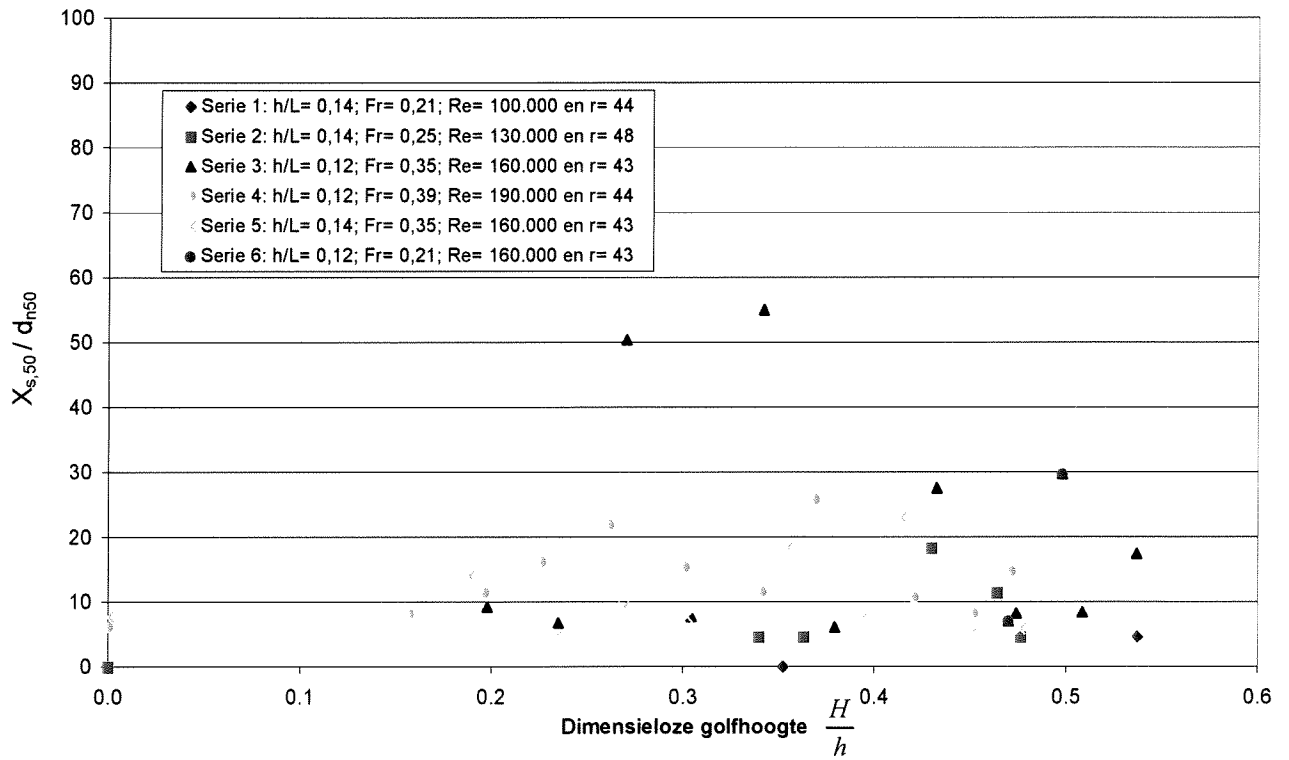
In Bijlage 8 staan per experiment de verplaatsingsafstanden van de steentjes weergegeven. In de figuren staat aangegeven uit welk vlak een steentje over een bepaalde afstand verplaatst is. Daarbij moet opgemerkt worden dat de minimaal te onderscheiden verplaatsingsafstand gelijk is aan de strookbreedte. Alle verplaatsingsafstanden zijn dus afgerond op getallen deelbaar door 5 cm. Wanneer bijvoorbeeld een steentje vanuit de gele naar de groene strook (een strook verder) verplaatst, is een afstand van 5 cm aangenomen als de verplaatsingsafstand van dit steentje. De werkelijke verplaatsingsafstand ligt tussen 0 en 10 cm, dus de afwijking bedraagt maximaal 5 cm ($\approx 10 \cdot d_{n50}$).

Per experiment is bepaald welk percentage van de steentjes niet verder komt dan een bepaalde afstand.

Als karakteristieke afstanden zijn de 50%- en 90%- onderschrijdingsafstanden genomen. Een 50% onderschrijdingsafstand ($X_{s,50}$) van 10 cm betekent dat 50% van de steentjes niet verder komt dan 10 cm. De 50%- en 90%- onderschrijdingsafstanden, zoals deze zijn waargenomen bij de experimenten vindt u in bijlage 6. $X_{s,50}$ en $X_{s,90}$ zijn dimensieloos weergegeven in Figuur 6-8 en Figuur 6-9, door $X_{s,50}$ en $X_{s,90}$ te delen door d_{n50} .

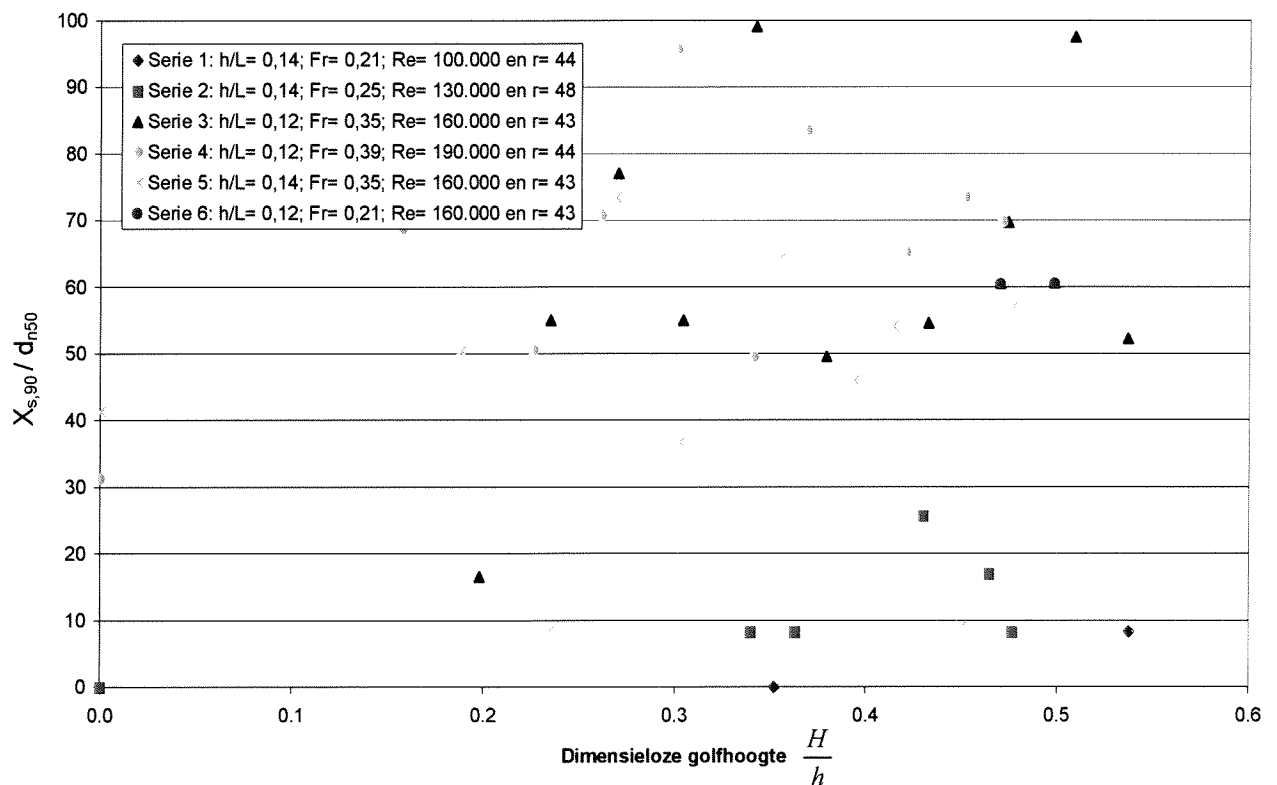
Hoofdstuk 6 Analyse van de resultaten

50%- onderschrijdingsafstand, uitgezet tegen de karakteristieke dimensieloze parameters, $\Delta = 1,55$



Figuur 6-8: 50 %-verplaatsingsafstanden van het bodemmateriaal tijdens dit onderzoek

90%- onderschrijdingsafstand, uitgezet tegen de karakteristieke dimensieloze parameters, $\Delta = 1,55$



Figuur 6-9: 90 %-verplaatsingsafstanden van het bodemmateriaal tijdens dit onderzoek

Er lijkt in dit onderzoek geen duidelijk verband te zijn tussen de verplaatsingsafstand van de steentjes en de belasting op de steentjes. Grofweg kan men zeggen dat bij de laagste twee stroomsnelheden de steentjes minder ver verplaatsen dan bij de hoogste twee stroomsnelheden, maar dat de golfhoogte geen invloed hoeft op de verplaatsingsafstand van de steentjes. De spreiding in de resultaten is zeer groot en is het niet mogelijk om een verband af te leiden zoals De Boer (1998) dat heeft gedaan voor een belasting door stromen alleen.

De oorzaak van de grote spreiding is waarschijnlijk dat er bij lage belasting zo weinig steentjes verplaatsen dat de resultaten statistisch niet betrouwbaar zijn. Als bij lage belasting bijvoorbeeld maar drie steentjes verplaatsen en één steentje verplaatst toevallig veel verder dan de overige twee, heeft dat grote invloed op de 50%- en 90%- onderschrijdingsafstanden.

Ondanks dat er geen formule kan worden afgeleid waarin het effect van golf-stroming interactie op de verplaatsingsafstand van een steentje is verwerkt, blijkt wel uit de verplaatsingsafstanden dat in bijna alle experimenten $X_{s, 90}$ kleiner is dan de lengte van het meetgebied. Dit betekent dat in bijna alle experimenten 90% van de steentjes niet verder komt dan 50 cm.

Wanneer de transporten worden gemeten door een raai, die zich aan het eind van het meetgebied bevindt, wordt er dus een redelijke benadering gemeten van de transporten, die op zouden treden door een raai die zich in een oneindig lang bed zou bevinden. Door de raai verplaatst immers minstens 90% van het aantal steentjes dat door een raai in een bed met een oneindige lengte gemeten zou worden.

Als het bed een stuk langer gemaakt zou worden, dan zou het aantal steentjes door een raai aan het eind van het meetgebied met maximaal 10% toenemen. De onderschatting van het transport zal met deze proefopstelling maximaal 10 % zijn.

6.5 Transporten

6.5.1 Analyse van de waarnemingen

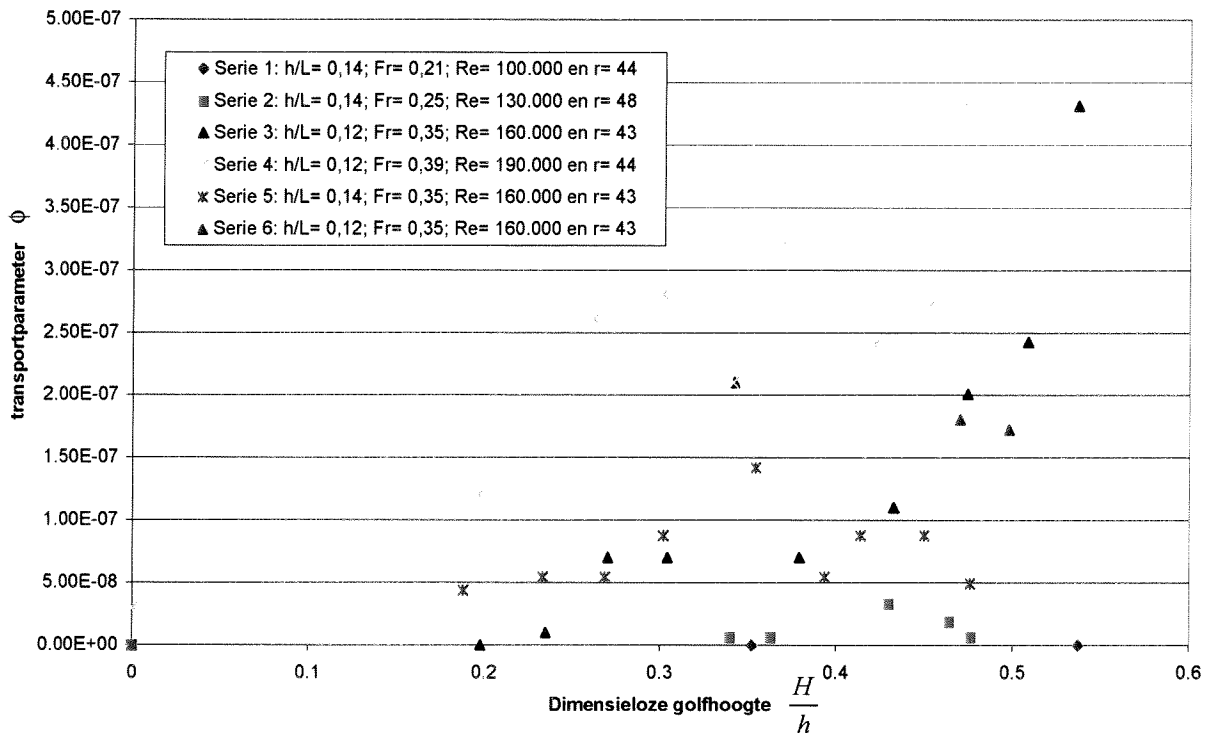
In de vorige paragraaf is aangegeven dat de verwachting is dat de transporten toe zullen nemen naarmate de meetraai meer naar achter in het meetgebied wordt genomen. Door een raai aan de achterzijde van het meetgebied zullen waarschijnlijk transporten worden gemeten die weinig afwijken van de transporten die bij een raai in een oneindig lang bed worden gemeten. In bijlage 9 is per kleurscheiding bepaald wat voor transport er door die raai heen ging. Dit geeft een beeld van de ontwikkeling van het transport afhankelijk van het aantal meetstroken vóór de raai.

Bij de metingen van de transporten wordt dezelfde onregelmatigheid gevonden als bij de pick-up metingen. Uit de grafieken in bijlage 9 blijkt dat er bij de laagste twee stroomsnelheden (Serie 1 - $u=0,35$ m/s en Serie 2 - $u=0,44$ m/s) geen invloed is van het ontbreken van aanvoer van steentjes. De verplaatsingslengte van de steentjes is zo klein dat de plaats van de meetraai niet uitmaakt. Het transport dat optreedt bij de belasting met de laagste twee stroomsnelheden wordt bepaald door het gemiddelde van de achterste zes meetraaien te nemen.

Wanneer de transporten bij de hoogste twee stroomsnelheden (Serie 3/5 - $u=0,57$ m/s en Serie 4 - $u=0,66$ m/s) worden bekeken, dan blijkt dat de lengte van het meetgebied een rol speelt. De transporten nemen duidelijk toe wanneer er zich vóór de meetraai meer meetstroken bevinden. Over de laatste vier stroken lijkt het transport niet meer toe te nemen. Het is niet duidelijk of dit komt doordat de aanvoer voldoende is met een aanloopgebied van vier stroken (20 cm) of dat de schommelingen in het aantal getransporteerde steentjes groter zijn dan de trend. Het zou bijvoorbeeld kunnen dat per strook het transport toeneemt met 1/2 steentje per uur, terwijl de spreiding per proef een paar steentjes is. Toch is een grove trend waarneembaar dat met de lengte van het meetgebied het transport toeneemt. Het gemiddelde transport over de achterste vier meetraaien wordt als transport genomen, behorend bij die belastingssituatie. In bijlage 6 vindt u per experiment de berekende transporten zoals ze afgeleid zijn uit de experimenten.

In Figuur 6-10 is het transport van de steentjes uitgezet tegen de karakteristieke parameters van de experimenten.

Transport van steentjes, uitgezet tegen kenmerkende dimensieloze parameters, $\Delta = 1,55$



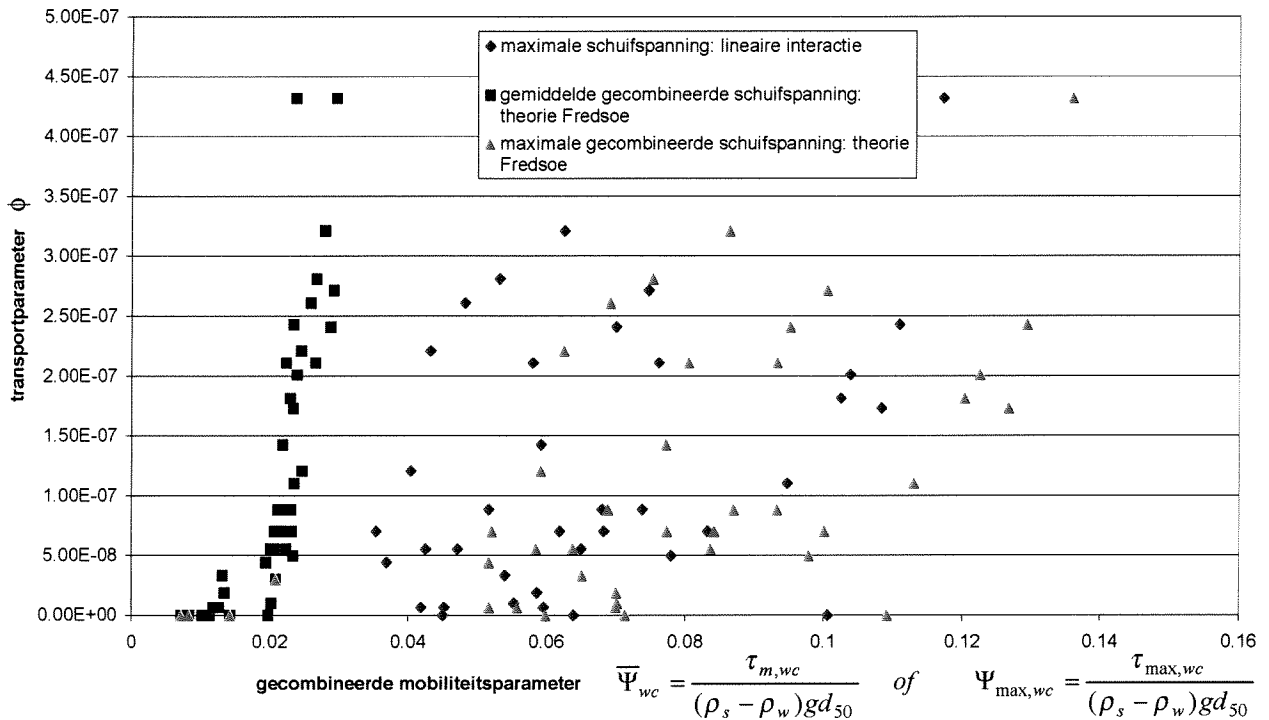
Figuur 6-10: Transportparameter van de verschillende experimenten, dimensieloos uitgezet

Uit Figuur 6-10 komt hetzelfde beeld naar voren als bij de pick-up van steentjes. Bij de laagste twee stroomsnelheden (Serie 1 - $u = 0,35$ m/s en Serie 2 - $u = 0,44$ m/s) vindt ook bij hogere golfhoogten nauwelijks transport plaats. Wanneer de stroomsnelheid hoger is, vindt ook transport bij lagere golfhoogten plaats en heeft een hogere golfhoogte een duidelijk hoger transport tot gevolg.

Er blijkt duidelijk dat bij verschillende belastingssituaties hetzelfde transport optreedt. Kennelijk is de resulterende schuifspanning hetzelfde in die gevallen, zodat hetzelfde aantal steentjes verplaatst. Met het model van Soulsby (1993 en 1997) kan óf de maximale óf de gemiddelde gecombineerde schuifspanning als kenmerkende belasting bepaald worden.

De maximale schuifspanning is geen goede maat voor de belasting op de steentjes: anders zou er bij de laagste stroomsnelheden ook bij grotere golfhoogten transport op moeten treden. Figuur 6-11 toont aan dat inderdaad de gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter de nauwste puntenwolk geeft.

Vergelijking tussen transport van steentjes door een gemiddelde gecombineerde schuifspanning en een maximale gecombineerde schuifspanning



Figuur 6-11: Transport van steentjes uitgezet tegen de gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter of de maximale gecombineerde mobiliteitsparameter

Volgens Soulsby en Whitehouse (1997) zou het begin van bewegen voor de belastingscombinatie van golven en stroming bij dezelfde kritische mobiliteitsparameter plaats vinden, als voor stroming alleen, mits in de mobiliteitsparameter de som van de amplitude van de schuifspanning t.g.v. de golf en de schuifspanning t.g.v. de stroming wordt ingevuld (zie paragraaf 2.3.3).

Wanneer dus de bijdragen van de golf en de stroming aan de totale schuifspanning bij elkaar opgeteld worden (= lineaire interactie tussen golven en stroming), zou begin van bewegen van het bodemmateriaal in dit onderzoek op moeten treden bij $\Psi_{wc} = 0,055$.

In Figuur 6-11 is duidelijk te zien dat, wanneer de transportparameter (ϕ) wordt uitgezet volgens de lineaire interactie, ook steentjes verplaatsen bij een gecombineerde mobiliteitsparameter kleiner dan 0,055. Uit dit onderzoek blijkt duidelijk dat het "begin van bewegen"-criterium van Soulsby en Whitehouse niet klopt.

Wanneer men toch een "begin van bewegen"-criterium wil definiëren, kan men beter op de y-as van Figuur 6-11 een hoeveelheid transport kiezen, waarvan men aanneemt dat deze waarde een goede benadering is voor het begin van bewegen. Vervolgens kan men aflezen bij welke gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter deze hoeveelheid transport optreedt.

6.5.2 Keuze van een golf-stroming interactietheorie

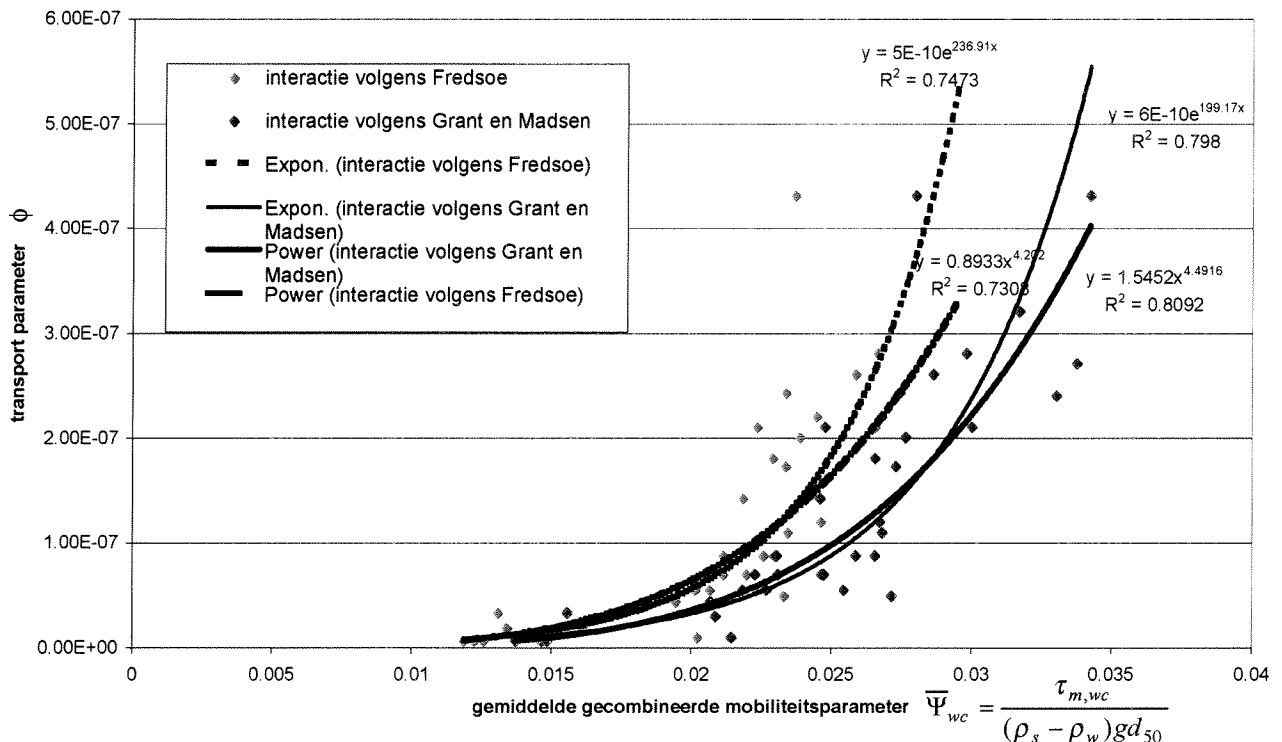
De keuze van een golf-stroming interactietheorie is belangrijk, omdat de manier waarop de meetwaarden grafisch worden uitgezet afhangt van de grootte van de resulterende belasting die er volgens een golf-stroming interactietheorie tijdens een experiment optreedt. In Figuur 6-12 staat de gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter uitgezet tegen de transportparameter. In de mobiliteitsparameter is de gemiddelde gecombineerde schuifspanning verwerkt. Deze schuifspanning is berekend met het model van Soulsby (1993 en 1997) volgens de golf-stroming interactietheorieën van Grant en Madsen (1979) en Fredsoe (1984). Verder zijn in de figuur enkele best-fit trendlijnen getekend op exponentiële basis en op machtsbasis, zodat bekeken kan worden welke golf-stroming interactietheorie het best voldoet aan de metingen.

Beide theorieën geven het algemene beeld goed weer en de verschillen in de covarianties (R^2) zijn niet groot genoeg om een voorkeur voor een bepaalde trendlijn uit te spreken. Alle trendlijnen zouden mogelijke benaderingen kunnen zijn van een relatie tussen belasting en transport. Alleen, wanneer er ook meetwaarden bij een grotere gecombineerde mobiliteitsparameter bekend zijn, is het mogelijk om vast te stellen welke golf-stroming interactietheorie de belasting op de steentjes het beste weergeeft.

De theorie van Grant en Madsen geeft een grotere invloed van de golven op de gemiddelde gecombineerde schuifspanning dan de theorie van Fredsoe. Fredsoe voorspelt onder dezelfde condities een lagere gemiddelde schuifspanning dan Grant en Madsen. Wanneer dus met de theorie van Fredsoe een gemiddelde gecombineerde schuifspanning wordt berekend, treedt hetzelfde transport bij een lagere belasting op. Hierbij moeten dezelfde kritische opmerkingen worden geplaatst als bij het afleiden van een pick-up formule op pg. 91.

In de eerste plaats is het de vraag of de gemiddelde gecombineerde schuifspanning echt de juiste parameter is voor de belasting, gezien de geringe covariantie van de formules in Figuur 6-12. In de tweede plaats zijn niet alle relevante parameters voldoende gevarieerd om algemeen geldende formules, zoals de formules in Figuur 6-12, af te leiden.

Transport van steentjes uitgezet voor verschillende interactietheorien



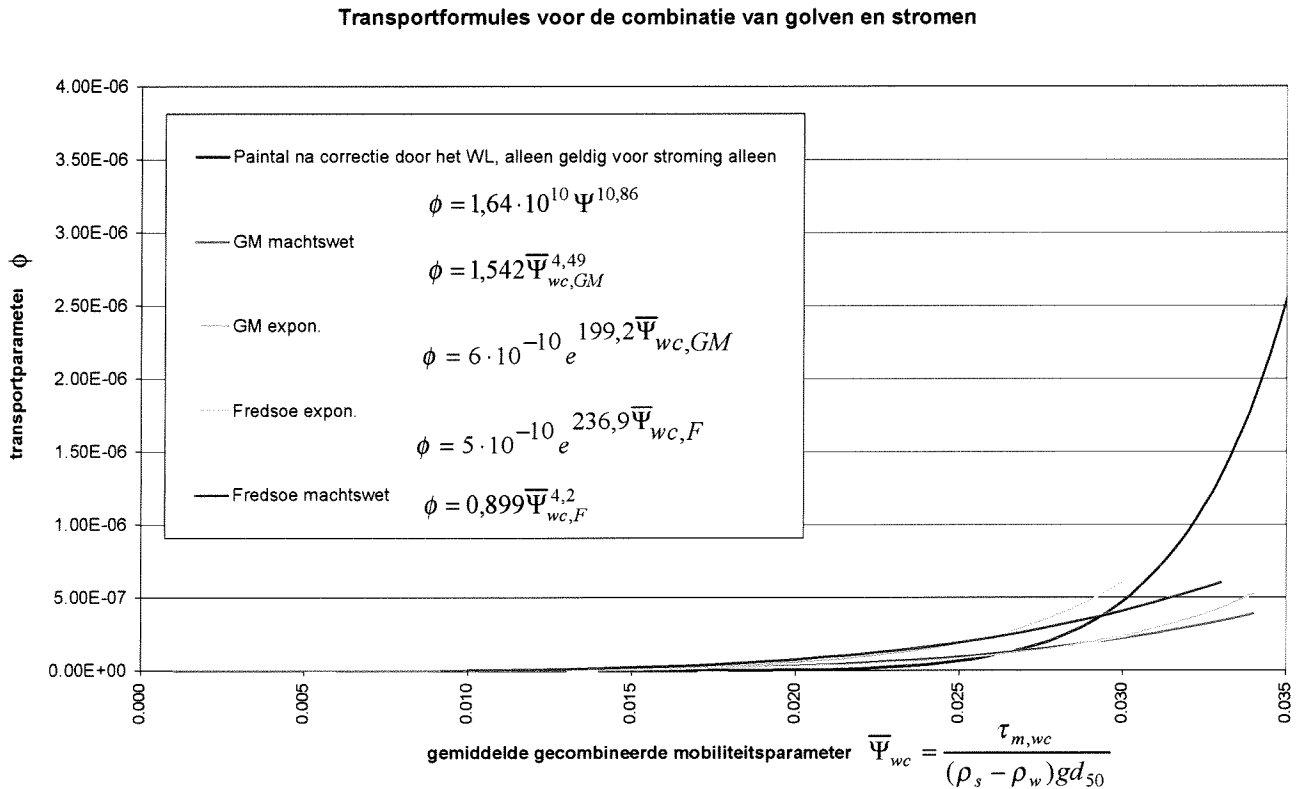
Figuur 6-12: Verschillende transportformules voor breuksteen voor de belastingscombinatie van golven en stroming

6.5.3 Vergelijking met de transportformule van Paintal (1971)

In Figuur 6-13 worden de vier trendlijnen uit Figuur 6-12 vergeleken met de transportformule van Paintal (vergelijking 2-18). Er blijkt dat binnen het beperkte bereik van de mobiliteitsparameter in dit onderzoek alleen de trendlijn van Fredsoe op exponentiële basis een hogere waarde voorspelt dan de formule van Paintal. De trendlijn van Fredsoe op machtsbasis geeft, vanaf $\bar{\Psi}_{wc} = 0,03$, lagere waarden van de transportparameter dan de Paintal-formule. De trendlijnen van Grant en Madsen voorspellen, vanaf $\bar{\Psi}_{wc} = 0,027$, lagere transporten dan Paintal.

Hoofdstuk 6 Analyse van de resultaten

Het is natuurlijk de vraag of de Paintal-formule vergeleken mag worden met de transportformules die uit dit onderzoek afgeleid kunnen worden, aangezien de Paintal-formule alleen geldig is voor een stroming.



Figuur 6-13: Transportformules zoals afgeleid uit dit onderzoek en de transportformule van Paintal (1971), $\bar{\Psi}_{wc,F}$ = gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter volgens de theorie van Fredsoe

De theorie van Fredsoe geeft een minder grote invloed van de golven en schuift de meetwaarden meer in elkaar. Het transport treedt dan, vergeleken met de Grant en Madsen theorie, bij een lagere mobiliteitsparameter op. De mate waarin het transport afhangt van de mobiliteitsparameter is zeer afhankelijk van de gekozen theorie.

De keuze voor een golf-stroming interactietheorie is dus doorslaggevend om het onderzoek te kunnen vergelijken met het transport dat op zou treden door stroming alleen. Het onderzochte bereik van de gemiddelde mobiliteitsparameter is zo klein dat het onmogelijk is om een voorkeur voor één van de theorieën uit te spreken.

Dit onderzoek heeft afhankelijk van de gekozen golf-stroming interactietheorie een bereik in gemiddelde mobiliteitsparameter van ca. 0,01 tot ca. 0,035. Bij het ontwerpen van een bodemverdediging is men geïnteresseerd in transporten die optreden rondom de kritische mobiliteitsparameter van 0,055. Het onderzoeksbereik is niet groot genoeg, zodat de in Figuur 6-13 aangegeven formules niet bruikbaar zijn om het transport te voorspellen dat optreedt onder ontwerpcondities.

Om hogere gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameters te bereiken moet er harder gestroomd worden en dan is het onmogelijk om nog regelmatige golven te maken in de huidige opstelling. Een vervolgonderzoek moet uitwijzen wat voor transporten er bij hogere mobiliteitsparameter optreden en of een van de trendlijnen uit Figuur 6-12 ook voor grotere waarden van de mobiliteitsparameter een basis voor het voorspellen van transport kan zijn.

6.6 Betrouwbaarheid van de meetresultaten

Bij een experimenteel onderzoek is het onvermijdelijk dat er meetfouten gemaakt worden, hoewel iedere onderzoeker zijn uiterste best doet om de meetfouten zo klein mogelijk te houden. Het is noodzakelijk om inzicht te krijgen in de invloed van deze meetfouten op de resultaten van het onderzoek. Daarom is met behulp van het computerprogramma "Crystall Ball" de betrouwbaarheid van de in dit onderzoek gevonden formules voor pick-up en transport onderzocht.

De betrouwbaarheid van de verplaatsingsafstanden wordt niet onderzocht, aangezien het in dit onderzoek niet mogelijk bleek om een verband tussen de verplaatsingen en de belasting vast te stellen.

De betrouwbaarheid van de meetresultaten hangt af van de gevoeligheid van het resultaat voor de meetfouten van de gemeten parameters. De resultaten van dit onderzoek zijn weergegeven met een verband tussen de transportparameter of de pick-up parameter en de gecombineerde gemiddelde mobiliteitsparameter.

Aan elke gemeten parameter is een standaard normale verdeling toegekend met een standaarddeviatie (σ). De meetfout die optreedt bij het meten van een parameter is gelijk gesteld aan de 5% waarde en de 95% waarde van de verdeling. Het verband tussen de standaarddeviatie van de kansdichtheidfunctie van een parameter en de meetfout is gegeven door:

$$\sigma = \frac{\text{geschatte meetfout}}{1,65} \dots\dots\dots(6-14)$$

De eerste stap in de betrouwbaarheidsanalyse is dus het afschatten van de meetfout van de gemeten parameters. In dit onderzoek is een onderscheid te maken tussen gemeten "transport"-parameters en "belasting"-parameters. De meetfouten van de belastingparameters zijn afgeschat aan de hand van de meetfouten van de meetinstrumenten of aan de hand van de geschatte instelfout bij het instellen van een bepaalde parameter. In Tabel 6-2 vindt u een overzicht van de gemeten parameters, de geschatte meetfout en de uit de geschatte meetfout afgeleide standaarddeviatie.

Parameter	Geschatte meetfout	Gemiddelde waarde of het bereik	Standaard deviatie
<i>"Belasting"-zijde</i>			
\bar{H}	$5 \cdot 10^{-3}$ m	0 – 0,154 m	$3 \cdot 10^{-3}$ m
H	$5 \cdot 10^{-3}$ m	0,2752 – 0,317 m	$3,0 \cdot 10^{-3}$ m
Q	4 tot $8 \cdot 10^{-3}$ m ³ /s	0,079 – 0,151 m ³ /s	$2,42 \cdot 10^{-3}$ tot $4,85 \cdot 10^{-3}$ m ³ /s
ijkruwheid (k_{ijk})	$3 \cdot 10^{-3}$ m	0,0110 – 0,0169 m	$1,8 \cdot 10^{-3}$ m
T	0,01 s	1 of 1,1 s	$6,1 \cdot 10^{-3}$ s
<i>"Transport"-zijde</i>			
d_{n50}	$5 \cdot 10^{-5}$ m	$5,45 \cdot 10^{-3}$ m	$3 \cdot 10^{-5}$ m
ρ_s	25 kg/m ³	2534 kg/m ³	16 kg
Pick-up van steentjes: uitgedrukt in het aantal steentjes/uur/strook, (gemiddelde van de laatste zes stroken)	0,5	0 – 3,03	0,3
Transport van steentjes: Uitgedrukt in aantal steentjes/uur door een raai (gemiddelde van de laatste vier raaien)	0,7	0 – 9,77	0,4

Tabel 6-2: Overzicht van de meetfouten van de gemeten parameters en de standaarddeviaties

Hoofdstuk 6 Analyse van de resultaten

De geschatte meetfout (maar eigenlijk is er hier sprake van een "instel"-fout) van het debiet is niet constant maar hangt af van de grootte van het debiet. Bij een groter debiet zal de "instel"-fout groter zijn dan bij een kleiner debiet.

Voor het bepalen van de meetfout van het transport en de pick-up van steentjes zijn de resultaten van experimentenserie 6 van belang. In deze reeks werd een experiment met dezelfde instellingen drie keer herhaald

De resultaten van deze experimenten zijn afgebeeld in Bijlage 7 en 9 in de figuren B7-4 en B9-4. De spreiding van de verplaatsingen per meetstrook is groot, maar als over een aantal stroken wordt gemiddeld dan worden de verschillen tussen de experimenten gereduceerd. De verschillende gemiddelde resultaten van experimentenreeks 6 staan in Tabel 6-3.

	H= 0,131 m	H= 0,132 m	H= 0,137 m
pick-up van steentjes: uitgedrukt in het aantal steentjes/uur/strook (gemiddelde van de laatste zes stroken)	1,96	1,82	1,48
transport van steentjes: uitgedrukt in aantal steentjes/uur door een raai (gemiddelde van de laatste vier raaien)	4,55	4,1	3,92

Tabel 6-3: Meetresultaten van experimentenserie 6

Bij het bepalen van de pick-up voor de experimenten in serie 6 is het maximale gemeten verschil in de pick-up tussen de experimenten 0,5 steentjes/uur/strook. Op grond van deze waarneming wordt de maximale afwijking bij het meten van de pick-up geschat op 0,5 steentjes/uur/strook.

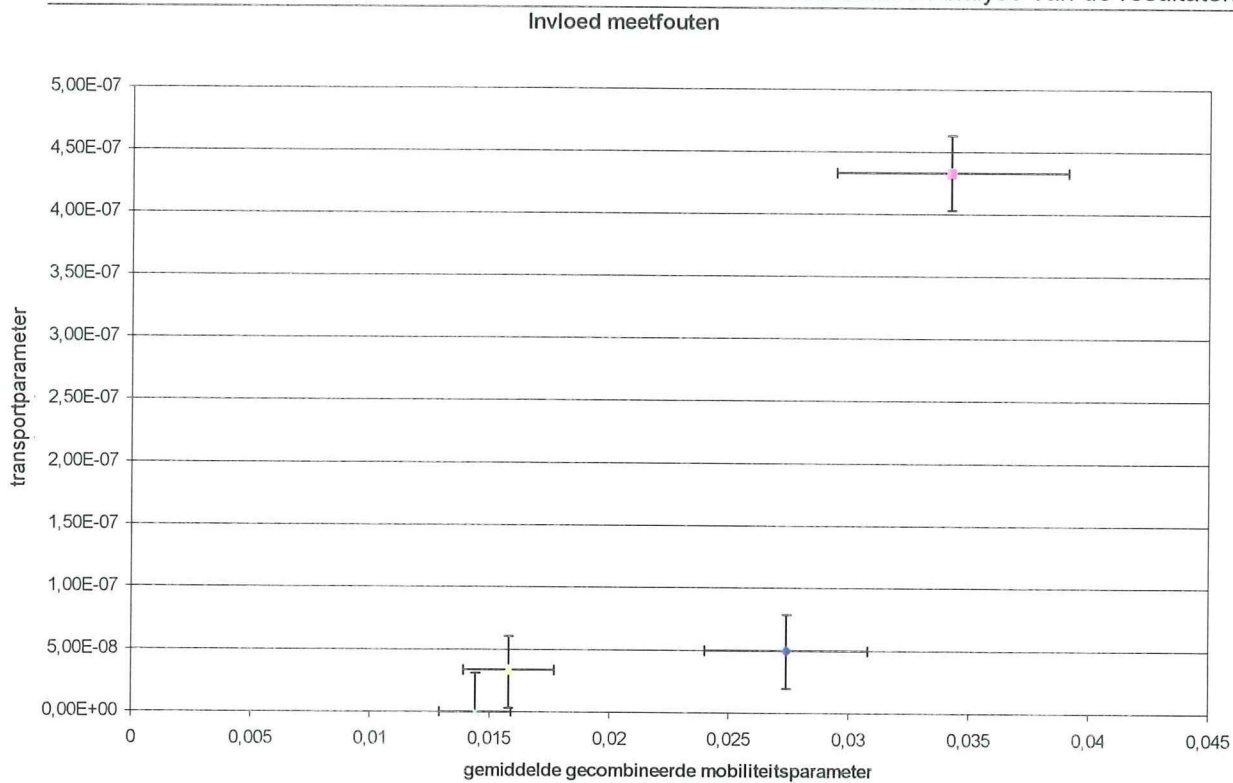
Voor de bepaling van de afwijking van de transportparameter gaat een analoge redenering op. De maximale afwijking bij het meten van de transportparameter wordt geschat op 0,7 steentjes/uur.

De onnauwkeurigheid door de meetfouten in de gemeten parameters heeft invloed op de voorspelde waarden van het transport en de pick-up. De gevoeligheid voor de gemeten parameters is onderzocht met het computerprogramma "Crystall Ball". Dit computerprogramma maakt gebruik van een Monte-Carlo simulatie.

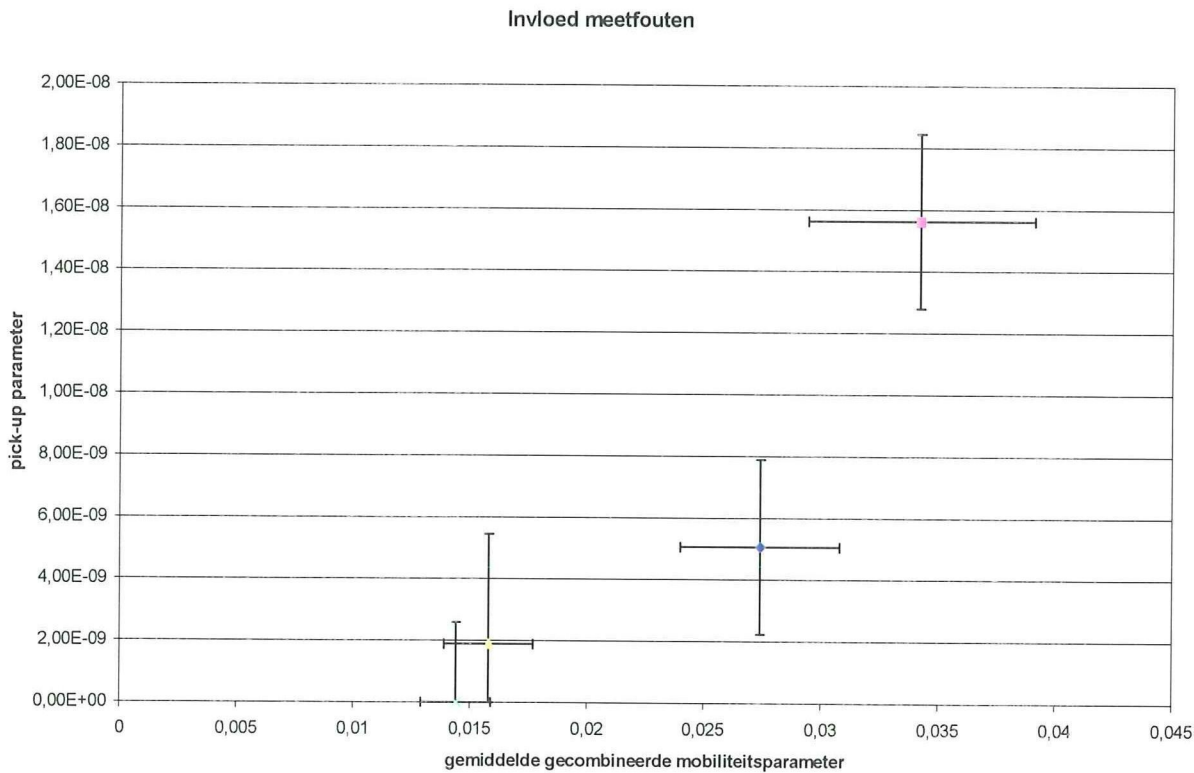
Deze simulatie houdt in dat een groot aantal malen uit de kansverdelingen van de gemeten parameters willekeurige getallen worden getrokken waarmee de transportparameter, de pick-up parameter en de gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter bepaald worden. Op deze manier is het mogelijk om de verdeling van de mobiliteitsparameter, de transportparameter en de pick-up parameter aan te geven.

Deze drie parameters zijn normaal verdeeld, de standaarddeviatie van de gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter varieert van 7,6% tot 8,7%. De standaarddeviatie van de transportparameter varieert van 4% tot 50% en de standaarddeviatie van de pick-up parameter varieert van 11% tot 80%.

Het resultaat van de betrouwbaarheidsanalyse is weergegeven in Figuur 6-14 en in Figuur 6-15.



Figuur 6-14: Invloed van de meetfouten op de transportparameter en de gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter



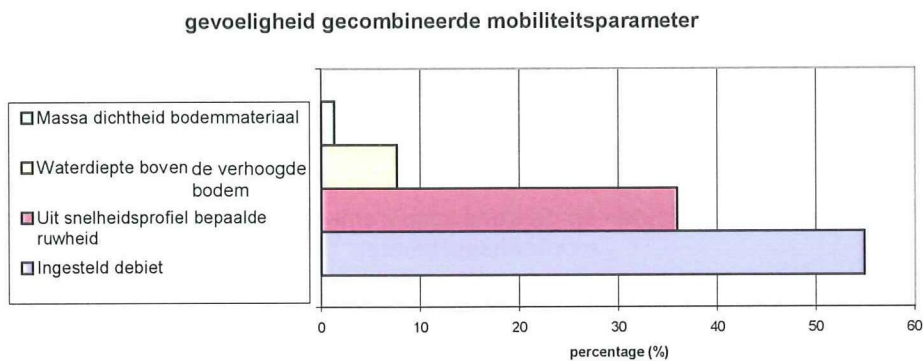
Figuur 6-15: Invloed van de meetfouten op de pick-up parameter en de gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter

Hoofdstuk 6 Analyse van de resultaten

Uit deze grafieken komt duidelijk naar voren dat de resultaten van dit onderzoek met de grootste voorzichtigheid gebruikt moeten worden. Niet alleen zijn niet alle parameters zoals eerder gesteld voldoende gevarieerd om algemeen bruikbare formules zoals formule (6-13) en de formules in Figuur 6-13 af te leiden, maar ook de spreiding in de transportparameter en de pick-up parameter vormt een aanleiding tot voorzichtigheid. De spreiding is dermate groot dat het werkelijk optredende transport tot 80% af kan wijken van de berekende waarde bij een kleine gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter. Dit wordt veroorzaakt doordat bij een kleine gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter ($<0,02$), het aantal verplaatsingen van dezelfde orde is als de standaardafwijking.

Het is twijfelachtig of de in dit onderzoek afgeleide formules bruikbaar zijn om het transport van stortsteen te voorspellen dat optreedt onder ontwerpcondities. De gevonden formules vergroten het inzicht in het mechanisme dat transport van steentjes veroorzaakt, maar zijn niet goed bruikbaar om de afmetingen van de toplaag van een bodemverdediging te ontwerpen.

Uit het resultaat van de gevoeligheidsanalyse in Figuur 6-16, is te concluderen dat de spreiding in de mobiliteitsparameter vooral wordt veroorzaakt door een onnauwkeurige instelling van het debiet en de bepaling van de ruwheid uit het gemeten snelheidsprofiel.



Figuur 6-16: Gevoeligheid van de gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter voor meetfouten

6.7 Beperkingen van het onderzoek

Het is op zijn plaats om aan het eind van de analyse waarin, zo breed mogelijk, een aantal aspecten van het transport van stortsteen door een combinatie van golven en stroming bekeken is, kritisch terug te blikken op de gevolgde aanpak en de uitkomsten van het onderzoek.

Interpretatie van de resultaten

In de eerste plaats wordt in dit onderzoek noodgedwongen gebruik gemaakt van het schuifspanningsconcept. Het is, gezien de complexiteit van de belastingssituatie, echter twijfelachtig of de schuifspanning een goede parameter voor de belasting is. Dit blijkt ook uit Figuur 6-6, waarin de invloed van de stroomsnelheid nog terug te vinden is.

Toch is het opvallend hoe de gemeten transportwaarden gaan samenvallen, wanneer de gemiddelde gecombineerde schuifspanning als belasting op het bodemmateriaal wordt genomen (zie Figuur 6-2 en Figuur 6-11). Het lijkt alsof de gemiddelde gecombineerde schuifspanning in dit onderzoek een redelijke maat voor de belasting is, maar toch blijft op de achtergrond steeds de vraag spelen wat nu echt het mechanisme is dat het transport van steentjes veroorzaakt.

Het beantwoorden van deze vraag was echter niet de doelstelling van het onderzoek, maar ook dit onderzoek toont de noodzaak aan om de echte oorzaak van het verplaatsen van een steentje op microschaal te achterhalen.

Er is wel iets te zeggen over de belastingen op micro-niveau. De invloed van de extra turbulentie, die door de golven gecreëerd wordt, uit zich in een hogere gemiddelde schuifspanning, maar ook in een hogere maximale schuifspanning dan op basis van een lineaire interactie tussen golven en stroming mag worden verwacht (zie paragraaf 3.4).

De reden dat de maximale gecombineerde schuifspanning geen goede maat voor de belasting op de steentjes is, kan misschien verklaard worden door de invloed van de traagheid. Op het moment dat de schuifspanning maximaal is (onder de top van de golf), is de traagheidskracht nul. Als de schuifspanning zijn "gemiddelde" waarde bereikt (tijdens de nuldoorgangen), is juist de traagheidskracht maximaal. Ook de invloed van de wisselende horizontale drukgradiënt kan niet verwaarloosd worden (zie paragraaf 2.3.2). De kracht die door deze gradiënt veroorzaakt wordt, is ook maximaal tijdens de nuldoorgangen.

De resultaten van dit onderzoek zijn (op een abstract niveau) vergelijkbaar met een aanpak die Schiereck (1995, pg. 52) voorstelt voor het gebruik van het stabiliteitscriterium van Shields in een niet-uniforme stroming. Om in een verder (bij benadering) uniforme stroming lokaal een verhoogde snelheid of een verhoogde turbulentiegraad weer te geven, die veroorzaakt wordt door een constructie in de stroming, wordt een belastingsverzwaring-coëfficiënt¹ toegepast. De invloed van een bepaalde constructie in een stroming wordt dan vertaald naar een belastingsverzwaring-coëfficiënt (K_v), waarmee de kritische diameter die voor de uniforme situatie geldt vermenigvuldigd moet worden om de kritische diameter in de niet-uniforme situatie te berekenen. In K_v zit dus informatie opgesloten over bijvoorbeeld de lokale stromingssituatie of het lokale turbulentieniveau t.o.v. de ongestoorde uniforme stroomsnelheid.

Een soortgelijk idee volgt ook uit dit onderzoek: de golven vormen een belastingverzwaring waardoor de gemiddelde schuifspanning t.g.v. de stroming met een bepaalde factor verhoogd wordt om de invloed van de golven in rekening te brengen. Dit levert een gemiddelde gecombineerde schuifspanning waarin ook informatie opgesloten zit over de turbulentie. In dit onderzoek volgt die belastingverzwaring uit een "black-box" aanpak en blijft de fysische achtergrond vaag. Men zou in dit onderzoek de golven kunnen opvatten als een bron van turbulentie net zoals een constructie in een stroming een veroorzaker van turbulentie kan zijn, waardoor er meer transport plaatsvindt dan in de uniforme stromingssituatie.

¹ Het stabiliteitscriterium van Shields alleen geldig voor een uniforme stroming. Wanneer men in een niet-uniforme stroming toch met de theorie van Shields een kritische steendiameter wil bepalen, stelt Schiereck voor om een belastingsverzwaring-coëfficiënt in rekening te brengen op de kritische steendiameter, die voor een uniforme stroming met de theorie van Shields bepaald kan worden. De belastingsverzwaring-coëfficiënt (K_v) brengt voor een niet-uniforme stroming de lokale toename van de turbulentie of stroomsnelheid in rekening.

Schematisch wordt de analogie duidelijker:

Aanpak van Schiereck voor de bepaling van de kritische diameter in een niet-uniforme stroming:

Bepaal in de uniforme stroming met \bar{u} de kritische steendiameter \Rightarrow invloed lokale situatie geeft K_v
 \Rightarrow benodigde diameter = $K_v \cdot$ kritische diameter in uniforme stroming.

Resultaat uit dit onderzoek voor de bepaling van verplaatsingen in door golven en stroming (een bijzonder geval van een niet-uniforme stroming):

In een uniforme stroming is τ_c een goede maat voor de belasting \Rightarrow invloed golven uit zich in $\tau_{m,wc}$
(een soort $K_v \cdot \tau_c$) \Rightarrow $\tau_{m,wc}$ blijkt een goede maat voor de belasting.

Voor een combinatie van golven en stroming is de belastingsverzwaring-coëfficiënt echter per belastingsgeval verschillend en deze hangt onder meer af van de stroomsnelheid, de golfhoogte, de golfperiode, de ruwheid van de bodem en de waterdiepte. De coëfficiënt zou het niet-lineaire effect van de combinatie van golven en stroming in rekening moeten brengen. De belastingsverzwaring-coëfficiënt wordt berekend door met een golf-stroming interactietheorie $\tau_{m,wc}$ te berekenen en $\tau_{m,wc}$ daarna te delen door τ_c . De maatgevende schuifspanning is dan al bekend en het heeft dus geen zin om met de belastingsverzwaring-coëfficiënt te rekenen of om naar deze coëfficiënt onderzoek te doen.

Het gaat hier alleen om de analogie met de aanpak van Schiereck; de golven veroorzaken net zoals een krib of een drempel in een stroming een lokale verstoring van de, bij benadering, uniforme stroomsnelheid, waardoor er een groter transport plaatsvindt.

Onderzoeksbereik

In de tweede plaats is het bereik van het onderzoek te klein om de afgeleide formules ook daadwerkelijk te kunnen gebruiken voor het ontwerpen van de toplaag van een bodemverdediging. Wanneer in een laboratoriumgoot harder gestroomd zou kunnen worden, zouden er bij grotere waarden van $\bar{\Psi}_{wc}$ verplaatsingen van stortsteen bekend zijn, zodat misschien ontworpen kan gaan worden met een gemiddelde gecombineerde schuifspanning als belasting parameter.

Daarvoor zal wel eerst onomstotelijk moeten worden bewezen dat $\bar{\Psi}_{wc}$ de juiste maat voor de belasting op het bodemmateriaal is. In dit onderzoek zijn eigenlijk te weinig meetdata om statistisch verantwoord te kunnen concluderen dat het gesuggereerde verband tussen $\bar{\Psi}_{wc}$ en verplaatsingen van breuksteen juist is. De covariantie (max 0,8) van de afgeleide formules met de meetwaarden is te laag om dit verband voor "waar" aan te nemen, maar het samenvallen van de meetdata wanneer $\bar{\Psi}_{wc}$ als belastingparameter wordt gebruikt, is een signaal dat niet genegeerd moet worden.

Meetresultaten bij grotere waarden van $\bar{\Psi}_{wc}$ zouden de statistische betrouwbaarheid van de afgeleide formules kunnen vergroten, bijvoorbeeld doordat de covariantie groter wordt dan 90%, zodat wel met voldoende zekerheid kan worden aangetoond dat $\bar{\Psi}_{wc}$ een juiste maat voor de belasting is.

Zowel om uiteindelijk tot een ontwerpformule te komen, als om uitsluitel te kunnen geven over de juistheid van het gebruik van $\bar{\Psi}_{wc}$ als belastingparameter is het essentieel om met hogere stroomsnelheden experimenten uit te voeren. De sleutel van de oplossing van dit probleem ligt dus puur in het verzamelen van meetresultaten bij hogere stroomsnelheden.

Met de huidige proefopstelling is dat echter niet mogelijk. Een onderzoeker die met dit onderzoek verder wil gaan, moet eerst voor dat praktische bezwaar een oplossing zien te vinden.

Doelstellingen van het onderzoek

Een derde kritische opmerking gaat over de doelstellingen van dit onderzoek. Gezien de onbekendheid van het fenomeen is het onderzoek doelbewust zeer breed opgezet en zijn een aantal uiteenlopende aspecten die een rol spelen bij het transport van stortsteen zoals transport, pick-up, verplaatsingsafstanden en begin van bewegen bekeken. Het onderzoek heeft dus een sterk verkennend karakter.

Het is eigenlijk niet mogelijk om met dezelfde proefopstelling al deze uiteenlopende aspecten voldoende betrouwbaar te onderzoeken en dat blijkt ook uit het betrouwbaarheidsonderzoek in paragraaf 6.6. Een onderzoeker die op dit onderwerp verder zou willen gaan, doet er verstandig aan

zijn onderzoek te beperken tot een van de opgesomde transportaspecten en zijn proefopstelling toe te spitsen op het gekozen aspect.

Wanneer men bijvoorbeeld alleen geïnteresseerd is in het transport van steentjes door een raai, dan dient er in de proefopstelling voldoende aanvoer van steentjes te zijn. In dat geval is het noodzakelijk om met grote oppervlakten steentjes te werken vóór de meetraai. Een aanpak zoals de Boer (1998) en Forschelen (1999) in hun onderzoek hebben gevolgd, is dan op zijn plaats.

Wanneer men bijvoorbeeld specifiek in de pick-up van steentjes geïnteresseerd is, dienen er zoveel mogelijk smalle meetstroken in de opstelling te worden aangebracht, zodat het mogelijk is om een geringe verplaatsing van een steentje waar te kunnen nemen.

Door het toespitsen van de proefopstelling op een aspect van het transportproces zal de betrouwbaarheid van de resultaten sterk verbeteren in vergelijking met dit onderzoek.

In deze paragraaf zijn de drie belangrijkste knelpunten van dit onderzoek aangegeven, zodat een onderzoeker die op basis van dit rapport vervolgonderzoek wil gaan doen, aanknopingspunten kan vinden voor de aanpak van zijn onderzoek.

7 Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden de conclusies en aanbevelingen gepresenteerd die uit dit onderzoek naar voren komen. Daarbij moet in gedachten worden genomen dat dit onderzoek een duidelijk verkennend karakter heeft.

Voor de duidelijkheid worden nogmaals de doelstellingen van dit onderzoek gegeven:

- het onderzoeken van het verplaatsen van stortsteen bij een belasting omtrent het door Soulsby en Whitehouse (1997) geopperde begin van bewegen voor golven en stromen.
- het toetsen van de theorieën van Bijker (1967), Grant en Madsen (1979) en Fredsoe (1984) voor de interactie tussen golf- en stromingsbelasting aan de hand van het verplaatsen van steentjes.
- het beschrijven van een verband tussen het transport van stortsteen en de bijbehorende belastingscombinatie van golven en stroming.

7.1 Conclusies

1. Uit dit onderzoek volgen duidelijke aanwijzingen dat de gemiddelde schuifspanning t.g.v. de golfstroming interactie een goede indicatie is voor de belasting op het bodemmateriaal in dit onderzoek.

In dit onderzoek wordt noodgedwongen de maximale of de gemiddelde schuifspanning t.g.v. de golfstroming interactie als maat voor de belasting op de steentjes aangenomen, ondanks het besef dat in dit complexe belastinggeval de schuifspanning op zich niet voldoende is om het mechanisme te verklaren dat het verplaatsen van een steentje veroorzaakt (zie paragraaf 2.3.2 en paragraaf 6.7).

Wanneer de dimensieloze pick-up parameter en de dimensieloze transportparameter dimensieloos worden uitgezet dan levert de gemiddelde schuifspanning, berekend met de golfstroming interactietheorie van Fredsoe (1984) of die van Grant en Madsen (1979), verwerkt in de gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter, de kleinste spreiding van de meetdata.

Wanneer de meetdata dimensieloos worden uitgezet tegen de (dimensieloze) maximale gecombineerde schuifspanning of tegen de (dimensieloze) som van de amplitude van de schuifspanning t.g.v. de golf en de schuifspanning t.g.v. de stroming, dan vallen de meetdata niet samen. De invloed van de golven uit zich in de gemiddelde gecombineerde schuifspanning (zie paragraaf 6.3.3 en paragraaf 6.5.1).

2. De pick-up van steentjes door de interactie van de golven en de stroming kan in dit onderzoek beschreven worden met de volgende formules:

$$\phi_p = 1 \cdot 10^{-10} e^{159,06 \bar{\Psi}_{wc,GM}}$$

$$\phi_p = 0,0029 \bar{\Psi}_{wc,GM}^{3,57}$$

geldig voor $0,013 < \bar{\Psi}_{wc,GM} < 0,034$ en $d_{50} = 0,00648$ m.

Deze formules zijn afgeleid door een best-fit lijn te trekken door de meetwaarden. Een pick-up formule op basis van de golfstroming interactietheorie van Grant en Madsen blijkt het beste overeen te komen met de meetdata (zie paragraaf 6.3.3).

3. Het transport van steentjes door een raai veroorzaakt door de interactie van golven en stroming kan in dit onderzoek beschreven worden met de volgende formules:

$$\phi = 1,542 \bar{\Psi}_{wc,GM}^{4,49}$$

$$\phi = 6 \cdot 10^{-10} e^{199,2 \bar{\Psi}_{wc,GM}}$$

geldig voor $0,013 < \bar{\Psi}_{wc,GM} < 0,034$ en $d_{50} = 0,00648$ m.

$$\phi = 0,899 \overline{\Psi}_{wc,F}^{4,2}$$
$$\phi = 5 \cdot 10^{-10} e^{239,9 \overline{\Psi}_{wc,F}}$$

geldig voor $0,011 < \overline{\Psi}_{wc,F} < 0,027$ en $d_{50} = 0,00648$ m

Deze formules zijn afgeleid door een best-fit lijn te trekken door de meetwaarden. Er is geen voorkeur voor een bepaalde golf-stroming interactietheorie; alleen de golf-stroming interactietheorie van Bijker blijkt geen goede voorspelling te geven van de gemiddelde schuifspanning t.g.v. de golf-stroming interactie (zie paragraaf 6.3.3).

4. Los van de vraag of de gemiddelde gecombineerde schuifspanning nu echt de juiste maat voor de belasting is, kleven er drie grote bezwaren aan de pick-up formules en transportformules zoals deze in dit onderzoek afgeleid zijn. De formules hebben een beperkte geldigheid, een geringe toepasbaarheid en een geringe betrouwbaarheid, waardoor deze formules niet zozeer bruikbaar zijn voor het ontwerpen van de toplaag van een bodemverdediging, maar meer moeten worden gezien als een bijdrage aan een vergroting van het inzicht.
 - De beperkte geldigheid wordt veroorzaakt door het feit dat niet alle parameters die de verplaatsingen van steentjes bepalen voldoende gevarieerd zijn. De vorm en diameter van het bodemmateriaal zijn niet gevarieerd. Verder zijn belangrijke parameters als de waterdiepte en de periode van de golven niet voldoende gevarieerd (zie paragraaf 4.2).
 - De beperkte toepasbaarheid komt doordat het onderzoeksbereik niet voldoende groot is. Er zijn slechts meetwaarden bekend tot een gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter van 0,035. Het interessegebied voor het ontwerpen van de toplaag van een bodemverdediging ligt rondom de Shieldparameter. Verder is het bed met regelmatige golven in dezelfde richting als de stroming belast, terwijl in de praktijk altijd sprake is van onregelmatige golven die vaak onder een hoek met de stroming staan (zie paragraaf 6.3.4).
 - De geringe betrouwbaarheid wordt veroorzaakt doordat het aantal verplaatste steentjes bij een kleine gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter ($\psi < 0,02$) even groot is als de geschatte standaarddeviatie van het aantal verplaatste steentjes. Daardoor kan het werkelijk optredende transport bij een lage gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter tot 80 % afwijken van de voorspelde waarde (zie paragraaf 6.6).
5. Het "begin van bewegen"- criterium zoals dat door Soulsby en Whitehouse (1997) voor de belastingscombinatie van golven en stroming opgesteld is voor bodemmateriaal met een diameter kleiner dan 4 mm, vormt geen goede indicatie voor het begin van bewegen van stortsteen veroorzaakt door de belastingscombinatie van golven en stroming.

In dit onderzoek zou volgens Soulsby en Whitehouse, wanneer in de mobiliteitsparameter de som van de amplitude van de schuifspanning t.g.v. van de golf en de schuifspanning t.g.v. van de stroming wordt ingevuld, het begin van bewegen bij een kritische mobiliteitsparameter van 0,055 op moeten treden. Er blijkt ook bij kleinere waarden van de mobiliteitsparameter transport op te treden. De som van de schuifspanning t.g.v. van de golf en de schuifspanning t.g.v. van de stroming vormt geen goede maat voor de belasting op de steentjes (zie paragraaf 6.5.1).

6. Er is in dit onderzoek geen duidelijk verband tussen de verplaatsingslengte van de verplaatste steentjes en de belasting op het bodemmateriaal.

Uit de resultaten van het experimentele onderzoek blijkt dat het niet mogelijk is om een verband te leggen tussen een resulterende belasting t.g.v. de golf-stroming interactie en de verplaatsingslengte van de steentjes. De invloed van de golven op de verplaatsingsafstand van het bodemmateriaal is niet duidelijk (zie paragraaf 6.4).

7. Het bereik van de gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter is dermate klein, dat een zinnige vergelijking tussen aan de ene kant de transportformules en pick-up formules zoals, deze in dit onderzoek afgeleid zijn voor de belastingscombinatie van golven en stroming, en aan de andere kant bestaande transportformules, geldig voor een stroming, niet mogelijk is.

Er zijn kleine verschillen tussen de formules die het transport en de pick-up van steentjes voor een belastingscombinatie van golven en stroming voorspellen en de formules die alleen geldig zijn voor een stroming. Door het kleine bereik van de gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter in dit onderzoek is niet met zekerheid te stellen of deze verschillen ook buiten het bereik van dit onderzoek optreden (zie paragraaf 6.3.4 en paragraaf 6.5.3).

8. Het verschijnsel dat door een raai op een willekeurige plaats in een bij benadering oneindig bed, een groter transport wordt gemeten dan door een raai aan het begin van een eindig bed, hangt samen met het feit dat steentjes in een oneindig bed meerdere malen opgepikt kunnen worden.

Uit de waarnemingen van dit onderzoek blijkt dat het transport door een raai toeneemt naarmate er zich meer steentjes vóór de meetraai bevinden. De pick-up van steentjes blijkt ook hoger te zijn naarmate er zich meer steentjes vóór een meetgebied bevinden. Wanneer er zich meer steentjes voor het meetgebied bevinden kunnen er ook steentjes uit het meetgebied verplaatsen, die niet oorspronkelijk in dat meetgebied aanwezig waren. Aan het begin van een eindig bed kunnen alleen de steentjes verplaatsten die daar oorspronkelijk aanwezig waren: de pick-up zal aan het begin van een eindig bed dus lager zijn (zie paragraaf 6.3.1).

7.2 Aanbevelingen

Naar aanleiding van dit onderzoek kunnen er in twee richtingen aanbevelingen worden gegeven. Allereerst kunnen er praktische aanbevelingen worden gegeven om de resultaten van dit onderzoek te verbeteren. Een vervolgonderzoeker volgt dan de constatering uit dit onderzoek, dat verplaatsingen van steentjes afhangen van $\bar{\Psi}_{wc}$ en probeert de juistheid van deze constatering in een vervolgonderzoek te bewijzen.

Een andere insteek kan zijn dat een vervolg op basis van dit onderzoek juist het fysische mechanisme, dat verplaatsingen van steentjes veroorzaakt, probeert te achterhalen. In dit onderzoek is een "black box" aanpak gebruikt en is het fysisch mechanisme, dat verplaatsingen van steentjes veroorzaakt, niet duidelijk.

7.2.1 Aanbevelingen om de resultaten van dit onderzoek te verbeteren

Het toepassen van de in dit onderzoek afgeleide transportformules en pick-up formules om een toplaag te ontwerpen, dient met de nodige voorzichtigheid te gebeuren, omdat de betrouwbaarheid, de geldigheid en de toepasbaarheid van de formules te wensen overlaat. Daarom is het verstandig om vervolgonderzoek te verrichten om deze drie aspecten te verbeteren.

– Vergroting van de betrouwbaarheid

Het probleem bij de betrouwbaarheid van de in dit onderzoek gevonden formules is dat er zo weinig steentjes verplaatsen bij een lage hydraulische belasting, dat het aantal verplaatste steentjes gelijk aan of kleiner is dan de geschatte standaarddeviatie van de metingen. Als er meer steentjes zouden verplaatsen dan zou dat een toename van de betrouwbaarheid geven. Een eenvoudige oplossing is het gebruiken van een veel groter meetgebied, bijv. met een lengte enkele meters i.p.v. 0,5 m. Bij een lage hydraulische belasting zullen dan meer steentjes verplaatsen zodat de betrouwbaarheid van de meetresultaten toeneemt.

Ook door de meetopstelling meer toe te spitsen op een bepaald aspect van het transportproces kan de betrouwbaarheid vergroot worden. Wanneer men bijvoorbeeld alleen geïnteresseerd is in het transport van steentjes door een raai, dan dient er in de proefopstelling voldoende aanvoer van steentjes te zijn. In dat geval is het noodzakelijk om met grote oppervlakten steentjes te werken vóór de meetraai

Wanneer men bijvoorbeeld specifiek in de pick-up van steentjes geïnteresseerd is, dienen er zoveel mogelijk smalle meetstroken in de opstelling te worden aangebracht, zodat het mogelijk is om een geringe verplaatsing van een steentje waar te kunnen nemen.

De onnauwkeurigheid in de bepaling van de gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter kan verkleind worden door het debiet nauwkeuriger vast te stellen of op een meer nauwkeurige manier de gemiddelde snelheid in de goot te bepalen

Uit dit onderzoek komt een duidelijke signaal naar voren dat de gemiddelde schuifspanning ten gevolge van de stroming en de golven een goede maat voor de belasting is. Misschien is het

mogelijk om deze gemiddelde schuifspanning experimenteel te bepalen, door bijvoorbeeld tot zeer dicht bij de bodem, het gemiddelde snelheidsprofiel t.g.v. van de golven en de stroming te bepalen en uit het snelheidsprofiel een gemiddelde schuifspanning af te leiden.

– Vergroting van de toepasbaarheid

Om de toepasbaarheid van de onderzoeksresultaten te vergroten dient het onderzoeksbereik vergroot te worden. Om een hogere gemiddelde gecombineerde mobiliteitsparameter te bereiken moet er een hogere stroomsnelheid in de goot gecreëerd worden. Het is alleen lastig om dit te combineren met hoge golven.

Wanneer de stroomlijning van de instroom van de goot verbeterd wordt, lukt het misschien om nog hoge golven te creëren bij hogere stroomsnelheden.

De toepasbaarheid van de in dit onderzoek afgeleide transport- en pick-up formules kan verder verbeterd worden door in de experimentele opzet meer aan te sluiten bij de praktijksituatie. Het is raadzaam om de experimenten met onregelmatige golven uit te voeren en eventueel in een golfbassin een stroming onder een hoek met de voortplantingsrichting van de golven te genereren.

– Vergroting van de geldigheid

Om de resultaten van dit onderzoek algemeen geldend te maken dienen een aantal belangrijke parameters gevarieerd te worden, die in dit onderzoek niet gevarieerd zijn. De eigenschappen van het bodemmateriaal moeten gevarieerd worden om een beter zicht te krijgen op de invloed van vorm en grootte van het bodemmateriaal. Aan de "belastings"zijde van de experimenten dient vooral de invloed van de golfperiode nog onderzocht te worden.

7.2.2 Aanbevelingen voor een andere onderzoeksaanpak

Er is in dit rapport duidelijk naar voren gekomen dat het verband tussen verplaatsingen en $\bar{\Psi}_{wc}$ niet onomstotelijk vast staat. Het mechanisme dat verplaatsingen van steentjes veroorzaakt, is in dit onderzoek niet verklaard. Het is raadzaam om in een vervolg onderzoek helder te krijgen wat nu het mechanisme is dat in een dergelijke complexe belastingssituatie verplaatsingen van steentjes veroorzaakt.

Aangezien het lastig is om aan een steentje in een bed te meten, is het misschien een goed idee om een aantal cm boven de bodem het snelheidsverloop te meten. Op deze manier is het misschien mogelijk om een verband te leggen tussen het snelheidsverloop in de buurt van de bodem en de verplaatsingen van steentjes. Het voordeel is dat er geen ingewikkelde modellen noodzakelijk zijn om resulterende schuifspanningen te bepalen, maar dat er toch meer inzicht ontstaat in het verplaatsen van steentjes.

Een duidelijk probleem bij dit onderzoek zijn de beperkte mogelijkheden om bij hogere stroomsnelheden nog regelmatige vlakke golven op te wekken. De sleutel om de conclusies uit dit onderzoek te weerleggen of te ondersteunen, ligt in meetdata van verplaatsingen bij hogere stroomsnelheden. Om deze meetwaarden te verkrijgen zal er een andere stroomgoot moeten worden gebruikt of moeten er speciale aanpassingen aan de goot worden aangebracht. De kern van het probleem voor een vervolgonderzoeker is dus in eerste instantie heel praktisch!

Bijlage 1 Berekeningsmethode volgens het model van Soulsby

In paragraaf 3.4.3 is aangegeven hoe in het model van Soulsby de waarden voor de afzonderlijke componenten van de schuifspanning, $\tau_{b,c}$ en $\hat{\tau}_{b,w}$ bepaald worden. De coëfficiënten die noodzakelijk zijn om het model van Soulsby toe te kunnen passen staan weergegeven in Tabel B1-1.

Fitting coefficients for wave/current boundary layer models

Model*	a_1	a_2	a_3	a_4	m_1	m_2	m_3	m_4	n_1	n_2	n_3	n_4	I
GM79	0.11	1.95	-0.49	-0.28	0.65	-0.22	0.15	0.06	0.71	-0.19	0.17	-0.15	0.67
F84	-0.06	1.70	-0.29	0.29	0.67	-0.29	0.09	0.42	0.75	-0.27	0.11	-0.02	0.80
HT91	-0.07	1.87	-0.34	-0.12	0.72	-0.33	0.08	0.34	0.78	-0.23	0.12	-0.12	0.82
DSK88	0.05	1.62	-0.38	0.25	1.05	-0.72	-0.08	0.59	0.66	-0.25	0.19	-0.03	0.82
	b_1	b_2	b_3	b_4	p_1	p_2	p_3	p_4	q_1	q_2	q_3	q_4	J
GM79	0.73	0.40	-0.23	-0.24	-0.68	0.13	0.24	-0.07	1.04	-0.56	0.34	-0.27	0.50
F84	0.29	0.55	-0.10	-0.14	-0.77	0.10	0.27	0.14	0.91	0.25	0.50	0.45	3.0
HT91	0.27	0.51	-0.10	-0.24	-0.75	0.13	0.12	0.02	0.89	0.40	0.50	-0.28	2.7
DSK88	0.22	0.73	-0.05	-0.35	-0.86	0.26	0.34	-0.07	-0.89	2.33	2.60	-2.50	2.7
DATA13	0.47	0.69	-0.09	-0.08	-0.53	0.47	0.07	-0.02	2.34	-2.41	0.45	-0.61	8.8
DATA2	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0

* GM79 = Grant and Madsen (1979); F84 = Fredsøe (1984); HT91 = Huynh-Thanh and Temperville (1991); DSK88 = Davies *et al.* (1988); DATA13, DATA2 = fit to 131 data points using 13,2 coefficients.

Tabel B1-1: Coëfficiënten benodigd voor het model van Soulsby (uit Soulsby (1997))

De procedure om de maximale schuifspanning ($\tau_{max,wc}$) en de gemiddelde schuifspanning ($\tau_{m,wc}$) t.g.v. de golf-stroming interactie te bepalen is als volgt:

1. Bereken de stromingsdominantieparameter (X):

$$X = \frac{\tau_{b,c}}{\tau_{b,c} + \hat{\tau}_{b,w}} \dots \dots \dots (B1-1)$$

2. Nadat uit tabel B1-1 een model is gekozen, kan de parameter a berekend worden. De parameter a is gegeven door:

$$a = (a_1 + a_2 |\cos \phi|^I) + (a_3 + a_4 |\cos \phi|^I) \log_{10}(f_w / C_f) \dots (B1-2)$$

Hierin is:

- ϕ = hoek tussen de stroming en de voortplantingsrichting van de golf in graden;
- f_w = wrijvingsfactor onder golven [-];
- C_f = wrijvingsfactor onder stroming [-];
- a_1, a_2, a_3, a_4 en I = coëfficiënten uit Tabel B1-1 [-].

3. Bereken met analoge uitdrukkingen m en n.
4. Bereken de parameter b voor het uit tabel B1-1 gekozen model. De parameter b is gegeven door:

$$b = (b_1 + b_2 |\cos \phi|^J) + (b_3 + b_4 |\cos \phi|^J) \log_{10}(f_w / C_f) \dots (B1-3)$$

Hierin is:

- b_1, b_2, b_3, b_4 en J = coëfficiënten uit Tabel B1-1 [-].

Bijlage 1: Berekeningsmethode volgens het model van Soulsby

5. Bereken met analoge uitdrukking p en q.
6. De parameter Z is nu te berekenen met :

$$Z = 1 + aX^m(1-X)^n \dots\dots\dots(B1-4)$$

7. De parameter Y volgt uit:

$$Y = X[1 + bX^p(1-X)^q] \dots\dots\dots(B1-5)$$

8. De maximale schuifspanning t.g.v. de golf-stroming interactie is:

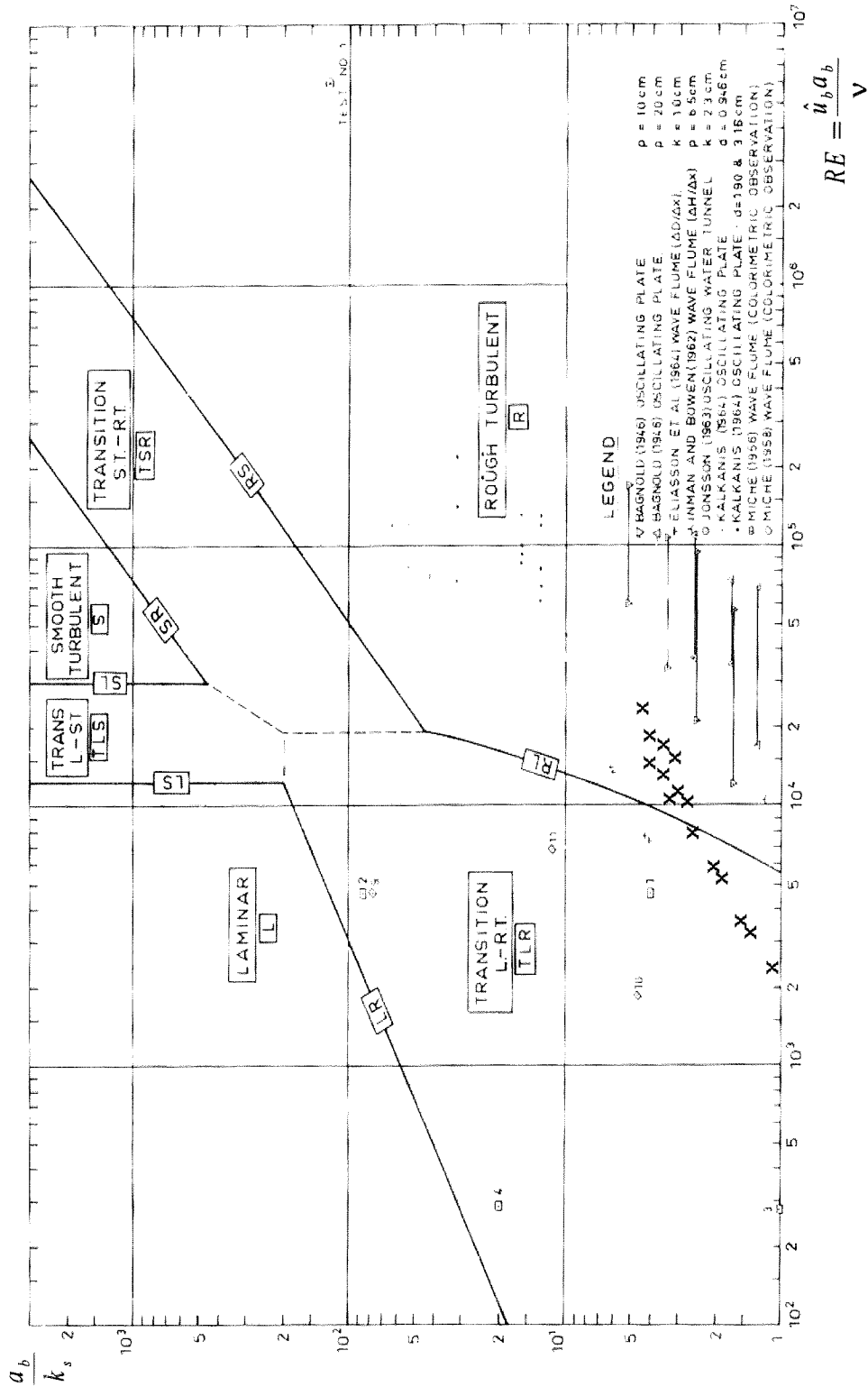
$$\tau_{\max,wc} = Z(\tau_{b,c} + \hat{\tau}_{b,w}) \dots\dots\dots(B1-6)$$

9. De gemiddelde schuifspanning t.g.v. de golf-stroming interactie

$$\tau_{m,wc} = Y(\tau_{b,c} + \hat{\tau}_{b,w}) \dots\dots\dots(B1-7)$$

Bijlage 2 Grenslaag onder golven

Figuur B2-1 is een afbeelding uit het artikel van Jonsson (1963) waarmee op eenvoudige wijze het stromingsregime onder een golf bepaald kan worden.



Figuur B2-1: Verschillende stromingsregimes voor de grenslaag van een golf

Bijlage 2 Grenslaag onder golven

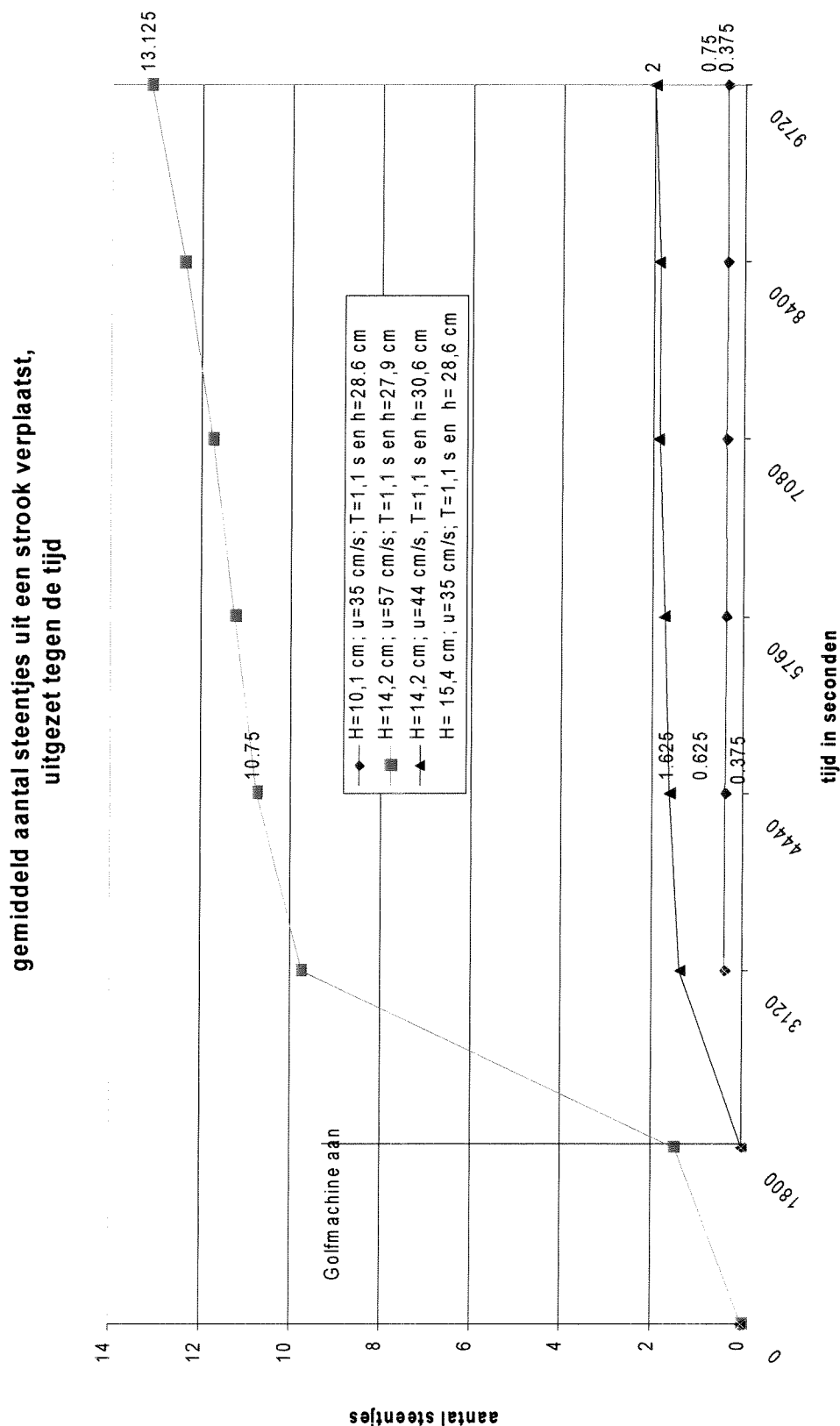
In Figuur B2-1 staan een aantal letters die een stromingssituatie karakteriseren. De betekenis van de letters is als volgt:

R	= rough	= ruw
S	= smooth	= glad
T	= turbulent	
L	= laminair	
T	= transition	= overgang

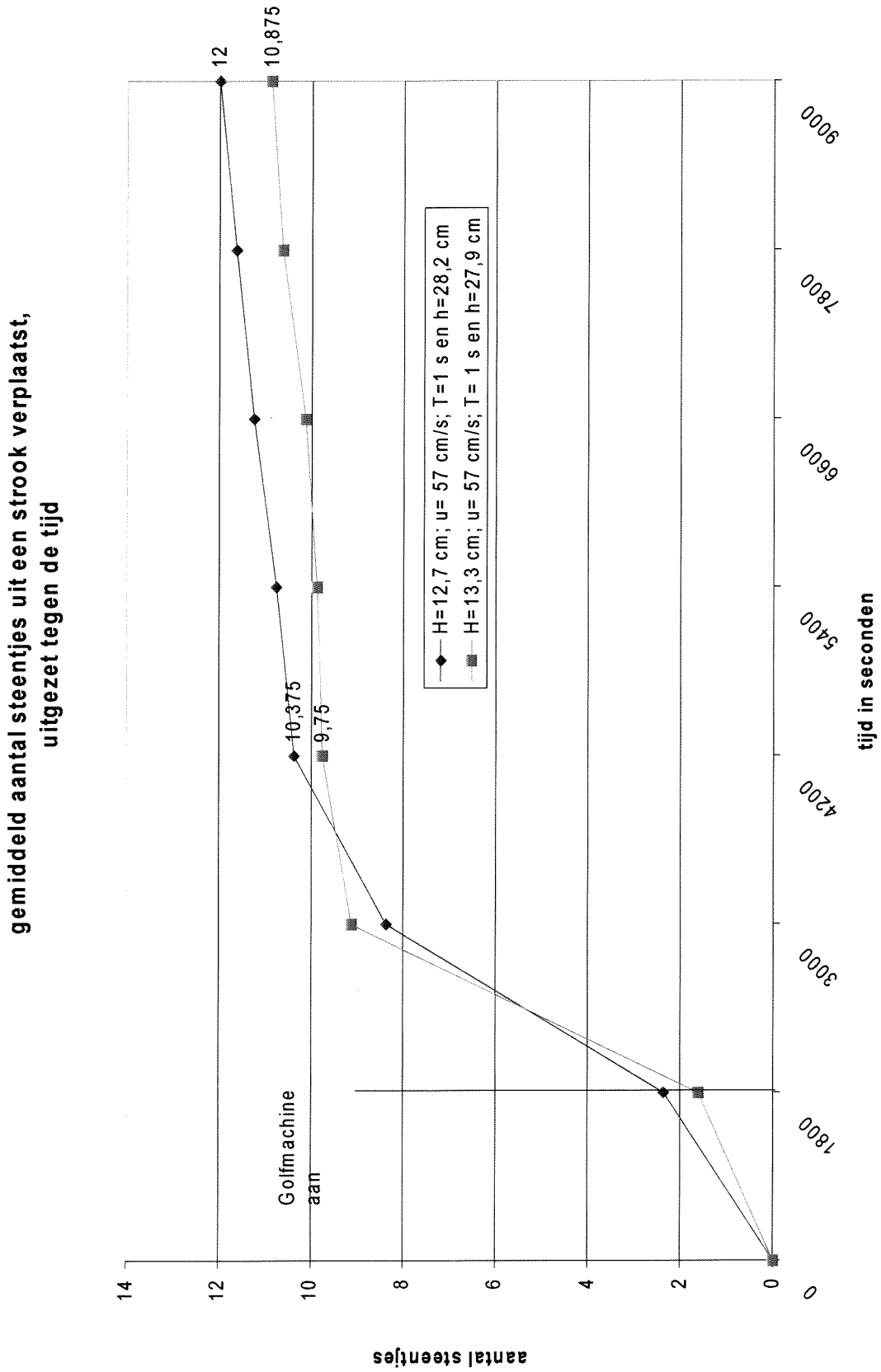
De kruisjes in Figuur B2-1 geven een beeld van het stromingsregime dat tijdens de experimenten van dit onderzoek optrad.

Het blijkt dat, wanneer de golfhoogte kleiner is dan ca. 8,5 cm de grenslaag niet meer als ruw-turbulent te beschouwen is, maar dat de grenslaag in het overgangsgebied tussen laminaire en turbulente stroming zit. Jonnson omschrijft dit gebied als "Transition between rough laminair en rough turbulent".

Bijlage 3 Verplaatsingen van steentjes als functie van de tijd



Figuur B3-1: Resultaat van de proeven waarop de meetprocedure van dit onderzoek is gebaseerd

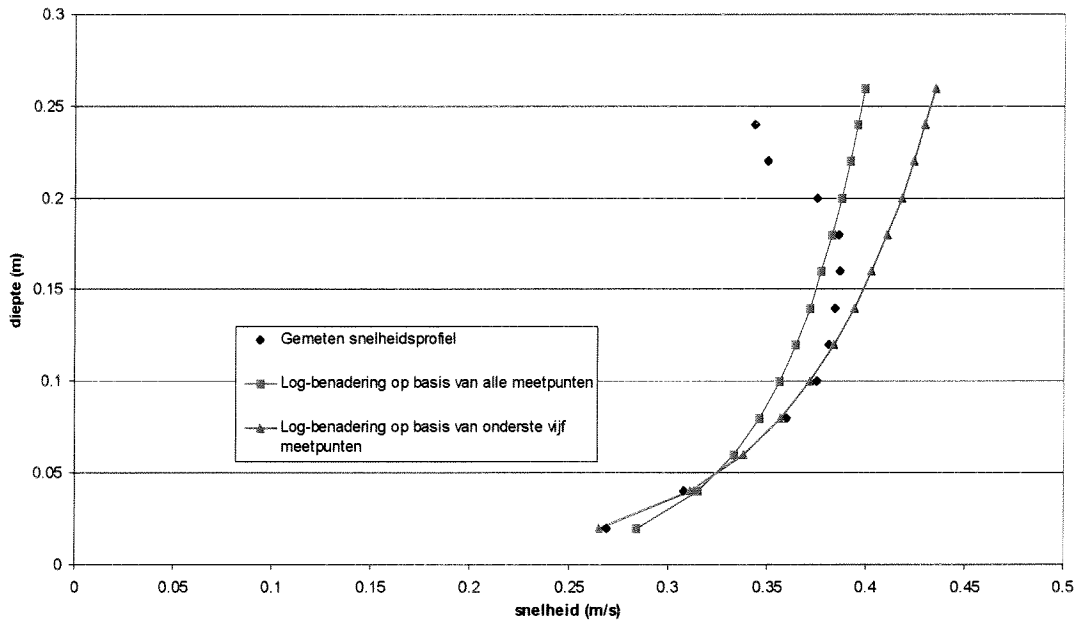


Figuur B3-2: Resultaat van de proeven waarop de meetprocedure van dit onderzoek is gebaseerd (vervolg op Figuur B3-2)

Bijlage 4 Overzicht gemeten snelheidsprofielen

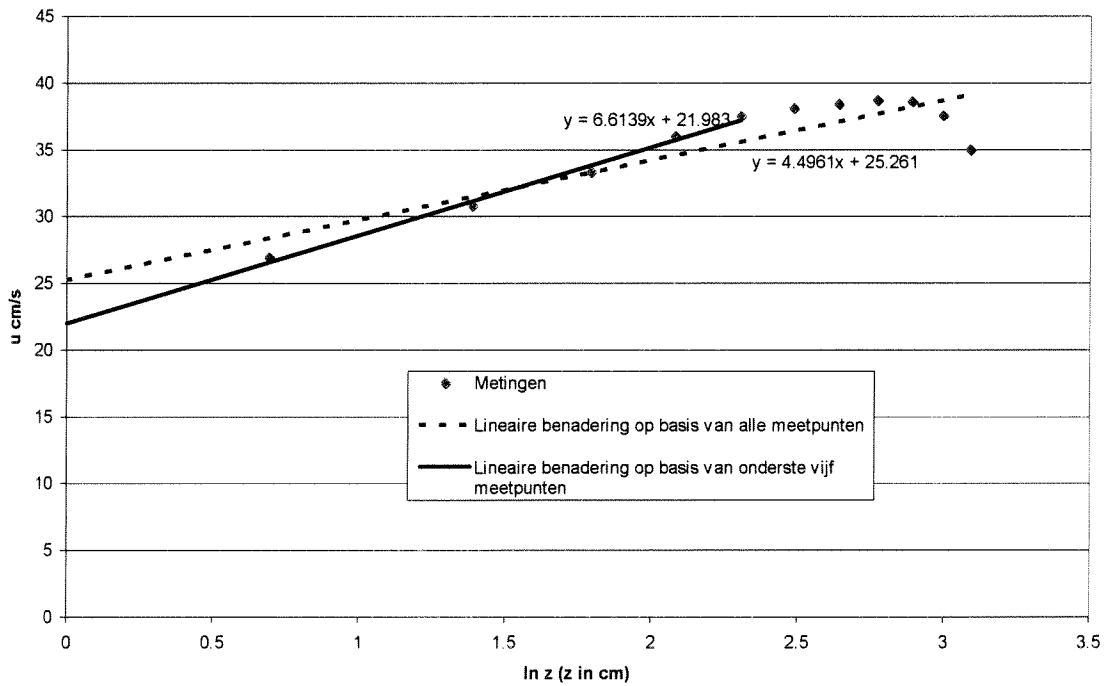
Meetserie 1: ingestelde $\bar{u} = 0,35$ m/s

Vergelijking tussen gemeten snelheidsprofiel en logaritmische benadering, de gemiddelde snelheid is 0,35 m/s



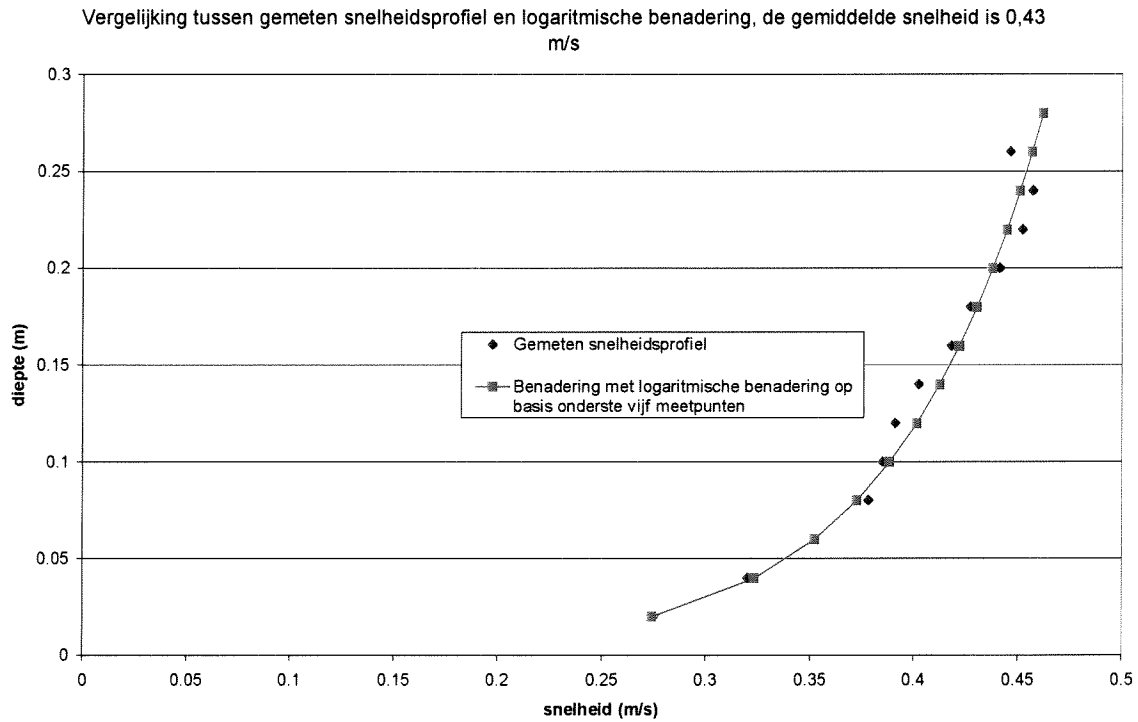
Figuur B4-1: Gemeten snelheidsprofiel en twee log-benaderingen

Snelheid tegen de diepte uitgezet, de gemiddelde snelheid is 0,35 m/s

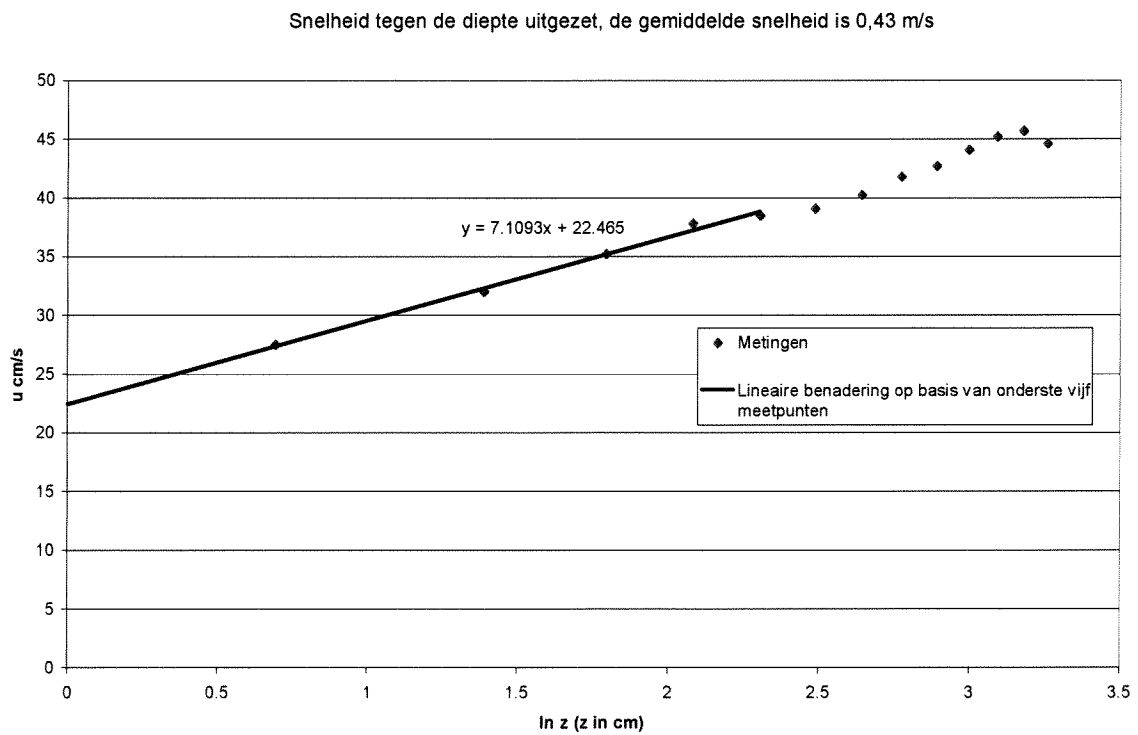


Figuur B4-2: Logaritmische benaderingen van het gemeten snelheidsprofiel

Meetserie 2: ingestelde $\bar{u} = 0,43$ m/s

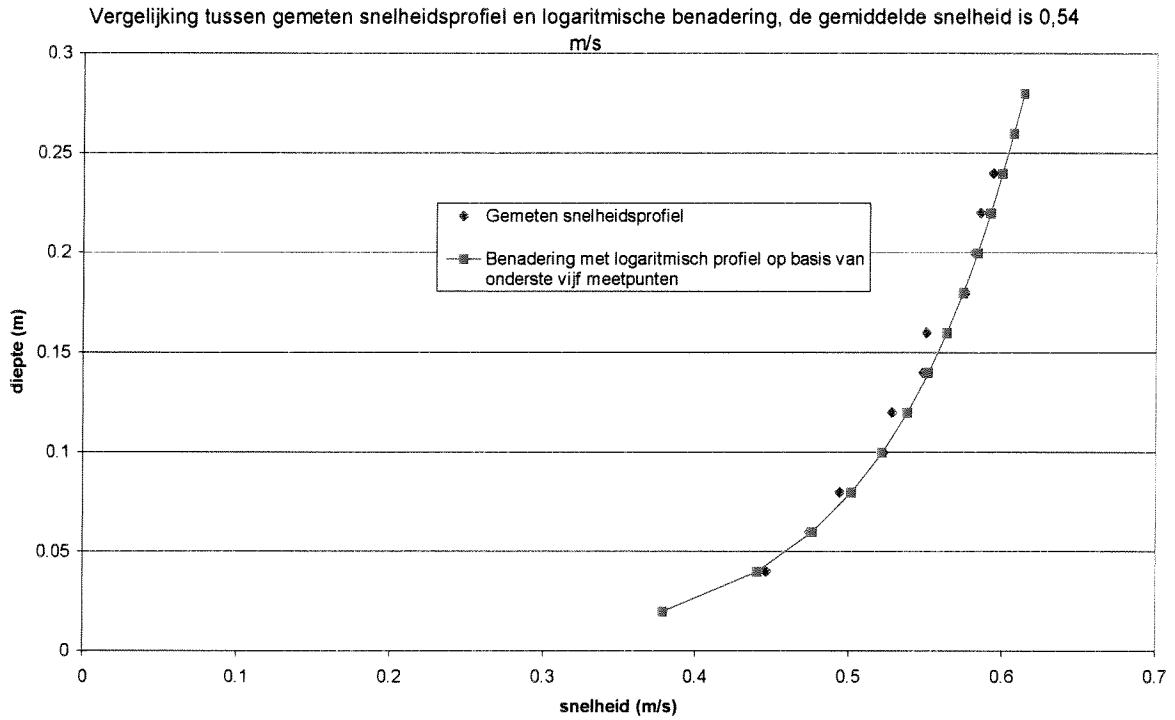


Figuur B4-3: Gemeten snelheidsprofiel en een logaritmische benadering



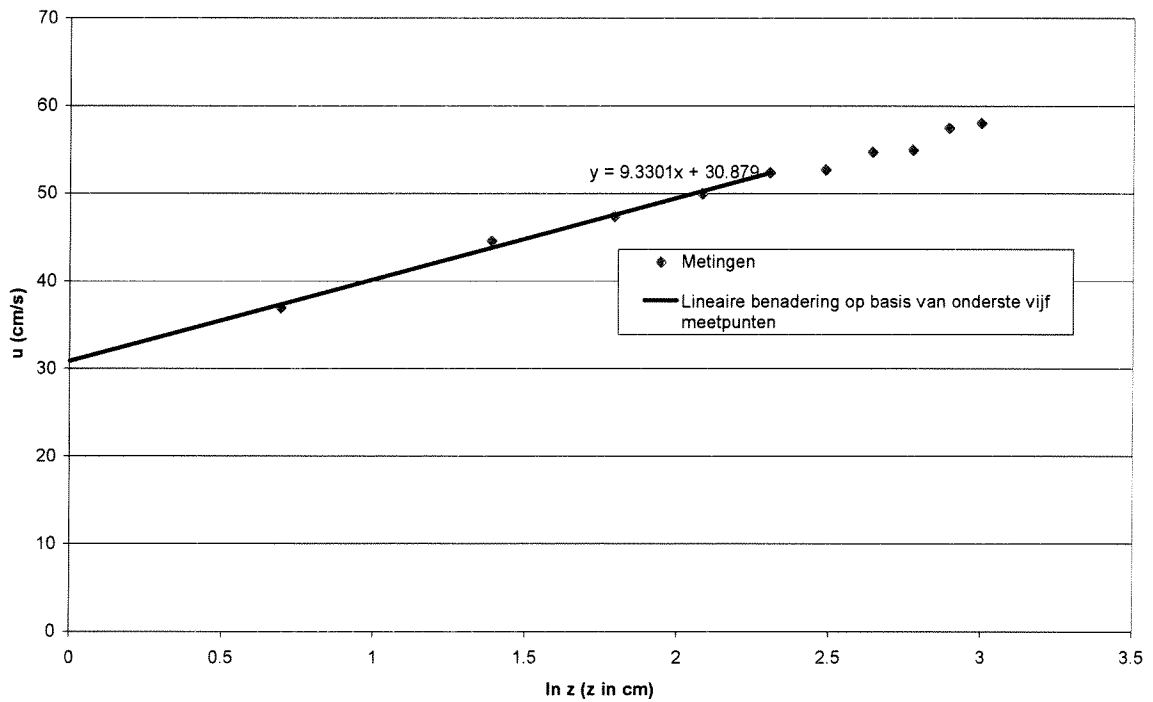
Figuur B4-4: Logaritmische benadering van het gemeten snelheidsprofiel

Meetserie 3: ingestelde $\bar{u} = 0,54$ m/s



Figuur B4-5: Gemeten snelheidsprofiel en een logaritmische benadering

Snelheid tegen de diepte uitgezet, de gemiddelde snelheid is 0,54 m/s

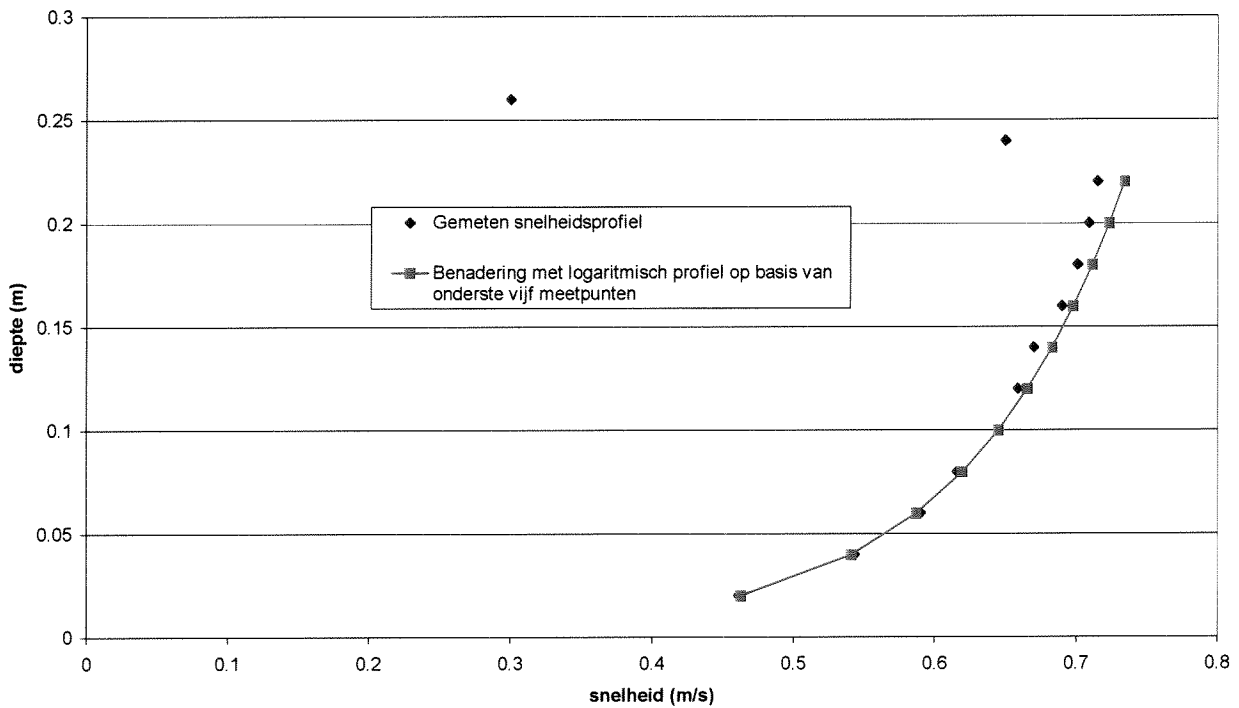


Figuur B4-6: Logaritmische benadering van het gemeten snelheidsprofiel

Bijlage 4 Overzicht gemeten snelheidsprofielen

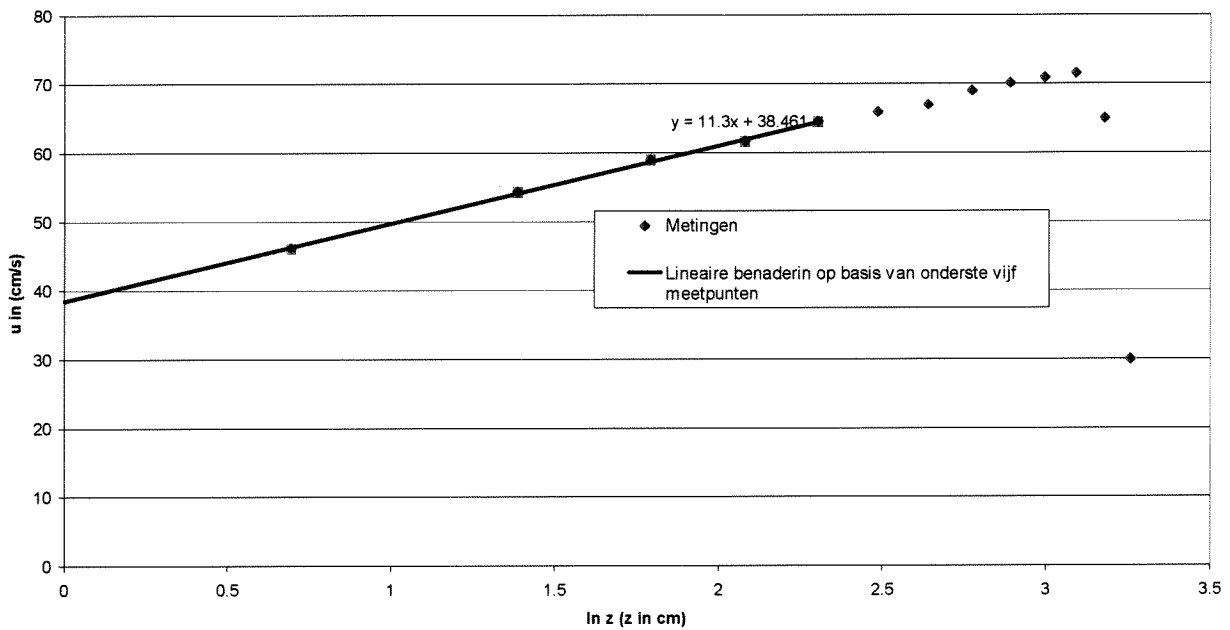
Meetserie 4: ingestelde $\bar{u} = 0,66$ m/s

Vergelijking tussen gemeten snelheidsprofiel en logaritmische benadering, gemiddelde snelheid is 0,66 m/s



Figuur B4-7: Gemeten snelheidsprofiel en een logaritmische benadering

Snelheid tegen de diepte uitgezet, gemiddelde snelheid = 0,66 m/s



Figuur B4-8: Logaritmische benadering van het gemeten snelheidsprofiel

Bijlage 5 Belastingparameters per experiment

	T [s]	H [m]	\bar{u} [m/s]	$\hat{\tau}_{b,w}$ [N/m ²]	Ψ_w	$\tau_{b,c}$ [N/m ²]	Ψ	$\tau_{max,wc}$ (linear)	$\Psi_{max,wc}$ (lin.)	X (Soulby)	$\tau_{max,wc}$ (Fredsoe)	$\Psi_{max,wc}$ (F'soe)	Z (Soulby)	$\tau_{m,wc}$ (F'soe)	$\bar{\Psi}_{wc}$ (F'soe)	$\tau_{m,wr}$ (GM)	$\tau_{m,wc}$ (B'ker)
Proev-en serie 1	0	0	0.35	0.000	0	0.7	0.009	0.700	0.007	1.000	0.700	0.007	1.000	0.7	0.007	0.700	0.700
	1.1	0.1007	0.35	5.546	0.043	0.695	0.008	6.241	0.064	0.111	6.965	0.071	1.116	0.996	0.010	1.179	3.468
	1.1	0.1536	0.35	9.124	0.074	0.695	0.008	9.819	0.101	0.071	10.660	0.109	1.086	1.103	0.011	1.406	5.257
Proeven serie 2	0	0	0.43	0.000	0	0.81	0.01	0.810	0.008	1.000	0.810	0.008	1.000	0.81	0.008	0.810	0.810
	1.1	0.1421	0.44	4.869	0.071	0.852	0.01	5.721	0.059	0.149	6.846	0.070	1.197	1.309	0.013	1.571	3.286
	1.1	0.1511	0.42	5.048	0.074	0.767	0.009	5.815	0.060	0.132	6.835	0.070	1.175	1.196	0.012	1.449	3.291
	1.1	0.1324	0.44	4.420	0.064	0.85	0.01	5.270	0.054	0.161	6.359	0.065	1.207	1.279	0.013	1.519	3.060
	1.1	0.1116	0.44	3.562	0.052	0.851	0.01	4.413	0.045	0.193	5.447	0.056	1.234	1.229	0.013	1.431	2.632
	1.1	0.1052	0.43	3.277	0.048	0.811	0.01	4.088	0.042	0.198	5.053	0.052	1.236	1.158	0.012	1.340	2.450
Proevenserie 3	1.1	0.0549	0.57	2.815	0.021	1.583	0.019	4.398	0.045	0.360	5.844	0.060	1.329	1.932	0.020	2.032	2.991
	1.1	0.0654	0.57	3.815	0.026	1.581	0.019	5.396	0.055	0.293	6.858	0.070	1.271	1.976	0.020	2.094	3.488
	1.1	0.0757	0.57	4.463	0.03	1.578	0.019	6.041	0.062	0.261	7.553	0.077	1.250	2.019	0.021	2.176	3.809
	1.1	0.0846	0.57	5.079	0.035	1.582	0.019	6.661	0.068	0.238	8.223	0.084	1.234	2.065	0.021	2.257	4.122
	1.1	0.0947	0.58	5.799	0.041	1.64	0.02	7.439	0.076	0.220	9.111	0.093	1.225	2.182	0.022	2.418	4.540
	1.1	0.106	0.57	6.541	0.046	1.579	0.019	8.120	0.083	0.194	9.771	0.100	1.203	2.147	0.022	2.416	4.850
	1.1	0.119	0.58	7.607	0.054	1.644	0.02	9.251	0.095	0.178	11.038	0.113	1.193	2.289	0.023	2.617	5.448
	1.1	0.1308	0.58	8.496	0.061	1.642	0.02	10.138	0.104	0.162	11.971	0.123	1.181	2.331	0.024	2.699	5.890
	1.1	0.1323	0.57	8.434	0.061	1.575	0.019	10.009	0.103	0.157	11.757	0.120	1.175	2.237	0.023	2.593	5.792
	1.1	0.1374	0.57	8.998	0.065	1.586	0.019	10.584	0.108	0.150	12.378	0.127	1.170	2.281	0.023	2.665	6.085
	1.1	0.1421	0.57	9.252	0.068	1.579	0.019	10.831	0.111	0.146	12.628	0.129	1.166	2.282	0.023	2.676	6.205
1.1	0.1495	0.57	9.862	0.073	1.581	0.019	11.443	0.117	0.138	13.272	0.136	1.160	2.312	0.024	2.732	6.512	
Proevenserie 4	1.1	0.0451	0.65	1.487	0.015	1.964	0.024	3.451	0.035	0.569	5.087	0.052	1.474	2.253	0.023	2.408	2.708
	1.1	0.0556	0.66	1.904	0.019	2.035	0.025	3.939	0.040	0.517	5.778	0.059	1.467	2.405	0.025	2.609	2.987
	1.1	0.0646	0.65	2.245	0.023	1.967	0.024	4.212	0.043	0.467	6.103	0.063	1.449	2.389	0.024	2.616	3.090
	1.1	0.0745	0.66	2.670	0.027	2.031	0.025	4.701	0.048	0.432	6.754	0.069	1.437	2.525	0.026	2.795	3.366
	1.1	0.0849	0.66	3.151	0.032	2.037	0.025	5.188	0.053	0.393	7.355	0.075	1.418	2.602	0.027	2.909	3.613
	1.1	0.0976	0.65	3.691	0.038	1.967	0.024	5.658	0.058	0.348	7.863	0.081	1.390	2.592	0.027	2.928	3.813
	1.1	0.1039	0.66	4.060	0.042	2.039	0.025	6.099	0.062	0.334	8.438	0.086	1.384	2.723	0.028	3.093	4.069
	1.1	0.1187	0.66	4.800	0.049	2.038	0.025	6.838	0.070	0.298	9.293	0.095	1.359	2.806	0.029	3.223	4.438
	1.1	0.1283	0.66	5.261	0.054	2.033	0.025	7.294	0.075	0.279	9.808	0.100	1.345	2.85	0.029	3.294	4.664
	1.1	0.1338	0.66	5.560	0.057	2.033	0.025	7.593	0.078	0.268	10.146	0.104	1.336	2.88	0.029	3.341	4.813
	1.1	0	0.66	0.000	0	2.038	0.025	2.038	0.021	1.000	2.038	0.021	1.000	2.038	0.021	2.038	2.038
Proevenserie 5	0	0	0.54	0.000	0	1.39	0.017	1.390	0.014	1.000	1.390	0.014	1.000	1.39	0.014	1.390	1.390
	1	0.0524	0.57	2.022	0.02	1.581	0.019	3.603	0.037	0.439	5.045	0.052	1.400	1.899	0.019	2.021	2.592
	1	0.0651	0.57	2.573	0.026	1.581	0.019	4.154	0.043	0.381	5.706	0.058	1.374	1.968	0.020	2.133	2.868
	1	0.0749	0.57	3.018	0.031	1.581	0.019	4.599	0.047	0.344	6.226	0.064	1.354	2.019	0.021	2.215	3.090
	1	0.0839	0.57	3.459	0.036	1.582	0.019	5.041	0.052	0.314	6.727	0.069	1.334	2.065	0.021	2.251	3.312
	1	0.0989	0.57	4.193	0.043	1.58	0.019	5.773	0.059	0.274	7.543	0.077	1.307	2.132	0.022	2.402	3.677
	1	0.1099	0.57	4.763	0.049	1.58	0.019	6.343	0.065	0.249	8.170	0.084	1.288	2.18	0.022	2.484	3.962
	1	0.1153	0.57	5.056	0.053	1.581	0.019	6.637	0.068	0.238	8.497	0.087	1.280	2.206	0.023	2.526	4.109
	1	0.1268	0.57	5.632	0.059	1.575	0.019	7.207	0.074	0.219	9.111	0.093	1.264	2.242	0.023	2.592	4.391
	1	0.133	0.57	6.033	0.063	1.579	0.019	7.612	0.078	0.207	9.555	0.098	1.255	2.277	0.023	2.650	4.596

Geel gekleurde experimenten: Proevenserie 6

Bijlage 6 Transportparameters per experiment

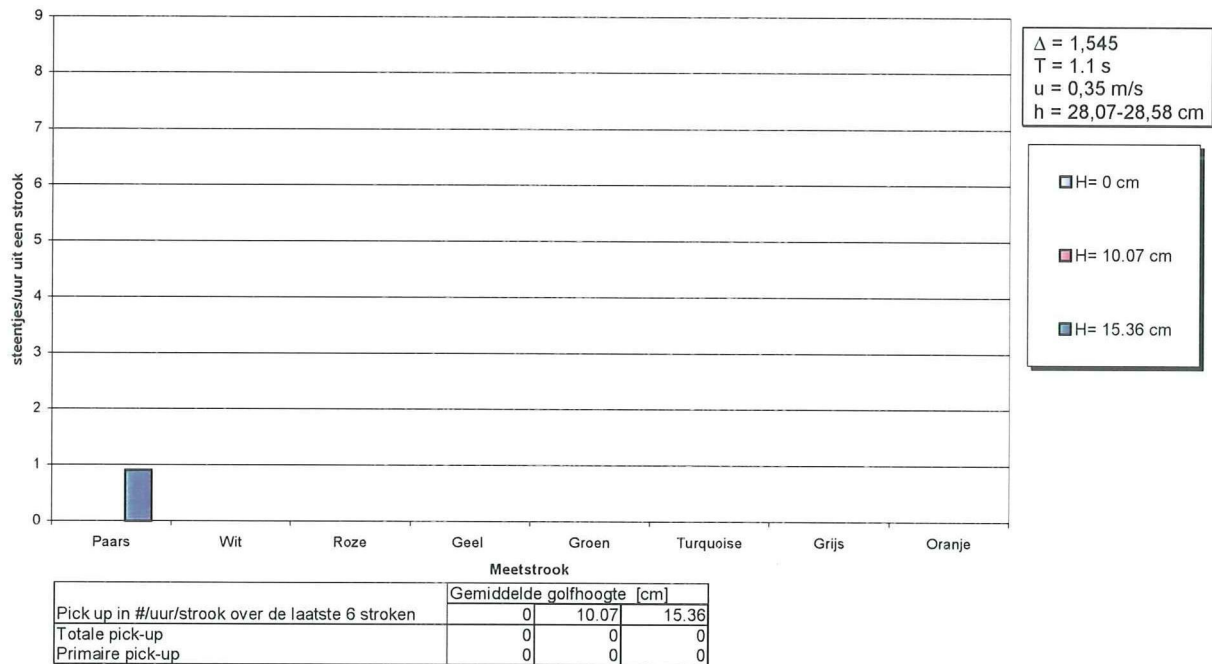
	T [s]	H [m]	u [m/s]	h [m]	H/h	h/L	Fr	Re	r	ρ_s [m/s]	ϕ_p	Xs50 [cm]	Xs90 [cm]	Xs50/dn50	Xs90/dn50	q_s [m ² /s]	ϕ
Proeven serie 1	0	0	0.35	0.2807	0	nvt	0.211	98245	43.25	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.1	0.1007	0.35	0.2858	0.352	0.1405	0.209	100030	44.04	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.1	0.1536	0.35	0.2858	0.537	0.1405	0.209	100030	44.04	0	0	2.5	4.5	4.59	8.26	0	0
Proeven serie 2	0	0	0.43	0.3102	0	nvt	0.246	133386	47.80	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.1	0.1421	0.44	0.3061	0.464	0.1396	0.254	134684	47.16	4.101E-10	1.305E-09	6.27	9.25	11.50	16.97	3.867E-11	1.897E-08
	1.1	0.1511	0.42	0.3172	0.476	0.1449	0.238	133224	48.88	2.698E-10	8.588E-10	2.5	4.5	4.59	8.26	1.349E-11	6.617E-09
	1.1	0.1324	0.44	0.3079	0.430	0.1402	0.253	135476	47.44	5.396E-10	1.718E-09	10	14	18.35	25.69	6.835E-11	3.352E-08
	1.1	0.1116	0.44	0.3073	0.363	0.1400	0.253	135212	47.35	2.698E-10	8.588E-10	2.5	4.5	4.59	8.26	1.349E-11	6.617E-09
1.1	0.1052	0.43	0.3096	0.340	0.1416	0.247	133128	47.70	2.698E-10	8.588E-10	2.5	4.5	4.59	8.26	1.349E-11	6.617E-09	
Proevenserie 3	1.1	0.0549	0.57	0.2775	0.198	0.1203	0.345	158175	42.76	2.698E-10	8.581E-10	5	9	9.17	16.51	0	0
	1.1	0.0654	0.57	0.2783	0.235	0.1212	0.345	158631	42.88	8.094E-10	2.577E-09	3.7	30	6.79	55.05	2.068E-11	1.015E-08
	1.1	0.0757	0.57	0.2802	0.270	0.1218	0.344	159714	43.17	8.094E-10	2.577E-09	27.5	42	50.46	77.06	1.430E-10	7.014E-08
	1.1	0.0846	0.57	0.2782	0.304	0.1212	0.345	158574	42.87	1.101E-09	3.504E-09	4.2	30	7.71	55.05	1.430E-10	7.014E-08
	1.1	0.0947	0.58	0.2769	0.342	0.1202	0.352	160602	42.67	2.180E-09	6.939E-09	30	54	55.05	99.08	4.290E-10	2.104E-07
	1.1	0.106	0.57	0.2796	0.379	0.1216	0.344	159372	43.08	1.640E-09	5.222E-09	3.33	27	6.11	49.54	1.430E-10	7.014E-08
	1.1	0.119	0.58	0.2752	0.432	0.1196	0.353	159616	42.40	2.180E-09	6.939E-09	15	29.75	27.52	54.59	2.248E-10	1.103E-07
	1.1	0.1308	0.58	0.2759	0.474	0.1199	0.353	160022	42.51	3.529E-09	1.123E-08	4.5	38	8.26	69.72	4.092E-10	2.007E-07
	1.1	0.1323	0.57	0.2815	0.470	0.1222	0.343	160455	43.37	3.273E-09	1.042E-08	3.86	33	7.08	60.55	3.687E-10	1.809E-07
	1.1	0.1374	0.57	0.2759	0.498	0.1205	0.346	157263	42.51	2.666E-09	8.485E-09	16.23	33.05	29.78	60.64	3.525E-10	1.729E-07
	1.1	0.1421	0.57	0.2794	0.509	0.1216	0.344	159258	43.05	3.637E-09	1.158E-08	4.59	53.14	8.42	97.50	4.946E-10	2.426E-07
1.1	0.1495	0.57	0.2786	0.537	0.1213	0.345	158802	42.93	5.450E-09	1.735E-08	9.5	28.5	17.43	52.29	8.786E-10	4.310E-07	
Proevenserie 4	1.1	0.0451	0.65	0.2873	0.157	0.1190	0.387	186745	44.27	1.371E-09	4.363E-09	4.4	37.4	8.07	68.62	1.430E-10	7.014E-08
	1.1	0.0556	0.66	0.2833	0.196	0.1172	0.396	186978	43.65	1.101E-09	3.504E-09	6.2	44	11.38	80.73	2.455E-10	1.204E-07
	1.1	0.0646	0.65	0.2859	0.226	0.1186	0.388	185835	44.05	3.000E-09	9.550E-09	8.75	27.5	16.06	50.46	4.497E-10	2.206E-07
	1.1	0.0745	0.66	0.2849	0.261	0.1177	0.395	188034	43.90	3.540E-09	1.127E-08	11.87	38.5	21.78	70.64	5.315E-10	2.607E-07
	1.1	0.0849	0.66	0.2823	0.301	0.1169	0.397	186318	43.50	3.540E-09	1.127E-08	8.34	52.11	15.30	95.61	5.720E-10	2.805E-07
	1.1	0.0976	0.65	0.2861	0.341	0.1186	0.388	185965	44.08	3.270E-09	1.041E-08	6.3	26.94	11.56	49.43	4.290E-10	2.104E-07
	1.1	0.1039	0.66	0.2817	0.369	0.1167	0.397	185922	43.41	3.270E-09	1.041E-08	14	45.5	25.69	83.49	6.538E-10	3.207E-07
	1.1	0.1187	0.66	0.2821	0.421	0.1168	0.397	186186	43.47	4.349E-09	1.384E-08	5.8	35.5	10.64	65.14	4.901E-10	2.404E-07
	1.1	0.1283	0.66	0.284	0.452	0.1174	0.395	187440	43.76	4.083E-09	1.300E-08	4.4	40	8.07	73.39	5.522E-10	2.708E-07
	1.1	0.1338	0.66	0.2839	0.471	0.1174	0.395	187374	43.74	4.910E-09	1.563E-08	8	38	14.68	69.72	8.786E-10	4.310E-07
	1.1	0	0.66	0.2821	0.000	nvt	0.397	186186	43.47	2.698E-10	8.588E-10	3.33	17	6.11	31.19	6.115E-11	3.000E-08
Proevenserie 5	0	0	0.54	0.2958	0	nvt	0.317	159732	45.58	0	0	4.2	22.5	7.71	41.28	0	0
	1	0.0524	0.57	0.2783	0.188	0.1351	0.345	158631	42.88	8.990E-10	2.863E-09	7.6	27.5	13.94	50.46	8.993E-11	4.411E-08
	1	0.0651	0.57	0.2785	0.234	0.1352	0.345	158745	42.91	1.209E-09	3.849E-09	2.5	4.5	4.59	8.26	1.124E-10	5.514E-08
	1	0.0749	0.57	0.2784	0.269	0.1351	0.345	158688	42.90	1.489E-09	4.743E-09	5	40	9.17	73.39	1.124E-10	5.514E-08
	1	0.0839	0.57	0.2778	0.302	0.1349	0.345	158346	42.80	1.489E-09	4.743E-09	4.2	20	7.71	36.70	1.799E-10	8.822E-08
	1	0.0989	0.57	0.279	0.354	0.1353	0.345	159030	42.99	2.698E-09	8.592E-09	10	35	18.35	64.22	2.905E-10	1.425E-07
	1	0.1099	0.57	0.2792	0.394	0.1354	0.344	159144	43.02	1.489E-09	4.743E-09	4	25	7.34	45.87	1.124E-10	5.514E-08
	1	0.1153	0.57	0.2786	0.414	0.1352	0.345	158802	42.93	2.698E-09	8.592E-09	12.5	29.5	22.94	54.13	1.799E-10	8.822E-08
	1	0.1268	0.57	0.2817	0.450	0.1363	0.343	160569	43.41	3.561E-09	1.134E-08	2.75	4.95	5.05	9.08	1.799E-10	8.822E-08
	1	0.133	0.57	0.2793	0.476	0.1355	0.344	159201	43.04	1.619E-09	5.155E-09	3.21	31.07	5.89	57.01	1.012E-10	4.963E-08

Geel gekleurde experimenten: Proevenserie 6

Bijlage 7 Pick-up grafieken

Serie 1

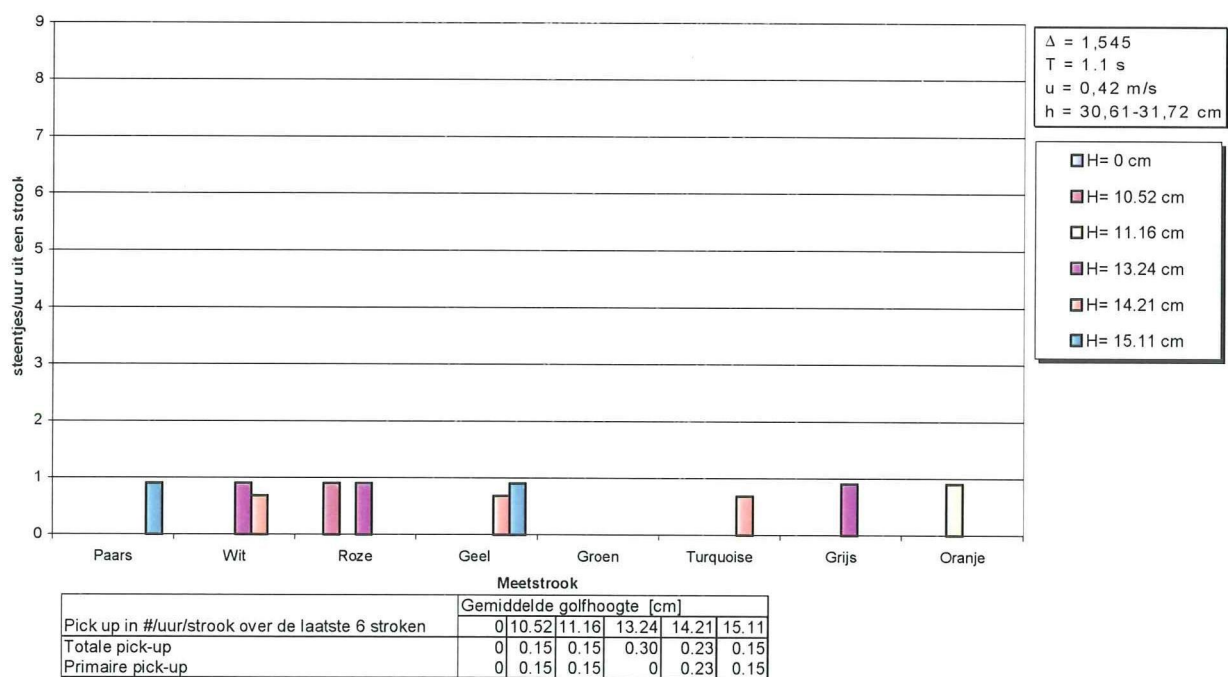
Totale pick-up van steentjes uit een strook



Figuur B7-1: Aantal verplaatste steentjes uit een strook voor proevenserie 1

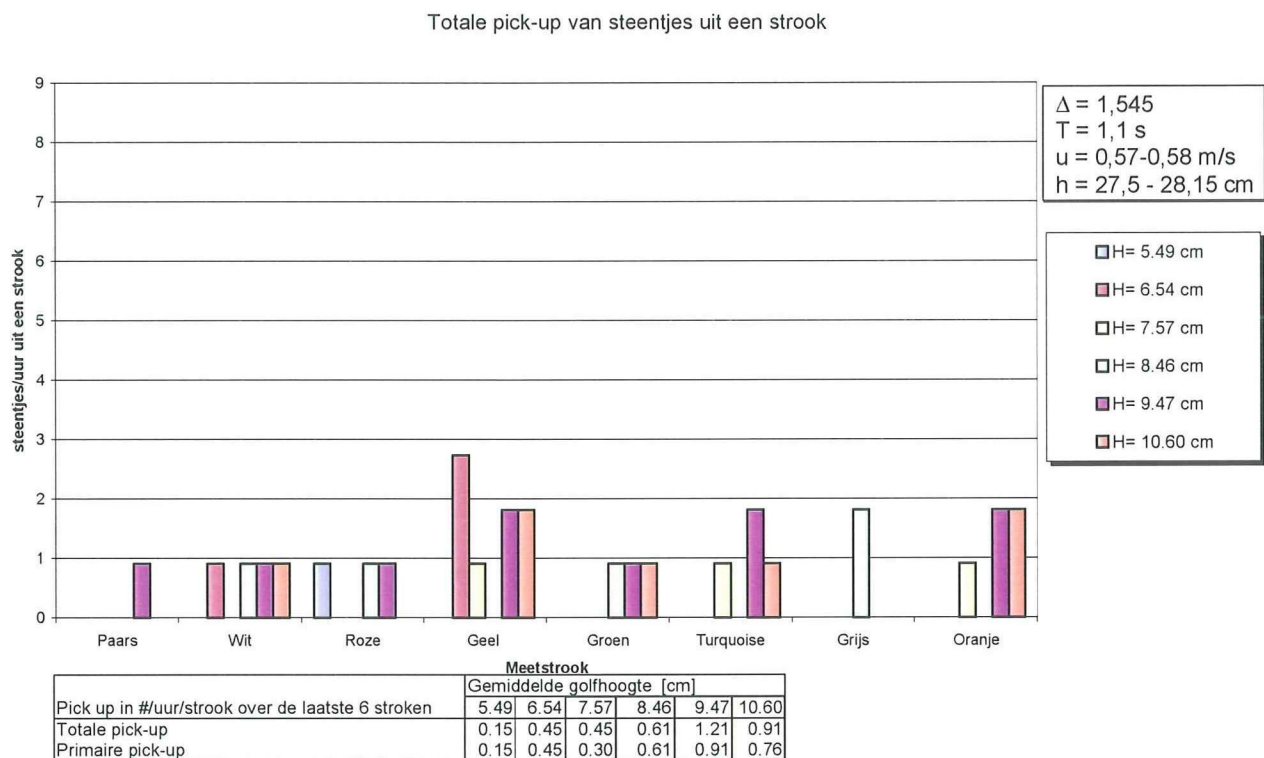
Serie 2

Totale pick-up van steentjes uit een strook

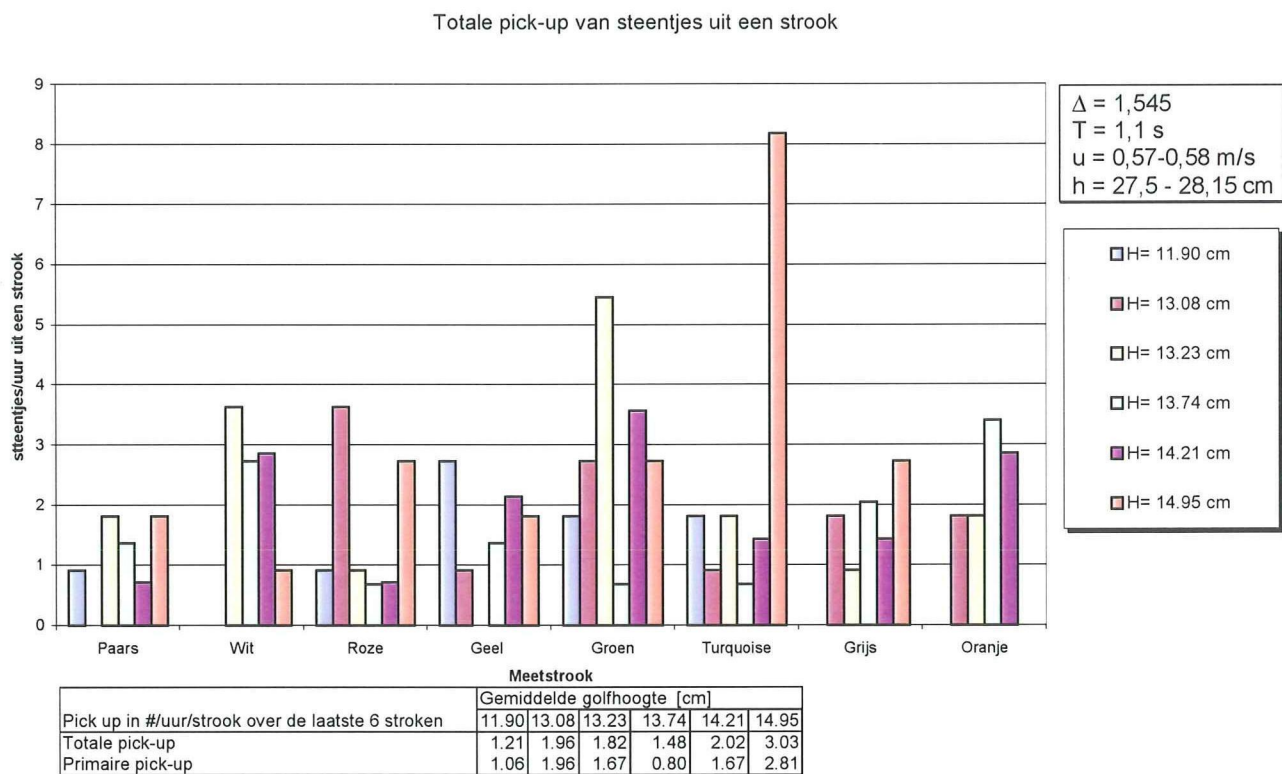


Figuur B7-2: Aantal verplaatste steentjes uit een strook voor proevenserie 2

Serie 3 en Serie 6

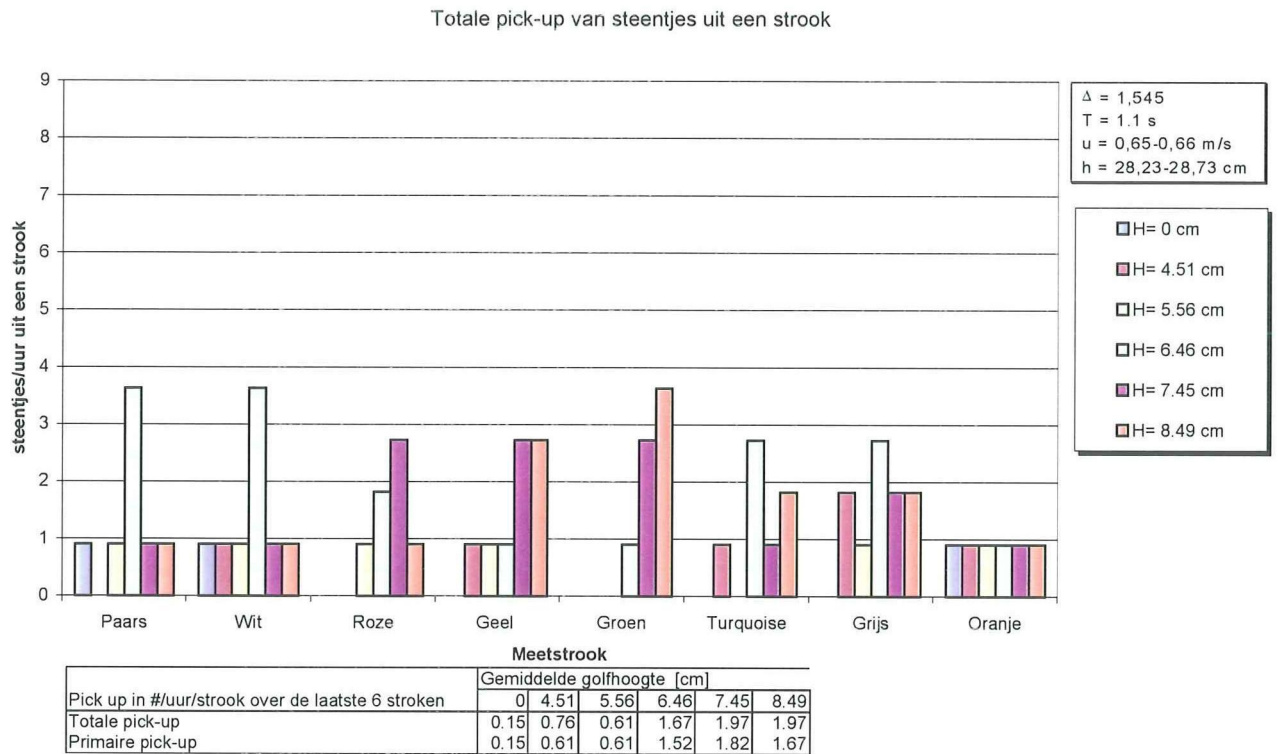


Figuur B7-3: Aantal verplaatste steentjes uit een strook voor het eerste deel van proevenserie 3

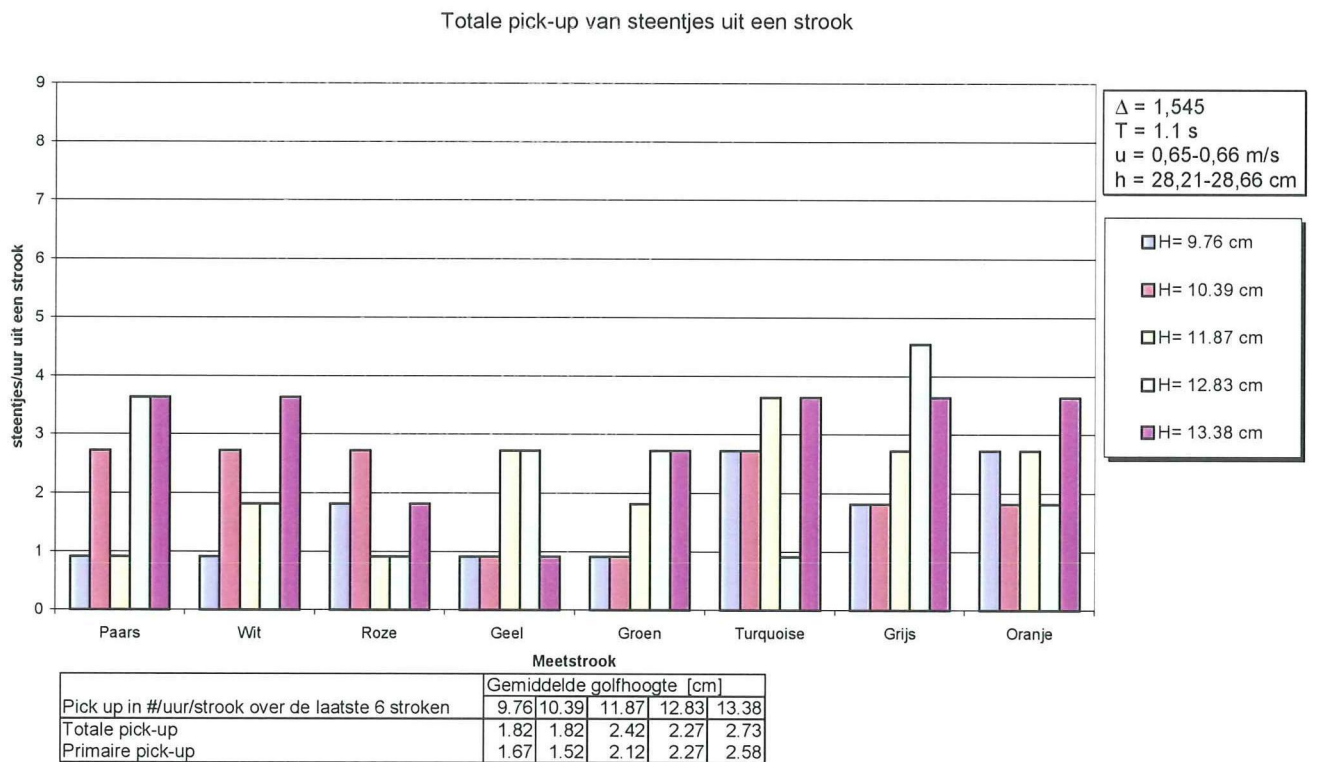


Figuur B7-4: Aantal verplaatste steentjes uit een strook voor het tweede deel van proevenserie 3. De proevenserie 6 bestaat uit de experimenten met een golfhoogte van 13,23 cm en 13,74 cm

Serie 4



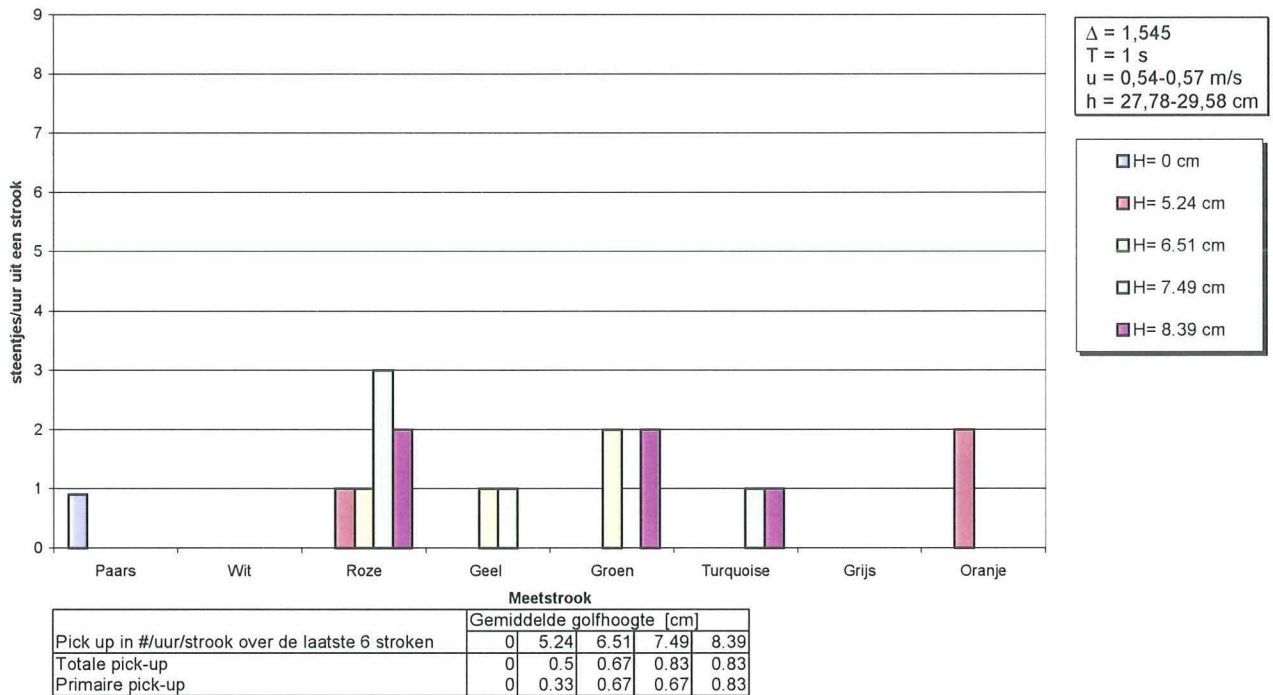
Figuur B7-5: Aantal verplaatste steentjes uit een strook voor het eerste deel van proevenserie 4



Figuur B7-6: Aantal verplaatste steentjes uit een strook voor het tweede deel van proevenserie 4

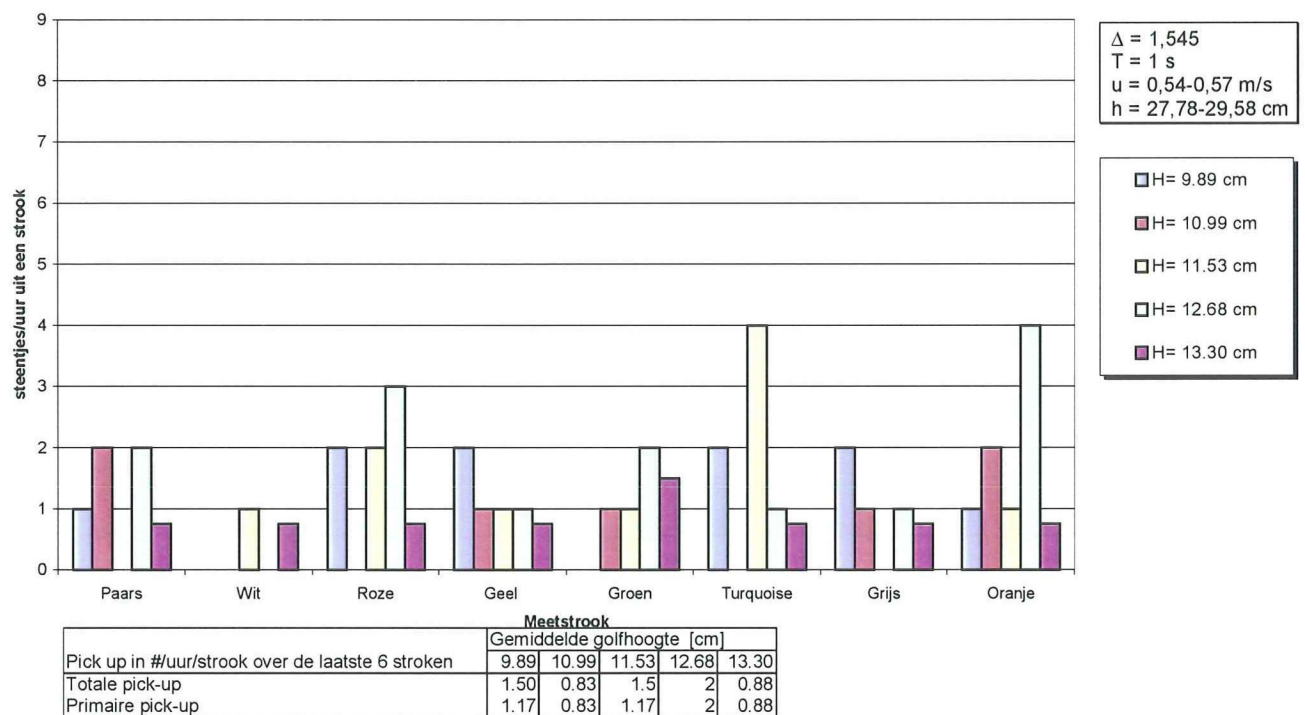
Serie 5

Totale pick-up van steentjes uit een strook



Figuur B7-7: Aantal verplaatste steentjes uit een strook voor het eerste deel van proevenserie 5

Totale pick-up van steentjes uit een strook



Figuur B7-8: Aantal verplaatste steentjes uit een strook voor het tweede deel van proevenserie 5

Bijlage 8 Verplaatsingsafstanden

Verplaatsingsafstanden voor serie 1:

Serie 1

$\Delta = 1,545$
$T = 1,1 \text{ s}$
$u = 0,35 \text{ m/s}$
$h = 28,07 - 28,58$

H=0 cm	
	afstand in cm
Vlak	5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65
Paars	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div>
Wit	
Roze	
Geel	
Groen	
Turq.	
Grijs	
Oranje	
Totaal	

H=10,07 cm	
	afstand in cm
Vlak	5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65
Paars	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div>
Wit	
Roze	
Geel	
Groen	
Turq.	
Grijs	
Oranje	
Totaal	

H=15,36 cm		
	afstand in cm	
Vlak	5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65	
Paars	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div>	
Wit		
Roze		
Geel		
Groen		1
Turq.		
Grijs		
Oranje		
Totaal		1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

Figuur B8-1: Verplaatsingsafstanden van de steentjes in proevenserie 1

Verplaatsingsafstanden voor de proevenseries 3 en 6:

Serie 3 en Serie 6

$\Delta =$ $T = 1,1$ $u = 0,57-0,58$ $h = 27,5 - 28,15$
--

H=5,5 cm													
	afstand in cm												
Vlak	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Paars													
Wit													
Roze													
Geel													
Groen													
Turq.													
Grijs													
Oranje													
Totaal	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

H=6,54 cm													
	afstand in cm												
Vlak	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Paars													
Wit	1												
Roze													
Geel	2		1										
Groen	1												
Turq.	0												
Grijs						1							
Oranje						0							
Totaal	4	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0

H=7,57 cm														
	afstand in cm													
Vlak	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	
Paars														
Wit														
Roze														
Geel				1						1				
Groen														
Turq.														
Grijs														
Oranje						1								
Totaal	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	

Serie 2

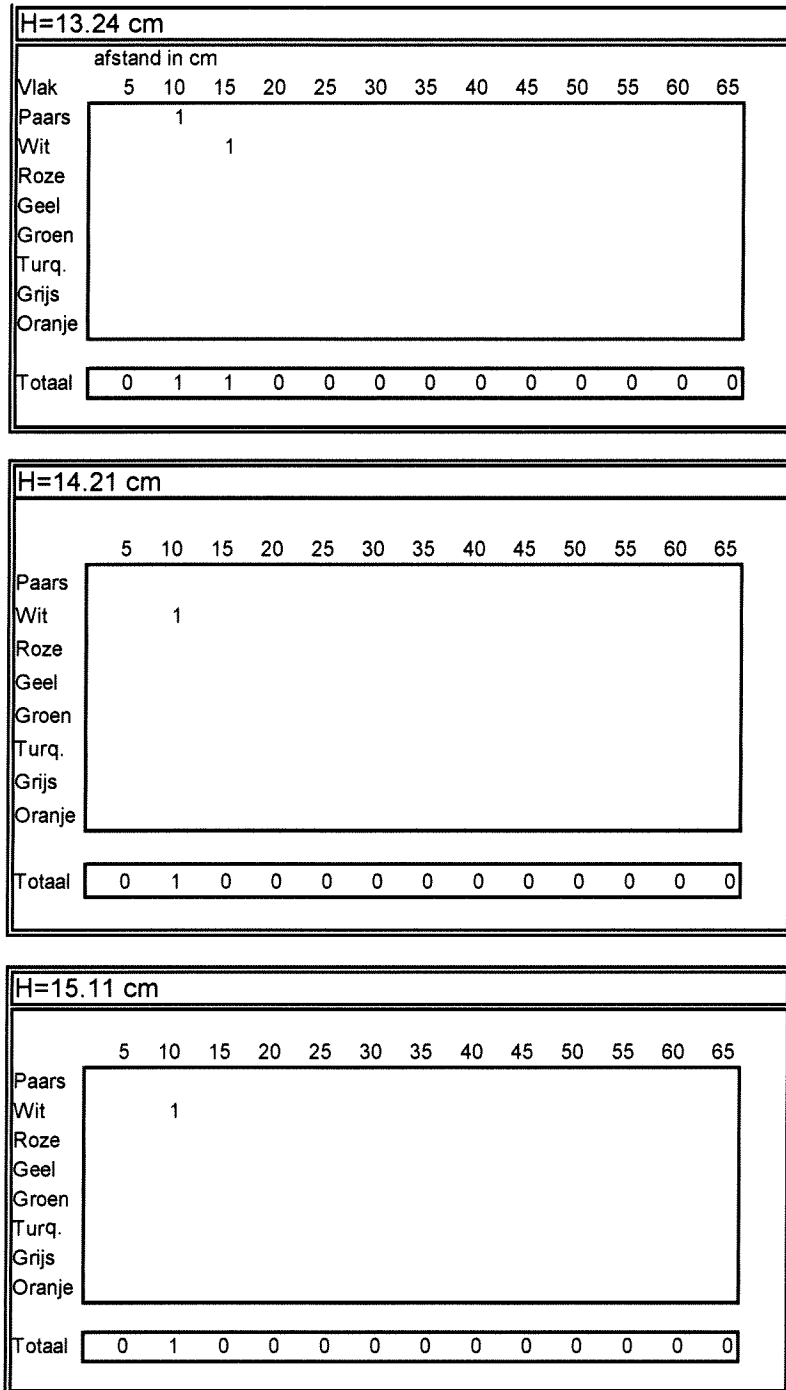
$\Delta = 1,545$ $T = 1,1 \text{ s}$ $u = 0,42 \text{ m/s}$ $h = 30,61 - 31,72$
--

H=0 cm													
	afstand in cm												
Vlak	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Paars													
Wit													
Roze													
Geel													
Groen													
Turq.													
Grijs													
Oranje													
Totaal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

H=10.52 cm																								
	afstand in cm																							
Vlak	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65											
Paars																								
Wit																								
Roze													1											
Geel																								
Groen																								
Turq.																								
Grijs																								
Oranje																								
Totaal	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0											

H=11.16 cm													
	afstand in cm												
Vlak	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Paars													
Wit													
Roze													
Geel													
Groen													
Turq.													
Grijs													
Oranje													1
Totaal	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figuur B8-2: Verplaatsingsafstanden van de steentjes in het eerste deel van proevenserie 2



Figuur B8-3: Verplaatsingsafstanden van de steentjes in het tweede deel van proevenserie 2

Verplaatsingsafstanden van de steentjes in proevenserie 3 en 6:

Serie 3 en Serie 6

$\Delta = 1,545$
$T = 1,1 \text{ s}$
$u = 0,57\text{-}0,58 \text{ m/s}$
$h = 27,5\text{-}28,15 \text{ cm}$

H=5,5 cm	
	afstand in cm
	5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65
Vlak	
Paars	
Wit	
Roze	1
Geel	
Groen	
Turq.	
Grijs	
Oranje	
Totaal	0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

H=6,54 cm	
	afstand in cm
	5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65
Vlak	
Paars	
Wit	1
Roze	
Geel	2 1
Groen	1
Turq.	0
Grijs	1
Oranje	0
Totaal	4 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0

H=7,57 cm	
	afstand in cm
	5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65
Vlak	
Paars	
Wit	
Roze	
Geel	1 1
Groen	
Turq.	
Grijs	
Oranje	1
Totaal	0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 0 0

Figuur B8-4: Verplaatsingsafstanden van de steentjes in het eerste deel van proevenserie 3

Bijlage 8 Verplaatsingsafstanden

H=8,46 cm

		afstand in cm												
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Vlak														
Paars														
Wit		1												
Roze			1											
Geel														
Groen											1			
Turq.														
Grijs		2												
Oranje														
Totaal		3	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

H=9,47 cm

		afstand in cm												
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Vlak														
Paars		1												
Wit								1						
Roze				1	1								1	
Geel														
Groen												1		
Turq.											2			
Grijs								0						
Oranje		1			1		1							
Totaal		2	0	0	1	2	0	2	0	0	2	1	1	0

H=10,6 cm

		afstand in cm												
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Vlak														
Paars														
Wit		1												
Roze						1								
Geel		1												
Groen		1												
Turq.		1												
Grijs		1												
Oranje		1						1						
Totaal		6	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0

H=11,9 cm

		afstand in cm												
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Vlak														
Paars				1										
Wit														
Roze		1												
Geel		1				1						1		
Groen		1												
Turq.		2												
Grijs							1							
Oranje							3							
Totaal		5	0	1	0	1	4	0	0	0	0	1	0	0

Figuur B8-5: Verplaatsingsafstanden van de steentjes in het tweede deel van proevenserie 3

H=13,08 cm													
	afstand in cm												
Vlak	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Paars	1												
Wit	1												
Roze		3										1	
Geel	2												
Groen	3			1									
Turq.	1						1						
Grijs								2					
Oranje	2												
Totaal	10	3	0	1	0	0	1	2	0	0	0	1	0

H=13,23 cm													
	afstand in cm												
Vlak	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Paars	1					1							
Wit	3				1								
Roze		1											
Geel													
Groen	4		1							1			
Turq.	1												
Grijs								1					
Oranje	2												
Totaal	11	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0

H=13,74 cm													
	afstand in cm												
Vlak	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Paars	1				1								
Wit	1		2	1									
Roze					1								
Geel		1	1	1									
Groen								1	1				
Turq.							1						
Grijs	1	1					1						
Oranje							1						
Totaal	3	2	3	2	2	3	0	1	1	0	0	0	0

H=14,21 cm													
	afstand in cm												
Vlak	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Paars						1							
Wit	2		1										2
Roze	1												
Geel	2				1						2		
Groen	4	1											
Turq.	1												
Grijs	1	1											
Oranje	1						1						
Totaal	12	2	1	0	1	1	1	0	0	0	2	0	2

Figuur B8-6: Verplaatsingsafstanden van de steentjes in het derde deel van proevenserie 3 en in proevenserie 6. Serie 6 bestaat uit de twee experimenten met een golfhoogte van 13,23 en 13,74 cm.

H=14,95 cm													
	afstand in cm												
Vlak	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Paars			1					1					
Wit		1				1							
Roze	2												
Geel	1				1								
Groen	2									1			
Turq.	1	2	6										
Grijs	1	2											
Oranje													
Totaal	7	5	7	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0

Figuur B8-7: Verplaatsingsafstanden van de steentjes in het laatste deel van proevenserie 3

Verplaatsingsafstanden in proevenserie 4:

Serie 4

$\Delta = 1,545$
$T = 1,1 \text{ s}$
$u = 0,65-0,66 \text{ m/s}$
$h = 28,21 - 28,66 \text{ cm}$

H=0 cm													
	afstand in cm												
Vlak	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Paars	2												
Wit	1												
Roze	1												
Geel													
Groen													
Turq.													
Grijs													
Oranje													
Totaal	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0

H=4,52 cm													
	afstand in cm												
Vlak	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Paars													
Wit	1												
Roze													
Geel													
Groen	1												
Turq.	1												
Grijs	2	1											
Oranje	1												
Totaal	4	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0

H=5,56 cm													
	afstand in cm												
Vlak	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Paars	1												
Wit	1												
Roze	1												
Geel	1												
Groen													
Turq.	1												
Grijs	1												
Oranje	1	0											
Totaal	3	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1

Figuur B8-8: Verplaatsingsafstanden van de steentjes in het eerste deel van proevenserie 4

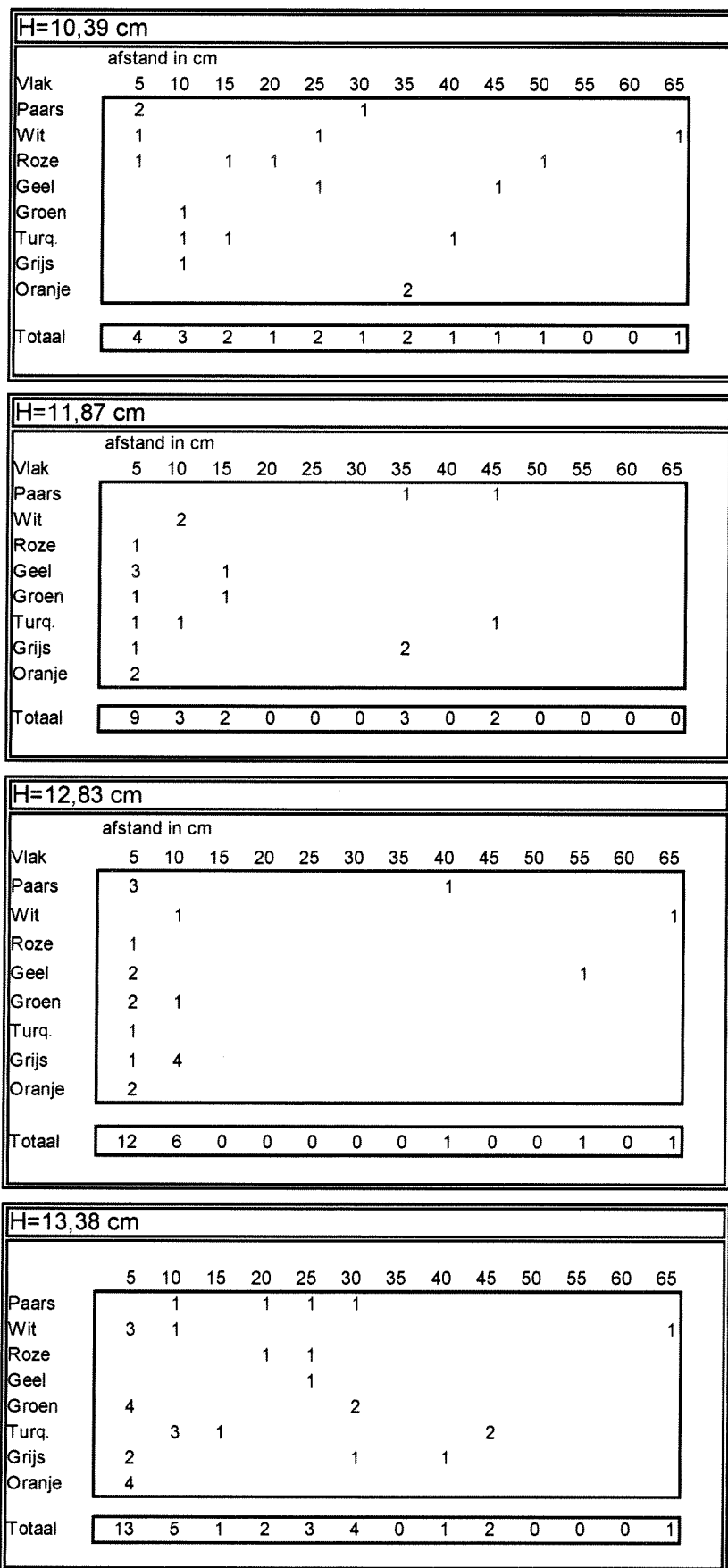
H=6,46 cm													
	afstand in cm												
Vlak	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Paars		1		2	1								
Wit	2	1				1							
Roze			1	1								1	
Geel													
Groen				1									
Turq.	3					1							
Grijs	1	2											
Oranje	1												
Totaal	7	4	1	4	1	2	0	0	0	0	1	0	0

H=7,45 cm													
	afstand in cm												
Vlak	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Paars			1										
Wit							1						
Roze	1					1							
Geel	1		2										
Groen		1	1							1			
Turq.	1												
Grijs	1							1					
Oranje													
Totaal	4	1	4	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0

H=8,49 cm													
	afstand in cm												
Vlak	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Paars						1							
Wit	1												
Roze												1	1
Geel			1	1									
Groen		3											
Turq.	2												
Grijs	1							1					
Oranje	1												
Totaal	5	3	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1

H=9,76 cm													
	afstand in cm												
Vlak	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Paars													
Wit	1												
Roze		1										1	
Geel		1	1										
Groen	2												
Turq.		2	1										
Grijs	1						0						
Oranje	2						1						
Totaal	6	4	2	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0

Figuur B8-9: Verplaatsingsafstanden van de steentjes in het tweede deel van proevenserie 4

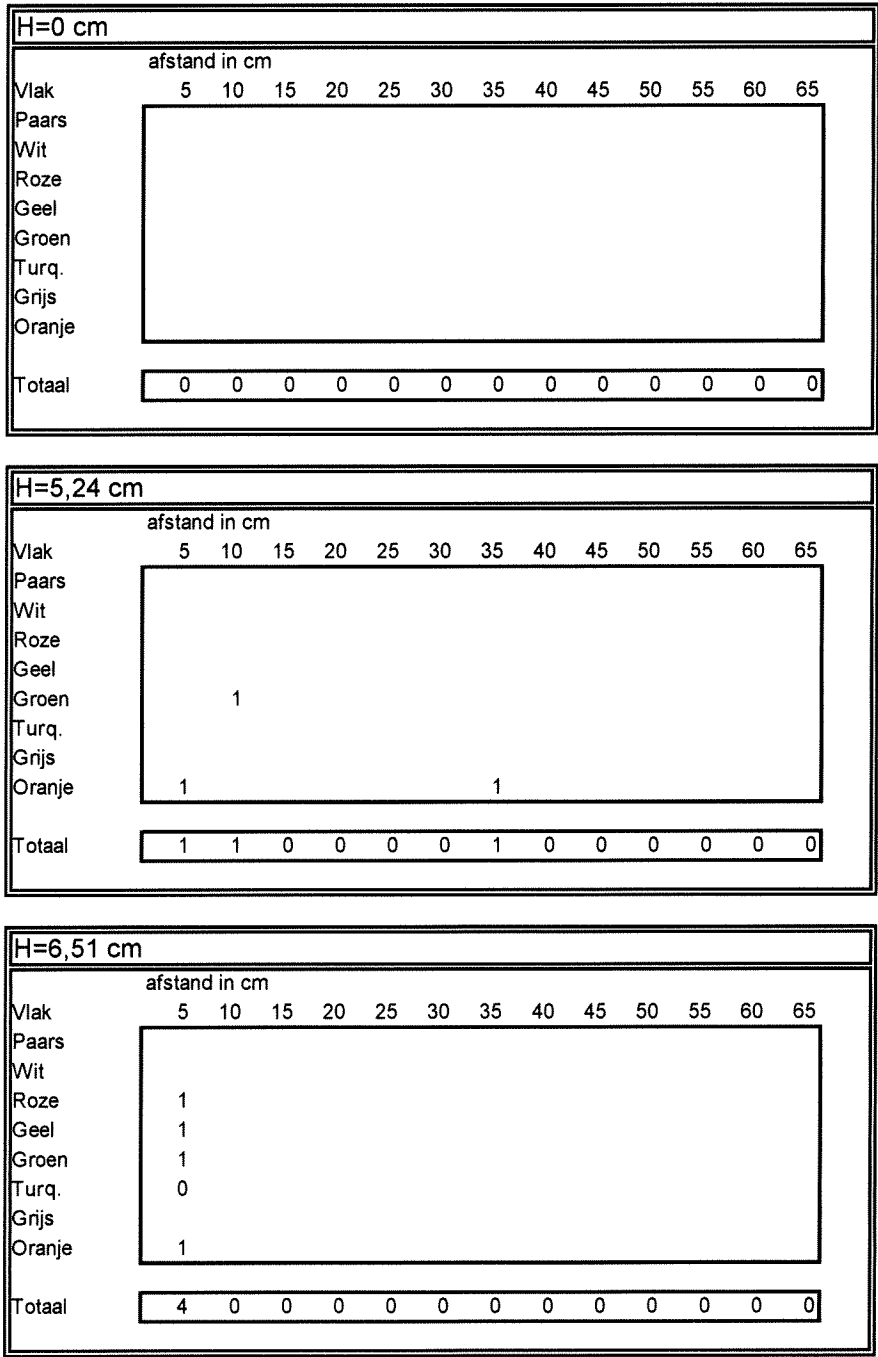


Figuur B8-10: Verplaatsingsafstanden van de steentjes in het derde deel van proevenserie 4

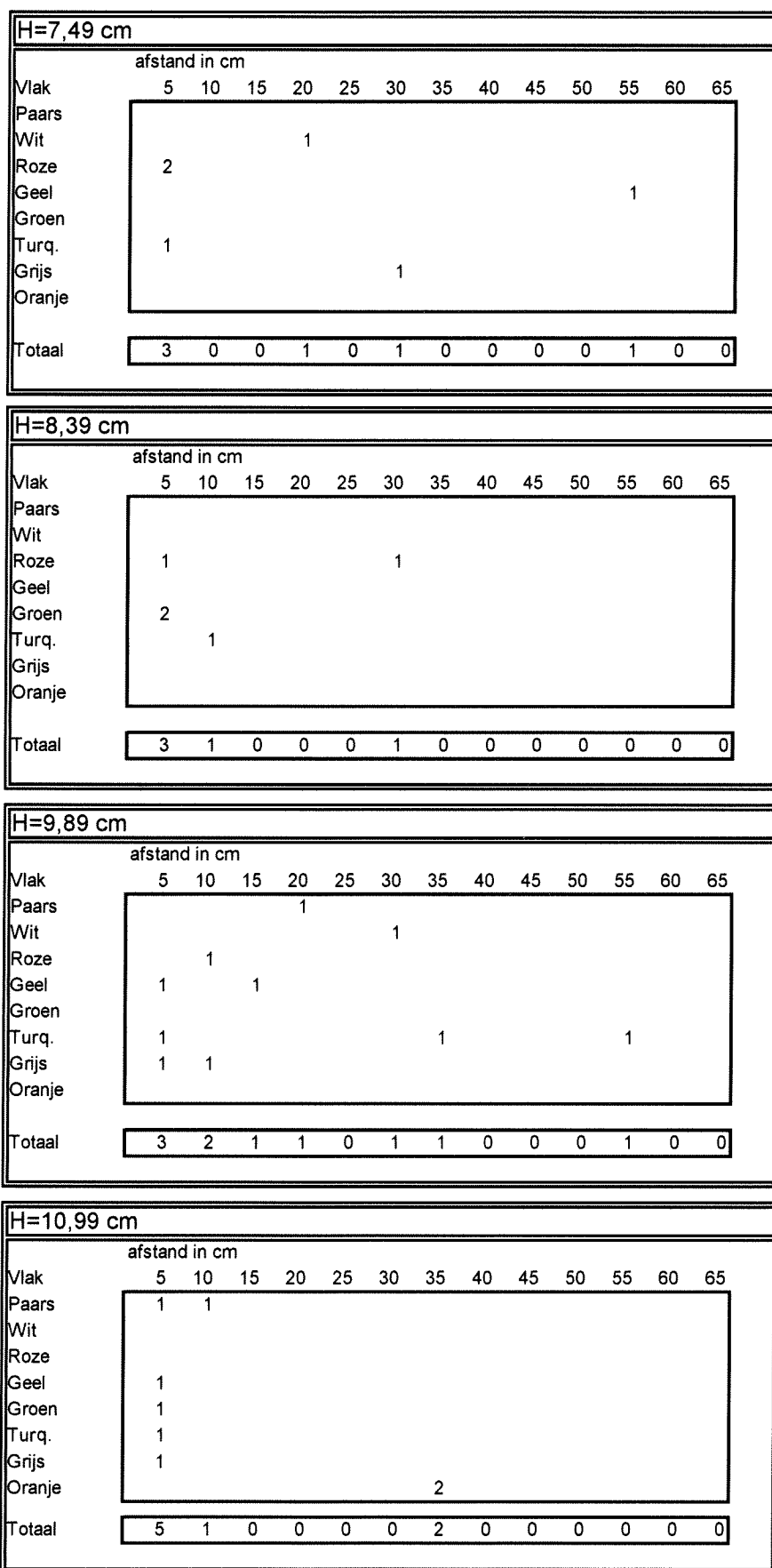
Verplaatsingen van de steentjes uit proevenserie 5:

Serie 5

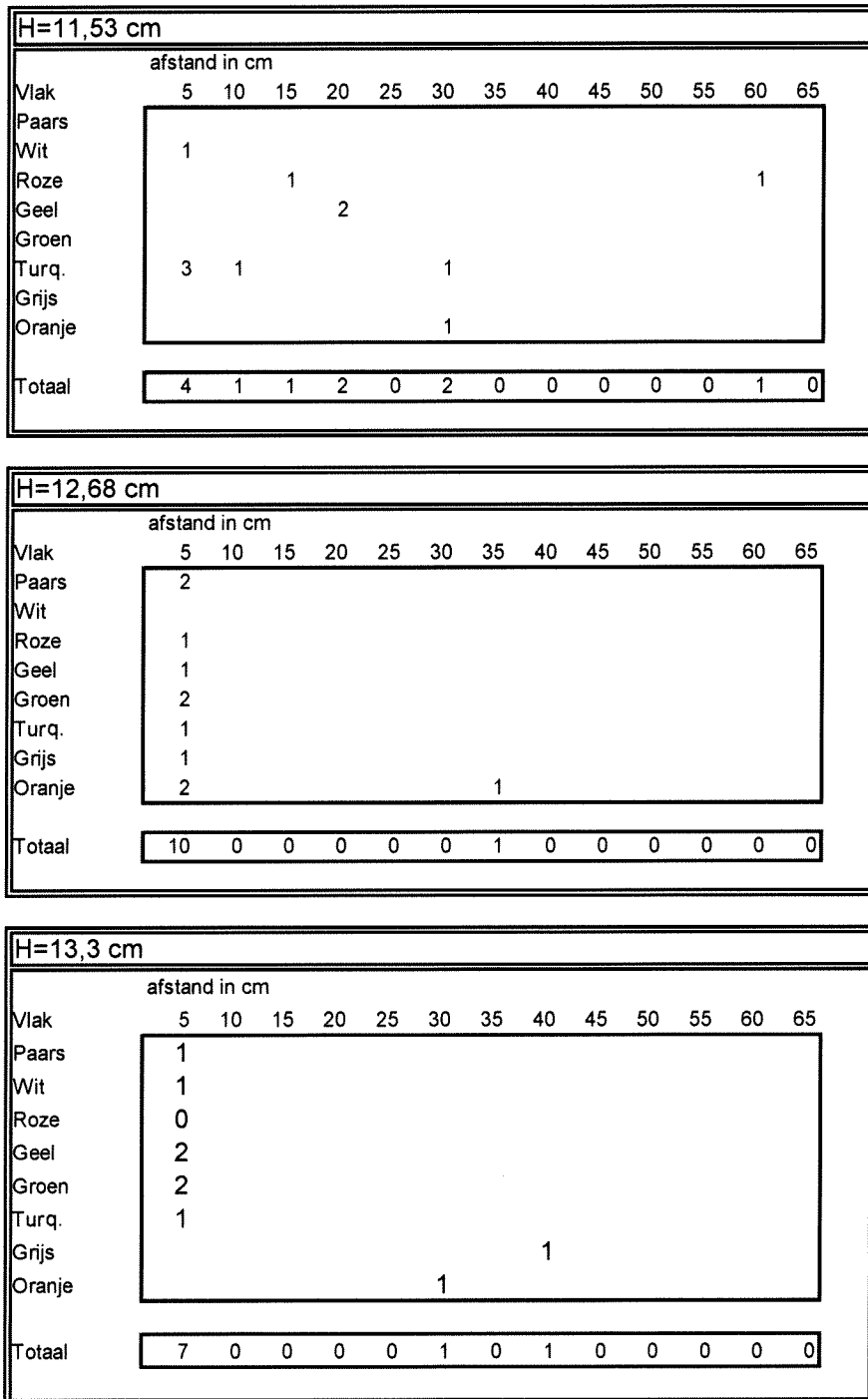
$\Delta = 1,545$ $T = 1 \text{ s}$ $u = 0,54-0,57 \text{ m/s}$ $h = 27,78 - 29,58 \text{ cm}$
--



Figuur B8-11: Verplaatsingsafstanden van de steentjes in het eerste deel van proevenserie 5



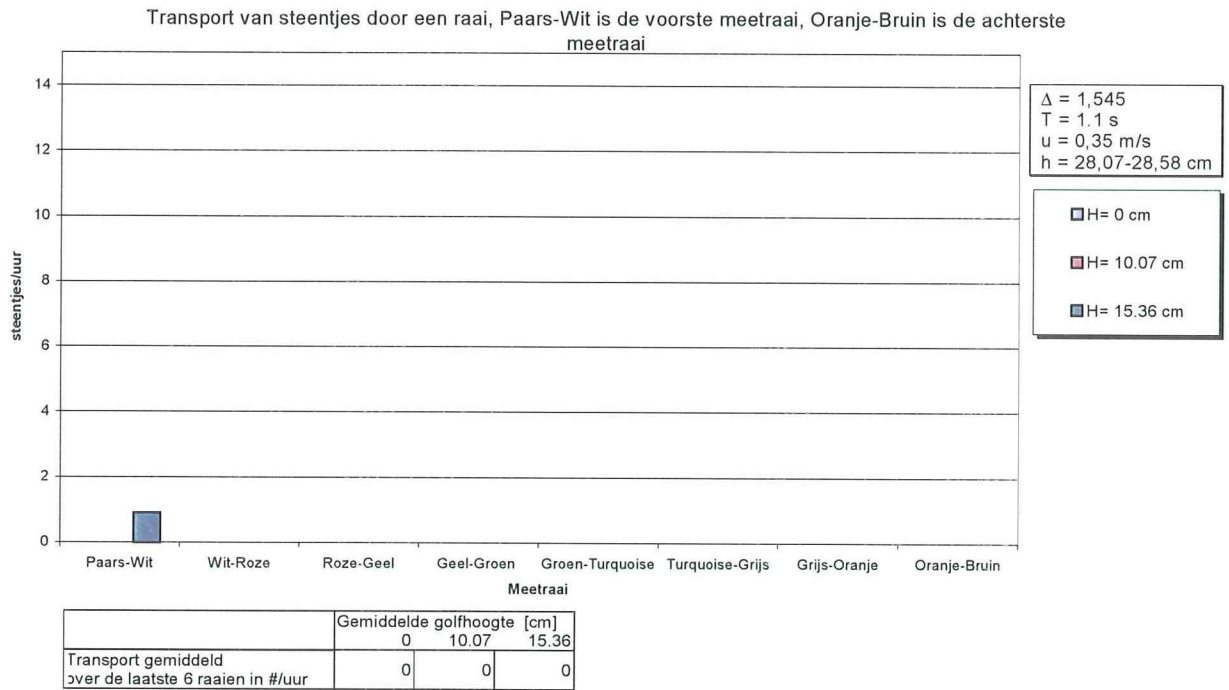
Figuur B8-12: Verplaatsingsafstanden van de steentjes in het tweede deel van proevenserie 5



Figuur B8-13: Verplaatsingsafstanden van de steentjes in het derde deel van proevenserie 5

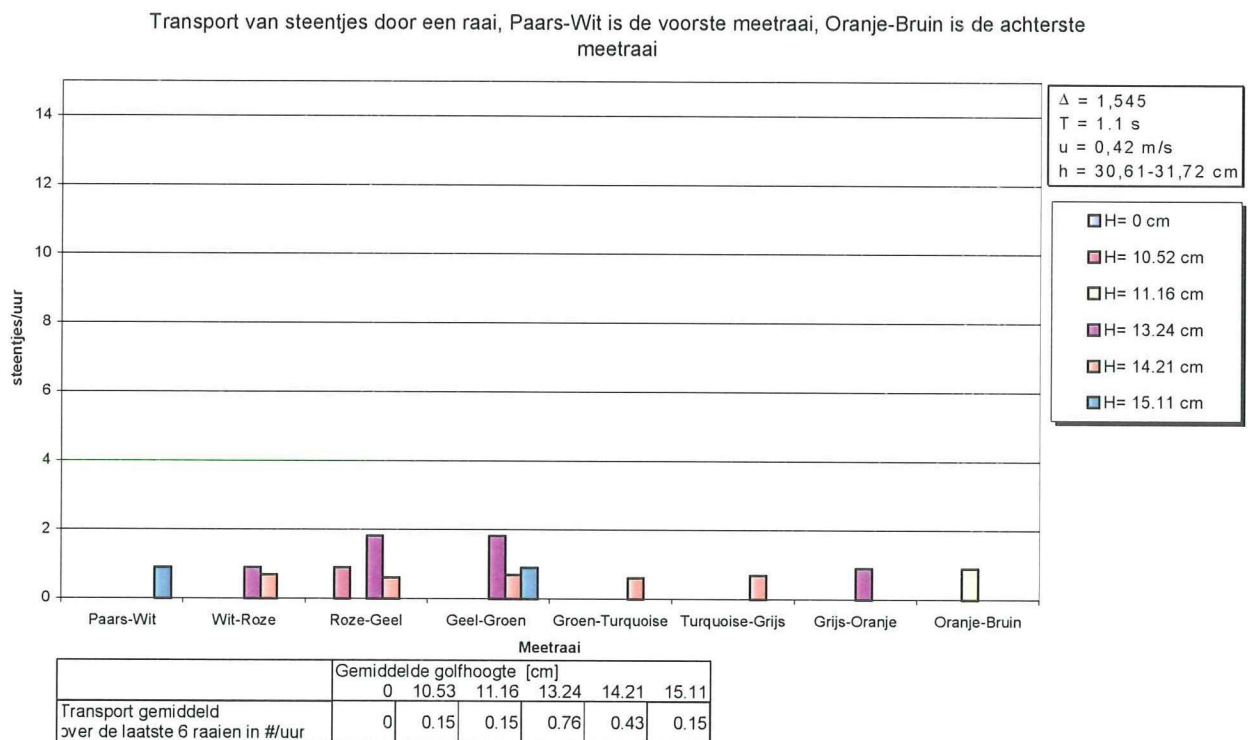
Bijlage 9 Transportgrafieken

Serie 1



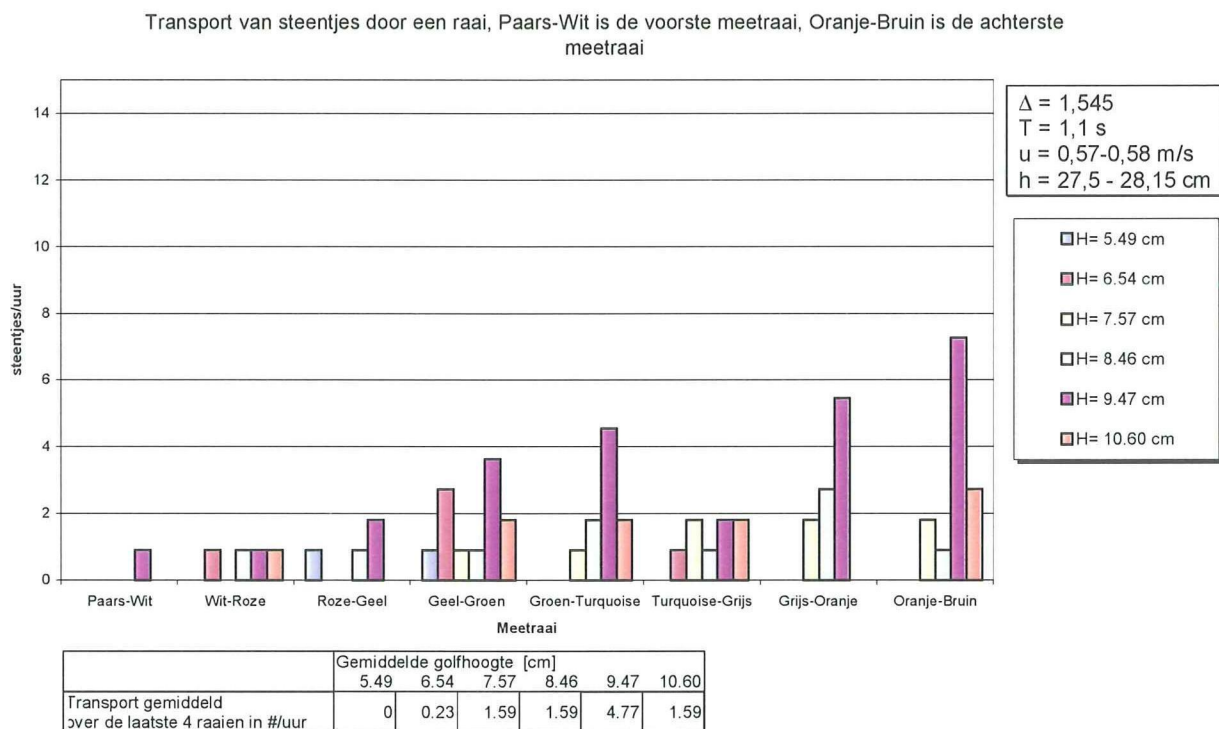
Figuur B9-1: Aantal verplaatste steentjes door een raai (aangegeven als kleurscheiding) voor proevenserie 1

Serie 2

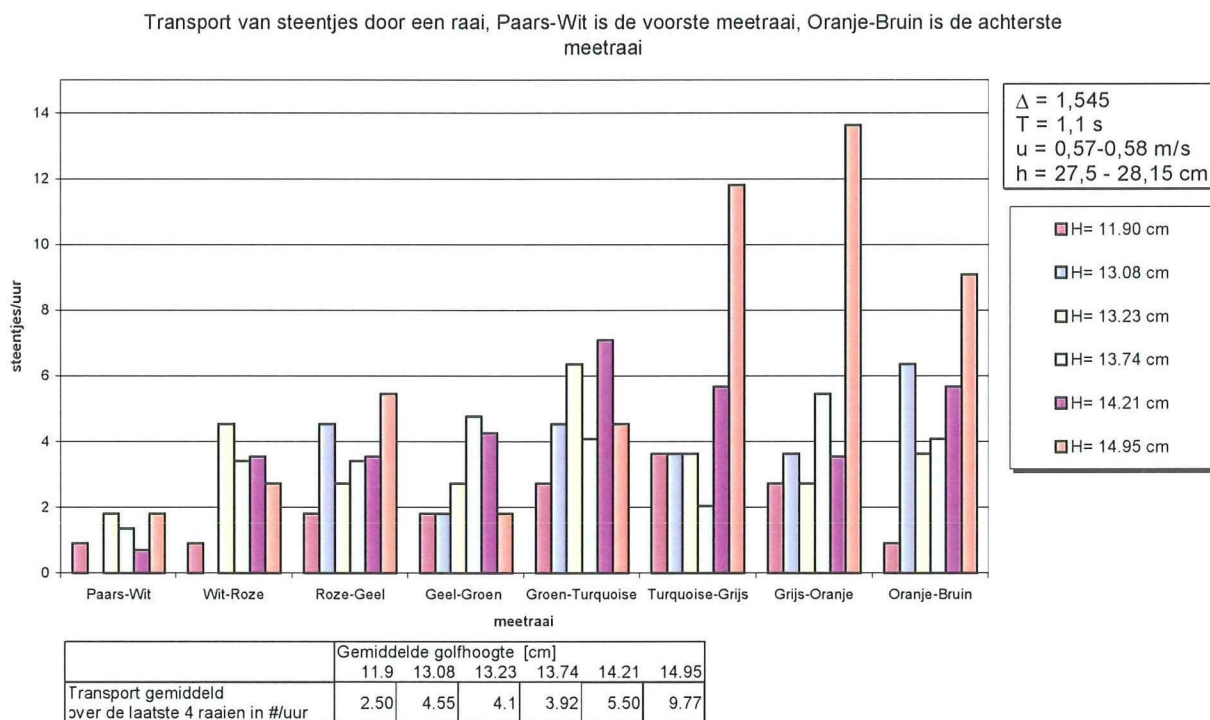


Figuur B9-2: Aantal verplaatste steentjes door een raai (aangegeven als kleurscheiding) voor proevenserie 2

Serie 3 en Serie 6



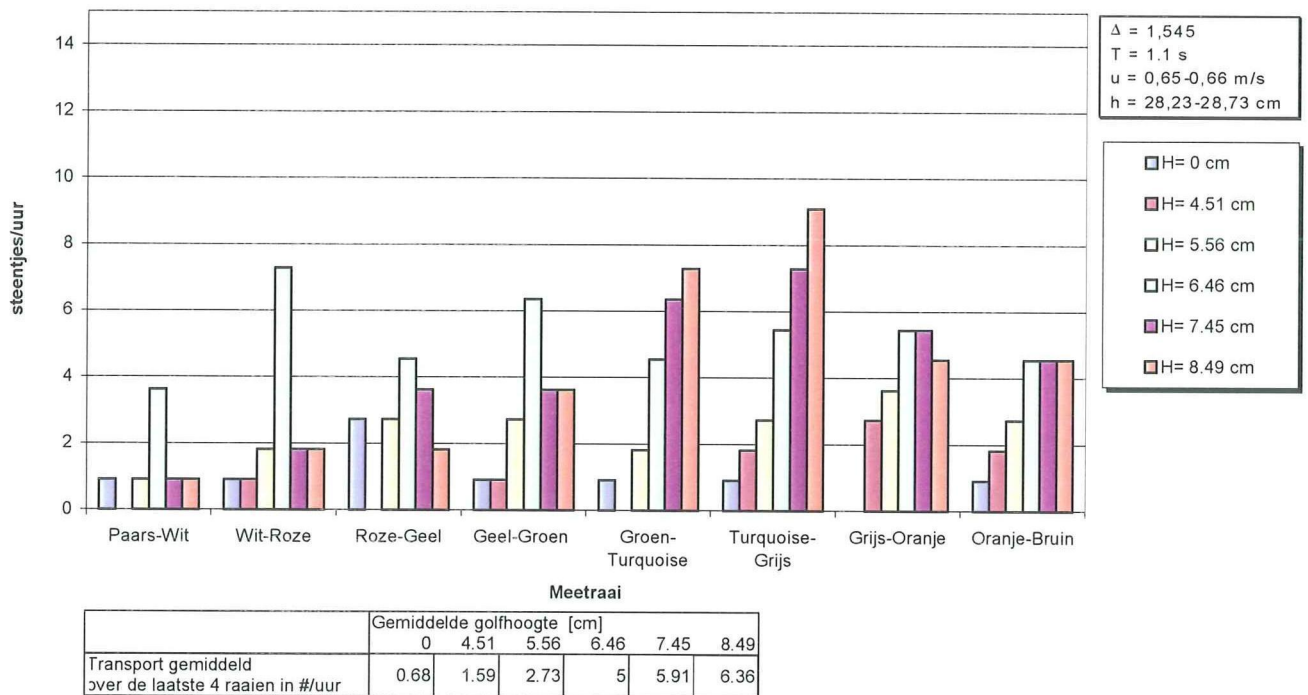
Figuur B9-3: Aantal verplaatste steentjes door een raai (aangegeven als kleurscheiding) voor het eerste deel van proevenserie 3



Figuur B9-4: Aantal verplaatste steentjes door een raai (aangegeven als kleurscheiding) voor het tweede deel van proevenserie 3. De proevenserie 6 bestaat uit de experimenten met een golfhoogte van 13,23 cm en 13,74 cm

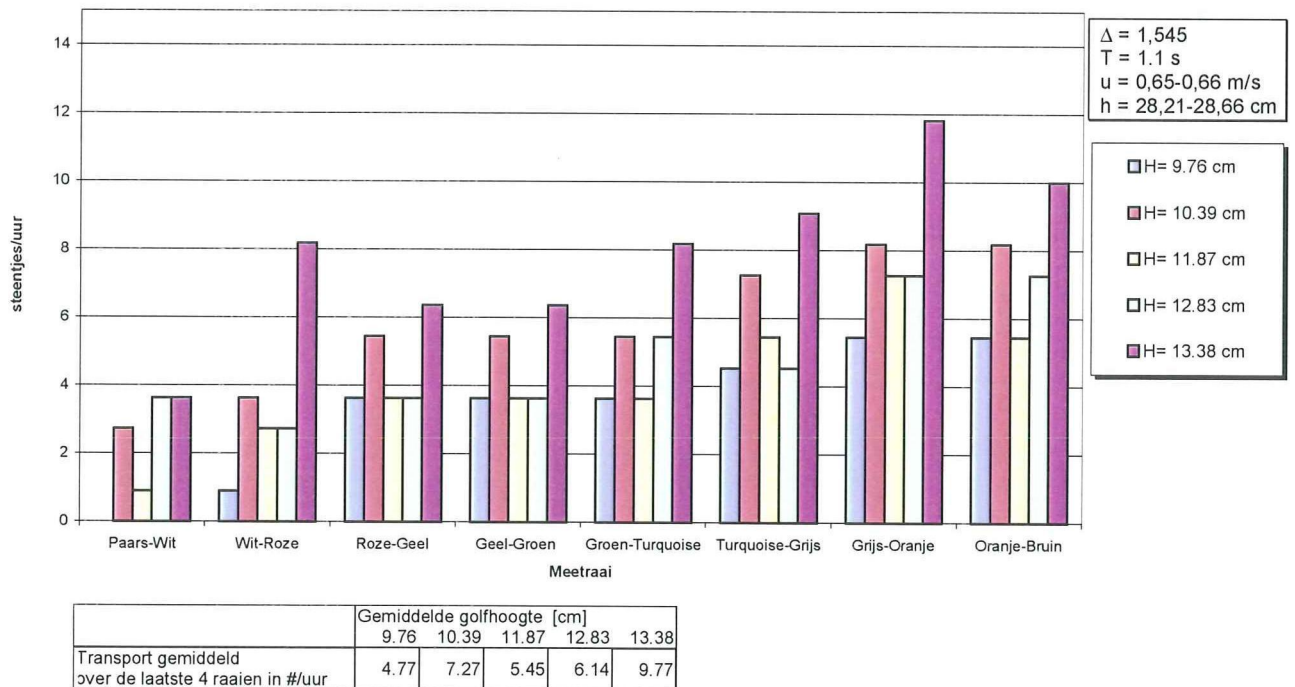
Serie 4

Transport van steentjes door een raai, Paars-Wit is de voorste meetraai, Oranje-Bruin is de achterste meetraai



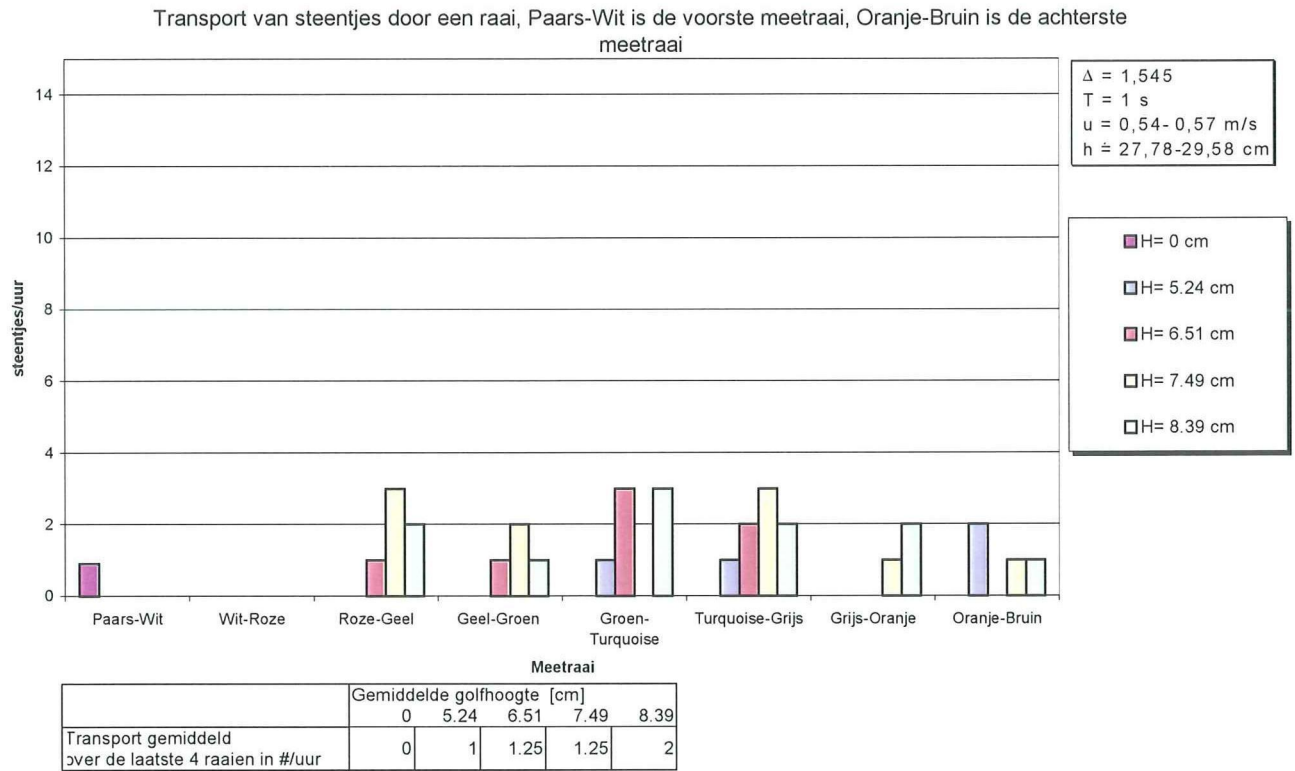
Figuur B9-5: Aantal verplaatste steentjes door een raai (aangegeven als kleurscheiding) voor het eerste deel van proevenserie 4.

Transport van steentjes door een raai, Paars-Wit is de voorste meetraai, Oranje-Bruin is de achterste meetraai

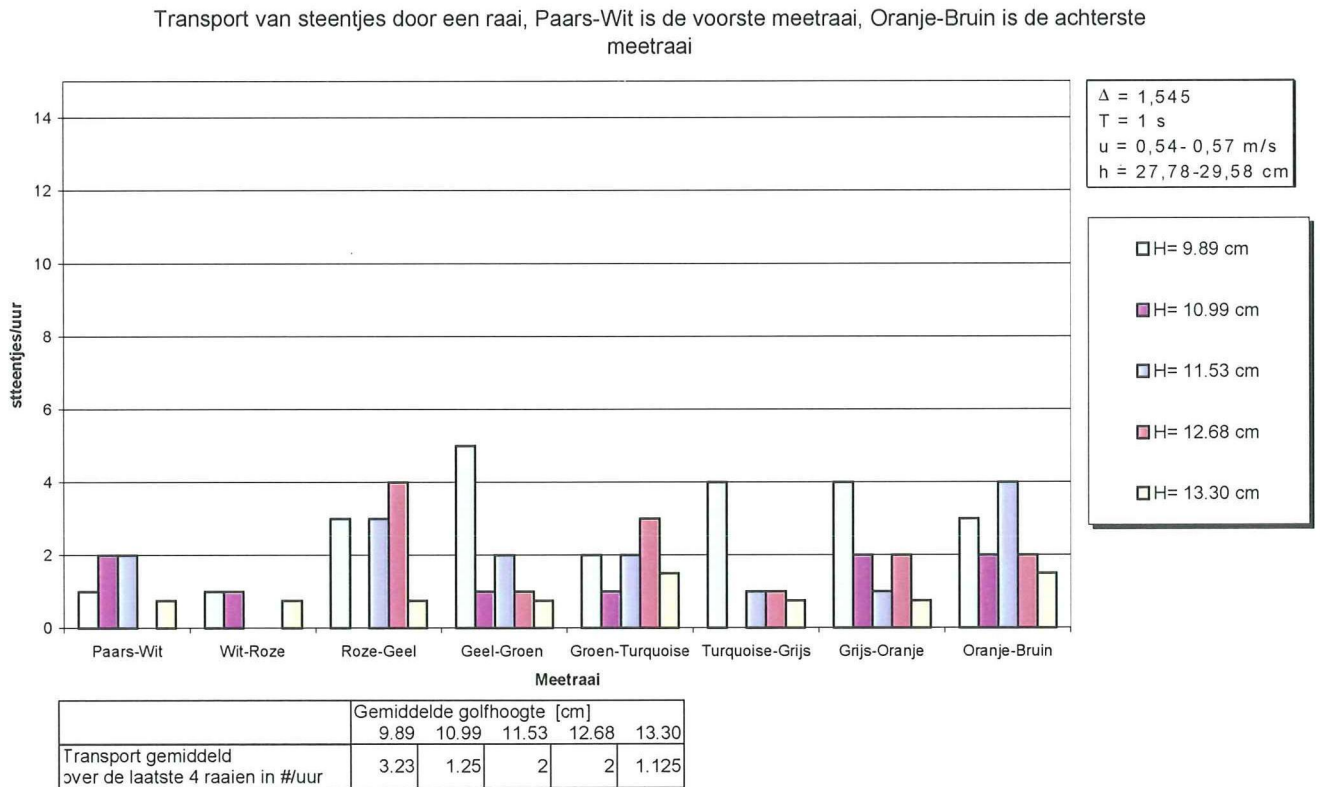


Figuur B9-6: Aantal verplaatste steentjes door een raai (aangegeven als kleurscheiding) voor het tweede deel van proevenserie 4.

Serie 5



Figuur B9-7: Aantal verplaatste steentjes door een raai (aangegeven als kleurscheiding) voor het eerste deel van proevenserie 5.



Figuur B9-8: Aantal verplaatste steentjes door een raai (aangegeven als kleurscheiding) voor het tweede deel van proevenserie 5.