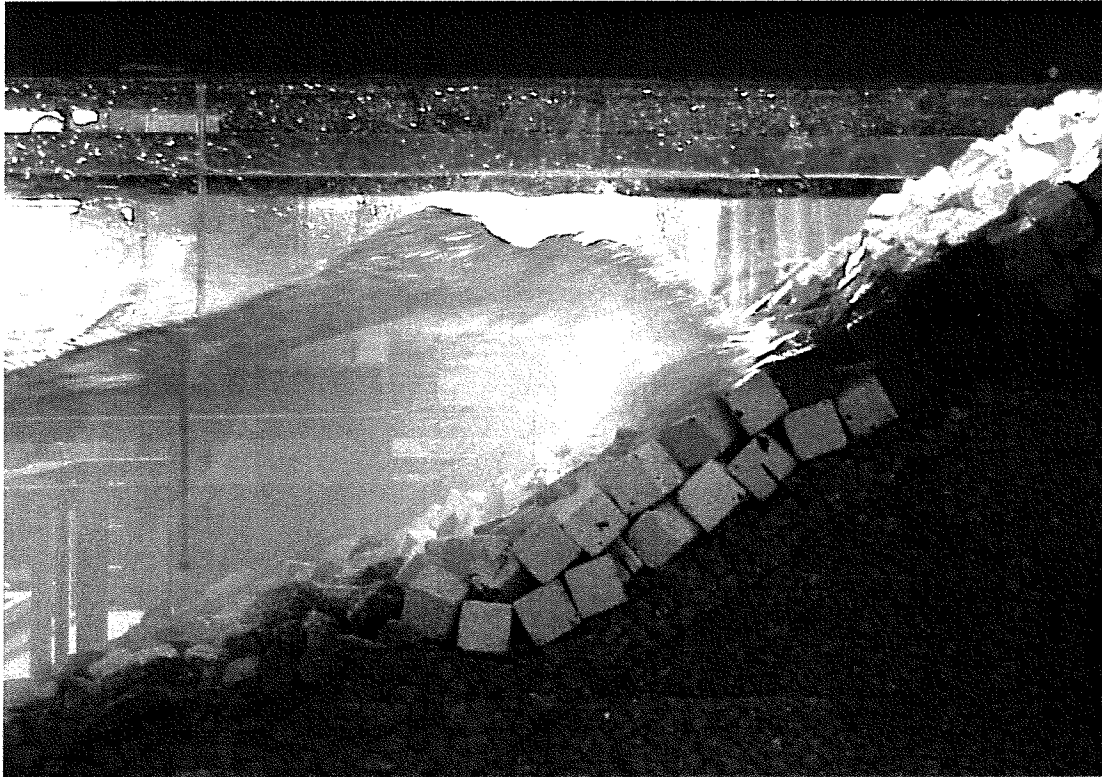
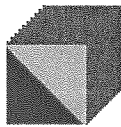


# Invloed van plaatsingsdichtheid op de stabiliteit van 'armour layers' van golfbrekers



A.F.M. van den Bosch  
9107168  
juni 2001



**Royal  
Boskalis Westminster nv**  
*International Dredging Contractors*

  
**TU Delft**

Delft University of Technology  
Faculteit Civiele Techniek en  
Geowetenschappen  
Afdeling Waterbouwkunde en Geotechniek  
Sectie Kustwaterbouwkunde en Offshore

## Voorwoord

Dit rapport wordt gepresenteerd als het eindrapport voor het halen van de ingenieurstitel aan de Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, sectie Waterbouwkunde en offshore van de Technische Universiteit Delft.

Het doel van dit onderzoek is het verkrijgen van inzicht in de invloed van de plaatsingsdichtheid van 'armour layers' bij golfbrekers. Voor dit doel zijn drie verschillende elementen onderzocht: kubussen in een dubbele 'armour layer', en tetrapoden en breuksteen in een enkele 'armour layer'. Het onderzoek is verricht in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen.

Ik ben veel dank verschuldigd aan Royal Boskalis Westminster NV voor de begeleiding en financiële ondersteuning tijdens het onderzoek en het schrijven van dit rapport. Delft Hydraulics stelde het materiaal voor de constructie van de golfbreker beschikbaar. Daarnaast wil ik alle medewerkers van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica bedanken voor de ondersteuning tijdens het onderzoek.

Tenslotte ben ik veel dank aan de leden van mijn afstudeercommissie verschuldigd voor hun steun en begeleiding:

- *Prof. ir. K. d'Angremond*      *Technische Universiteit Delft*
- *dr. ir. H.L. Fontijn*        *Technische Universiteit Delft*
- *ir. T. Zitman*                *Technische Universiteit Delft*
- *ir. J. Olthof*                 *Royal Boskalis Westminster NV*
- *dr. ir. M. van Gent*         *Delft Hydraulics*

Alwin van den Bosch  
Delft, juni 2001



## Samenvatting

Door de jaren heen is er veel onderzoek gedaan naar golfbrekers en de stabiliteit van de 'armour layer'. Hieruit is gebleken dat de plaatsingsdichtheid van de 'armour layer' elementen een belangrijke parameter is. De doelstelling van dit onderzoek is om inzicht te verkrijgen in de invloed van de plaatsingsdichtheid op de stabiliteit van kubussen in een dubbele 'armour layer' en tetrapoden en breuksteen in een enkele 'armour layer' van een 'rubble mound' golfbreker. Er is in dit onderzoek gekozen voor het onderzoeken van deze specifieke elementen, omdat deze het meeste worden toegepast. Tevens wordt hiermee aangesloten op voorgaande onderzoeken. Omdat er al relatief veel onderzoek is gedaan naar kubussen in een enkele 'armour layer' is er voor gekozen om voor kubussen een dubbele 'armour layer' toe te passen.

De experimenten werden uitgevoerd in de Sedimenttransportgoot in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit Delft. In deze golfgoot werd een schaalmodel van een golfbreker geconstrueerd. De plaatsingsdichtheid werd bij kubussen en tetrapoden gevarieerd door het wijzigen van de volumieke porositeit van de 'armour layer' en bij breuksteen door het wijzigen van de laagdikte. Bij breuksteen werd bovendien de taludhelling gevarieerd en de gradering. Na het aanbrenen van de 'armour layer' werd een onregelmatig golfveld van 1000 golven op de golfbreker losgelaten met een bepaalde significante golfhoogte. Hierbij werd gebruik gemaakt van een JONSWAP-spectrum. De significante golfhoogte werd telkens opgevoerd totdat de constructie bezweek of de golfmachine de maximale op te wekken golfhoogte had bereikt. In tabel 0.1 zijn de uitgevoerde experimenten weergegeven. In deze tabel staan A en B voor twee bijzondere plaatsingmethoden bij breuksteen naast de gebruikelijke willekeurige plaatsing. Bij methode A werden de elementen rechtop geplaatst en bij methode B werden de elementen plat geplaatst. Onder normale plaatsing wordt verstaan het storten van het breuksteen zonder verder ingrijpen in de ligging van de elementen. Getracht werd een zo getrouw mogelijke imitatie te krijgen van de werkelijkheid.

Tabel 0.1: Uitgevoerde experimenten

Element	Volumieke porositeit $n_v[-]$	talud
Kubus	0,4; 0,3; 0,25	1;1,5
Tetrapode	0,4; 0,3; 0,25	1:1,5
Breuksteen nauwe gradering	0,3; A ;B	1:1,5; 1:2; 1:3
Breuksteen wijde gradering	0,3	1:2; 1:3

De resultaten van de experimenten zijn in tabel 0.2, 0.3 en 0.4 weergegeven.

Tabel 0.2: Resultaten van de experimenten voor kubussen

Volumieke porositeit $n_v[-]$	'Start-van-schade'		Bezwijken		Opmerking
	$H_s/(\Delta D_n)[-]$	$N_{od}[-]$	$H_s/(\Delta D_n)[-]$	$N_{od}[-]$	
0,4	2,3	0,055	-	-	Zonder versterkte teen
0,3	2,41	0,055	-	-	Zonder versterkte teen
0,4	2,47	0,055	3,3	2	Versterkte teen
0,3	2,98-3,07	0,055	-	-	Versterkte teen
0,25	2,32-3,05	0,055	-	-	Versterkte teen

In tabel 0.2 zijn voor de meeste experimenten geen waarden voor bezwijken gevonden, omdat de capaciteit van de golfmachine bereikt was. In de laatste kolom is aangegeven of er sprake was van een versterkte teen. De eerste experimenten werden namelijk gedaan met een teen gemaakt van hetzelfde materiaal als het filtermateriaal. Deze teen bleek te zwak en leidde tot het bezwijken van de constructie als gevolg van het bezwijken van de teen. Om dit te voorkomen is de teen vervolgens versterkt met breuksteen en zijn alle experimenten met versterkte teen uitgevoerd.

Tabel 0.3: Resultaten van de experimenten voor tetrapoden

Volumieke porositeit $n_v$ [-]	'Start-van-schade'		Bezwijken	
	$H_s/(\Delta D_n)$ [-]	$N_{od}$ [-]	$H_s/(\Delta D_n)$ [-]	$N_{od}$ [-]
0,4	2,00	0,054	-	-
0,3	2,26	0,054	2,4	0,22
0,25	2,57	0,054	2,74-2,86	0,28-0,61

Tabel 0.4: Resultaten van de experimenten voor breuksteen

Type plaatsing	Talud	'Start-van-schade'		Bezwijken	
		$H_s/(\Delta D_n)$ [-]	$N_{od}$ [-]	$H_s/(\Delta D_n)$ [-]	$N_{od}$ [-]
Normaal	1:1,5	1,57	0,045	1,97	4,91
A	1:1,5	1,47	0,045	2,54	4,59
B	1:1,5	1,33	0,045	1,66	2,88
Normaal	1:2	1,51-1,67	0,045	1,83-1,97	1,31-3,87
A	1:2	1,64	0,045	2,66	5,31
B	1:2	1,46	0,045	1,66	1,76
Wijde gradering	1:2	1,10	0,045	1,84	5,85
Normaal	1:3	1,73-2,02	0,045	2,37-2,73	2,84-6,66
A	1:3	2,24	0,045	2,85	7,65
B	1:3	1,75	0,045	2,37	2,43
Wijde gradering	1:3	1,56	0,045	2,37	3,47

Kenmerkend faalmechanisme bij alle elementen is het 'rocken' van een element, dat uiteindelijk leidt tot het wegspoelen ervan. Onder 'rocken' wordt verstaan het bewegen van een element zonder van positie te veranderen. Dit verschijnsel vindt plaats rond de waterlijn. De toegepaste plaatsingsdichtheden bij kubussen blijken alle stabielere constructies op te leveren dan bij een in de praktijk toegepaste plaatsingsdichtheid. Hieronder wordt de plaatsingsdichtheid verstaan, welke in prototype golfbrekers wordt toegepast. Hierbij hoort een  $n_v$  van 0,5. Het blijkt echter dat bij een toename van de plaatsingsdichtheid de 'armour layer' zich steeds meer gaat gedragen als een zetsteenbekleding. De stabiliteit neemt als gevolg hiervan af bij toenemende plaatsingsdichtheid. Typerende faalmechanismen van een bekleding als afschuiven en oplichten beginnen dan op te treden in het schaalmodel. Berekeningen lijken aan te tonen dat de faalmechanismen in het model overeenkomen met de werkelijkheid.

Tetrapoden leveren bij verhoging van de plaatsingsdichtheid steeds stabielere constructies op. Desondanks lijken ze ongeschikt voor gebruik in een enkele 'armour layer', omdat door de vorm van de elementen het filter al aangetast kan worden zonder dat er elementen zijn verdwenen. Als gevolg van de haakweerstand is er een rotatie van een element nodig om dit te verwijderen. Met behulp van een rekenmethode is de hiervoor benodigde belasting versus de sterkte bepaald. Het blijkt

dat de stabiliteit toeneemt bij toename van de plaatsingsdichtheid. Bovendien volgt uit de rekenmethode dat de elementen zich in de werkelijkheid op dezelfde wijze zullen gedragen als in het schaalmodel. De laagste plaatsingsdichtheid wordt gekenmerkt door een progressief bezwijkgedrag.

Bij breuksteen blijkt plaatsingsmethode A de meest stabiele te zijn als gevolg van een groot zelfherstellend vermogen. Methode B blijkt in de meeste gevallen het minst stabiel vanwege een volledig gebrek hieraan. Bij een talud van 1:3 is de  $N_{od}$  in sommige gevallen groter dan bij een normale plaatsing. Dit komt waarschijnlijk door het gebrek aan herhalingsproeven. Herhalingen zullen logischerwijs leiden tot een bandbreedte voor bezwijken voor plaatsingsmethode B, die lager ligt dan de bandbreedte voor de normale plaatsing. Verflauwing van het talud leidt tot een toename van de stabiliteit. De meeste schade veroorzakende 'collapsing' golven blijken dan minder vaak op te treden. Kenmerkend voor breuksteen is de opstuwing van elementen onder de waterlijn als gevolg van 'collapsing' golven met als resultaat een ruimere pakking rond de waterlijn. Breuksteen met een wijde gradering blijkt minder stabiel dan breuksteen met een nauwe gradering. De gevonden waarden voor bezwijken zijn gelijk aan de laagste waarden uit de bandbreedte voor bezwijken in het geval van een nauwe gradering. Het ligt voor de hand om te veronderstellen dat bij uitvoering van herhalingsproeven dit voor een wijde gradering een bandbreedte voor bezwijken oplevert, die lager is dan in het geval van een normale plaatsing. Breuksteen blijkt minder stabiel dan kubussen en tetrapoden. In geval van een talud van 1:1.5 lijkt het ongeschikt voor gebruik, zelfs in het geval van plaatsing volgens methode A. Bij flauwere taluds levert breuksteen wel voldoende stabiele constructies. Plaatsing volgens methode B blijkt in alle gevallen ongeschikt. Deze resultaten komen niet overeen met de resultaten van het onderzoek van Hald, Tørum en Holm-Karlsen (Hald e.a. 1998).

De bestaande schadecriteria houden niet voldoende rekening met de plaatsingsdichtheid. Gekozen is om een nieuw schadecriterium te ontwikkelen dat rekening houdt met een in grootte variërend aangevallen gebied, plaatsingsdichtheid en verschillende faalmechanismen.

## Symbolenlijst

$a_a$	lineaire weerstandscoëfficiënt van de 'armour layer' [s/m]
$a_f$	lineaire weerstandscoëfficiënt van het filter [s/m]
$A$	oppervlakte [ $m^2$ ]
$b_a$	kwadratische weerstandscoëfficiënt van de 'armour layer' [ $s^2/m^2$ ]
$b_f$	kwadratische weerstandscoëfficiënt van het filter [ $s^2/m^2$ ]
$B_{kruin}$	breedte van de kruin [m]
$c$	golfsnelheid [m/s]
$C_1$	volumecoëfficiënt van een element [-]
$C_2$	oppervlaktecoëfficiënt voor het slepen van een element [-]
$C_3$	oppervlaktecoëfficiënt voor het oplichten van een element [-]
$C_D$	drag-coëfficiënt [-]
$C_L$	lift-coëfficiënt [-]
$C_M$	$C_m + 1$ = massastraagheidscoëfficiënt [-]
$C_m$	toegevoegde-massacoëfficiënt [-]
$d_a$	laagdikte 'armour layer' [m]
$d_f$	laagdikte filter [m]
$D_f$	diameter van element uit de filterlaag [m]
$D_{f50}$	gemiddelde diameter filterelement [m]
$D_{n50}$	nominale diameter [m]
$D_p$	poriëngrootte [m]
$D_{15}$	diameter waarvoor geldt dat 15% van de elementen een kleinere diameter heeft [m]
$D_{85}$	diameter waarvoor geldt dat 85% van de elementen een kleinere diameter heeft [m]
$e_1$	normale component van de afstand van het gewichtscentrum G van de tetrapode tot de bovenkant van de 'armour layer' (laagdikte) bij contactpunt A [m]
$e_2$	normale component van de afstand tussen het contactpunt A van de tetrapode met de naastgelegen tetrapode en de bovenkant van de 'armour layer' (laagdikte) [m]
$E(f)$	frequentiespectrum [ $m^2s$ ]
$f$	frequentie [Hz]
$f_b$	wrijvingscoëfficiënt [-]
$f_p$	piekfrequentie [Hz]
$F_a$	aandrijvende kracht ten gevolge van het eigen gewicht [N]
$F_s$	schuifkracht [N]
$F_w$	wrijvingskracht [N]
$g$	zwaartekrachtsversnelling [ $m/s^2$ ]
$h$	waterdiepte [m]
$h_0$	stilwaterdiepte bij golfschot [m]
$h_c$	stilwaterdiepte bij de teen van de constructie [m]
$h_{kruin}$	hoogte van de kruin vanaf de bodem [m]
$H$	golfhoogte [m]
$H_s$	significante golfhoogte [m]
$H_{sio}$	significante, inkomende golfhoogte op diep water [m]
$H_{so}$	significante golfhoogte op diep water [m]
$H_{2\%}$	golfhoogte die door 2% van de golven wordt overschreden [m]
$i$	verhang [-]

$i_a$	=	verhang over de 'armour layer' [-]
$k$	=	1) excentriciteit [-] 2) golfgetal [ $m^{-1}$ ]
$k_a$	=	permeabiliteit van de 'armour layer' [m/s]
$k_f$	=	permeabiliteit van de filterlaag [m/s]
$k_\Delta$	=	laagdiktecoëfficiënt [-]
$K_D$	=	coëfficiënt van Hudson [-]
$K_s$	=	shoaling-coëfficiënt [-]
$K-C$	=	Keulegan Carpenter getal [-]
$l$	=	1) parallelle component van de afstand van het gewichtscentrum G van de tetrapode tot de bovenkant van de 'armour layer' (laagdikte) bij contactpunt A [m] 2) verhouding tussen zettingsoppervlak en spleetoppervlak [-]
$L$	=	1) golflengte [m] 2) karakteristieke lengte, waarover snelheidsverschil optreedt [m]
$M_{bulk}$	=	massa bulk [kg]
$M_{50,a}$	=	gemiddelde massa van een element uit de 'armour layer' [kg]
$M_{50,f}$	=	gemiddelde massa van een element uit de filterlaag [kg]
$n$	=	aantal 'armour layers' [-]
$n_c$	=	schaal golfsnelheid
$n_f$	=	porositeit van de filterlaag [-]
$n_G$	=	schaal geometrie
$n_h$	=	schaal waterdiepte
$n_H$	=	schaal golfhoogte
$n_L$	=	schaal golflengte
$n_v$	=	volumieke porositeit [-]
$N$	=	1) coëfficiënt van Iribarren [-] 2) aantal golven [-]
$N(x)$	=	normaalkracht per $m^1$ [N/m]
$N_a$	=	aantal elementen per $m^2$ [ $m^{-2}$ ]
$N_L$	=	stabiliteitsgetal tegen oplichten [-]
$N_o$	=	aantal verplaatste elementen [-]
$N_{od}$	=	aantal verplaatste elementen per breedte $D_n$ over 'armour layer' [-]
$N_{or}$	=	aantal 'rockende' elementen per breedte $D_n$ over 'armour layer' [-]
$N_{omov}$	=	som van $N_{or}$ en $N_{od}$ [-]
$N_s$	=	stabiliteitsgetal [-]
$p$	=	constante = 1(laminaire stroming) en = 2(turbulente stroming) [-]
$P$	=	permeabiliteit [-]
$q$	=	gelijkmatig verdeelde belasting per $m^1$ [N/m]
$r_{min}$	=	minimale straal voor stroming [m]
$R_c$	=	kruinhoogte [m]
$R_d$	=	maximale golfterugloop [-]
$Re$	=	Reynoldsgetal [-]
$R_{d,2\%max}$	=	maximale golfterugloop met 2% overschrijding [m]
$s$	=	spleetbreedte [m]
$s_m$	=	gemiddelde golfsteilheid [-]
$s_{om}$	=	gemiddelde golfsteilheid op diep water [-]
$s_{op}$	=	piekgolfsteilheid op diep water [-]
$S$	=	1) schadeniveau [-] 2) belasting op het blok uitgedrukt in meters waterkolom [m]

$t_o$	=	de tijdsduur dat het stijghoogteverschil hoger is dan eigen gewicht plus wrijving [s] *
$t_u$	=	bewegingsduur [s] *
$T_m$	=	gemiddelde golfperiode [s]
$T_{mo}$	=	gemiddelde golfperiode op diep water [s]
$u$	=	stroomsnelheid [m/s]
$u_a$	=	snelheid van 'armour layer' element [m/s]
$u_p$	=	snelheid in de poriën [m/s]
$U$	=	snelheidsverschil [m/s]
$V_{bulk}$	=	volume bulk [m <sup>3</sup> ]
$W$	=	kracht ten gevolge van het eigen gewicht [N]
$W_a$	=	kracht ten gevolge van het eigen gewicht van een 'armour layer' element (boven water) [N]
$W_{50}$	=	50% waarde van de massadistributiecurve [kg]
$z_1$	=	niveau van de freatische lijn in het filter [m]
$\alpha$	=	1) hellingshoek [°] 2) energyschaalparameter [-]
$\beta$	=	helling van het golffront ten opzichte van verticaal [°]
$\gamma$	=	verhouding van de maximale spectrale energie en het maximum van het bijbehorende Pierson-Moskowitz spectrum [-]
$\Gamma_b$	=	vermenigvuldigingsfactor [-] *
$\Gamma_s$	=	$\Gamma_{s1} + \Gamma_2$ [-] *
$\Gamma_{s1}$	=	bijdrage van de wrijvingskracht [-] *
$\Gamma_2$	=	$\Gamma_{s2} - 1$ [-] *
$\Gamma_{s2}$	=	verhouding tussen stijghoogteverschil over bewegend blok en stijghoogteverschil overeenkomend met eigen gewicht van het blok [-] *
$\Gamma_3$	=	$(\Gamma_1 + \Gamma_2)(\Gamma_b - 1)$ [-] *
$\delta$	=	wrijvingshoek [°]
$\Delta$	=	relatieve dichtheid [-]
$\Delta\phi$	=	verschil in stijghoogte over de kubus [m]
$\varepsilon$	=	de hoeveelheid toegestane blokverplaatsing gedeeld door de blokdikte [-] *
$\lambda$	=	lekhogte [m]
$\Lambda$	=	leklengte [m]
$\nu$	=	kinematische viscositeit [m <sup>2</sup> /s]
$\xi_m$	=	brekerparameter [-]
$\xi_t$	=	overgang van 'plunging' naar 'surging' golven brekerparameter [-]
$\rho_a$	=	soortelijke dichtheid element [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_b$	=	soortelijke dichtheid van beton [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{bulk}$	=	bulkdichtheid [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_r$	=	soortelijke dichtheid van steen [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_w$	=	soortelijke dichtheid van water [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	=	oppervlaktespanning [N/m]
$\sigma_a$	=	parameter in JONSWAP-vergelijking [-]
$\sigma_b$	=	parameter in JONSWAP-vergelijking [-]
$\phi$	=	1) plaatsingsdichtheid [-] 2) stijghoogte [m]
$\phi_b$	=	niveau van het golffront [m]

$\phi_{SPM}$  = plaatsingsdichtheid volgens de Shore Protection Manual [-]

$\phi_t$  = stijghoogte in de filterlaag [m]

$\phi_w$  = maximaal stijghoogteverschil [m]

$\Phi$  = wrijvingshoek tussen blokken en filterlaag [°]

\* Deze parameters zijn overgenomen uit de rekenmethode van Bezuijen, Burger en Klein Breteler (Bezuijen e.a. 1990).

## Figurenlijst

3.1	Proefopstelling van Hald, Tørum en Holm-Karlsen met ordelijk geplaatste stenen	12
3.2	Schematisatie stortsteen 'armour layer' en bekleding	18
3.3	Kracht plus moment op een dolos, benodigd om het element te verwijderen	19
3.4	Golftypen	23
5.1	Golfgoot Laboratorium voor Vloeistofmechanica	32
5.2	Zijaanzicht golfbreker zonder 'armour layer' en met versterkte teen	36
5.3	Plaatsingspatroon A	39
5.4	Plaatsingspatroon B	39
5.5	Zijaanzicht peilnaald	42
6.1	Bepaling waarde van $H_s/(\Delta D_n)$ voor 'start-van-schade'	46
6.2	Afschuiving bij kubussen in dubbele laag zonder versterkte teen en een $n_v$ van 0,3	48
6.3	Schadeverloop kubussen zonder versterkte teen	49
6.4	Schadeverloop kubussen met versterkte teen	50
6.5	Bezweken golfbreker met enkele 'armour layer' tetrapoden en een $n_v$ van 0,25	51
6.6	Schadeverloop tetrapoden	52
6.7	Samendrukking van de onderste kleurenbanden bij een talud van 1:3	53
6.8	Schadeverloop breuksteen; talud 1:1,5 en 1:2; normale plaatsing	54
6.9	Schadeverloop breuksteen; talud 1:3; normale plaatsing	54
6.10	Schadeverloop breuksteen; plaatsingsmethode A	55
6.11	Schadeverloop breuksteen; plaatsingsmethode B	55
6.12	Schadeverloop breuksteen; wijde gradering; normale plaatsing	56
6.13	'Start-van-schade' dubbele 'armour layer' kubussen $n_v=0,3$	59
6.14	'Start-van-schade' dubbele 'armour layer' kubussen $n_v=0,25$	59
6.15	'Start-van-schade' en bezwijken enkele 'armour layer' tetrapoden	60
6.16	Vergelijking experimenten met hypothetische golfbreker met betrekking tot oplichting	64
6.17	Vergelijking experimenten met hypothetische golfbreker met betrekking tot oplichten in combinatie met inklemming bij $F_{s,gem}$	66
6.18	Vergelijking experimenten met hypothetische golfbreker met betrekking tot oplichten in combinatie met inklemming bij $F_{s,max}$	66
6.19	Verloop van het stijghoogteverschil over de 'armour layer'	68
6.20	Vergelijking experimenten met hypothetische golfbreker met betrekking tot afschuiven	69
6.21	Verhouding sterkte/belasting uitgezet tegen $H_s/(\Delta D_n)$	71
6.22	Vergelijking schadeontwikkeling verschillende plaatsingsmethoden bij talud 1:1,5	72
6.23	Vergelijking schadeontwikkeling verschillende plaatsingsmethoden bij talud 1:2	72
6.24	Vergelijking schadeontwikkeling verschillende plaatsingsmethoden bij talud 1:3	73
6.25	'Start-van-schade' en bezwijken enkele 'armour layer' breuksteen bij talud 1:2 (normale plaatsing)	74



6.26	'Start-van-schade' en bezwijken enkele 'armour layer' breuksteen bij talud 1:3 (normale plaatsing)	74
6.27	Vergelijking experimenten met de theorie van Van der Meer	76
6.28	Vergelijking experimenten met Bhageloe, H2061 en de theorie van Van der Meer	77
6.29	Vergelijking experimenten talud 1:1,5 met Bhageloe en de theorie van Van der Meer	79
6.30	Vergelijking experimenten talud 1:2 met de theorie van Van der Meer	80
6.31	Vergelijking experimenten talud 1:3 met de theorie van Van der Meer	81
6.32	Vergelijking experimenten met een wijde gradering met de experimenten van Burger	82
7.1	Definitie aangevallen oppervlak ( $A_a$ ) in dwarsdoorsnede	83
A.1	Belastingsmechanismen voor een zetsteenbekleding bij 'plunging' golven	
A.2	Krachten bij maximale golfterugloop	
A.3	Belasting op 'armour layer' (resultaten van het grootschalige onderzoek voor de Oesterdam)	
A.4	Stijghoogte op het talud en stijghoogte in het filter bij afnemende lek lengte	
A.5	Inklemming	
A.6	Schematisatie voor berekening inklemming	
B.1	Krachten op een 'armour layer' element op het talud van een golfbreker	

## Tabellenlijst

0.1	Uitgevoerde experimenten	ii
0.2	Resultaten van de experimenten voor kubussen	ii
0.3	Resultaten van de experimenten voor tetrapoden	iii
0.4	Resultaten van de experimenten voor breuksteen	iii
3.1	Invloed van de helling op het schadecriterium $H_s/(\Delta D_n)$	9
3.2	Permeabiliteit volgens Van der Meer	9
3.3	Stabiliteitsniveaus voor breuksteen in een enkele laag $H_s/(\Delta D_n)$	11
3.4	Stabiliteitsniveaus voor beton kubussen in een dubbele laag $H_s/(\Delta D_n)$	13
3.5	Stabiliteitsniveaus voor kubussen in een enkele laag $(H_s/\Delta D_n)$	14
3.6	Stabiliteitsniveaus voor tetrapoden in een dubbele laag $(H_s/\Delta D_n)$	20
3.7	Stabiliteitsniveaus voor tetrapoden in een enkele laag $H_s/(\Delta D_n)$	22
5.1	Afmetingen model	33
5.2	Toegepaste plaatsingsdichtheden	37
5.3	Toegepaste plaatsingsdichtheden voorgaande onderzoeken	38
5.4	Kleurenbanden benodigd per talud	41
6.1	Waarde van $N_{od}$ voor 'start-van-schade'	45
6.2	Meetwaarden van $K_{0.4}$	46
6.3	Invloed van 'shoaling'	57
6.4	Indicatie 'start-van-schade' en bezwijken voor dubbele 'armour layer' kubussen	59
6.5	Indicatie 'start-van-schade' en bezwijken voor 'armour layer' tetrapoden	60
6.6	Berekening doorlatendheid	63
6.7	Parameters van hypothetische golfbreker $n_v=0,25$	64
6.8	Gebruikte parameters voor stabiliteitsberekening	70
6.9	Indicatie 'start-van-schade' en bezwijken voor 'armour layer' breuksteen	75
6.10	Vergelijking 'start-van-schade'- en bezwijkcriteria volgens Van der Meer met het huidige onderzoek	76
6.11	Vergelijking 'start-van-schade'- en bezwijkcriteria volgens voorgaande onderzoeken met het huidige onderzoek	78
6.12	Vergelijking 'start-van-schade'- en bezwijkcriteria volgens voorgaande onderzoeken met het huidige onderzoek	80
6.13	Vergelijking 'start-van-schade'- en bezwijkcriteria volgens voorgaande onderzoeken met het huidige onderzoek	81
7.1	Waarden van $t_v$ bij 95% betrouwbaarheid	88
7.2	Resultaten berekening betrouwbaarheidsinterval voor 'armour layer' van breuksteen bij normale plaatsing	88
8.1	Indicatie 'start-van-schade' en bezwijken kubussen bij versterkte teen	89
8.2	Indicatie 'start-van-schade' en bezwijken tetrapoden	91
8.3	Indicatie 'start-van-schade' en bezwijken breuksteen	93

## Inhoud

Voorwoord	i
Samenvatting	ii
Symbolenlijst	v
Figurenlijst	ix
Tabellenlijst	xi
1. Inleiding	1
2. Probleemanalyse	3
2.1 Probleemstelling	3
2.2 Doelstelling	3
2.3 Definities	3
2.4 Afbakening	3
2.5 Aanpak	4
3. Voorgaand onderzoek stabiliteitsformules	6
3.1 Breuksteen	6
3.1.1 Iribarren	6
3.1.2 Hudson	7
3.1.3 Van der Meer	8
3.1.4 Burger	10
3.1.5 Bhageloe	11
3.1.6 Hald, Tørum, Holm-Karlsen	11
3.2 Kubussen	12
3.2.1 Hudson	12
3.2.2 Van der Meer	12
3.2.3 Bhageloe	14
3.2.4 Van Gent en Spaan	15
3.2.5 Hoge dichtheid beton	16
3.2.6 Zetsteenbekleding als gevolg van een hoge plaatsingsdichtheid	17
3.3 Tetrapoden	18
3.3.1 Invloed van de haakweerstand	18
3.3.2 Van der Meer	20
3.3.3 De Jong	20
3.3.4 Bhageloe	22
3.4 Invloed van het talud op de stabiliteit	22
3.5 Conclusies aan de hand van het voorgaande onderzoek	24
4. Plaatsing	25
4.1 Algemeen	25
4.2 Porositeit	26
4.3 Laagdikte	26
4.4 Materiaaleigenschappen	26

---

4.5 Plaatsingsmethode	27
4.6 Surveymethode	27
5. Experimenten	29
5.1 Schaalregels	29
5.2 Proefopstelling	32
5.2.1 Toegepaste hoofdafmetingen	32
5.2.2 Filter, teen- en kernmateriaal	34
5.2.3 Golven	36
5.2.4 Plaatsingsdichtheid	37
5.3 Meetplan	38
5.3.1 Inleiding	38
5.3.2 Dubbele 'armour layer' kubussen	38
5.3.3 Enkele 'armour layer' tetrapoden	39
5.3.4 Enkele 'armour layer' breuksteen	39
5.4 Meetmethodieken	40
5.4.1 Golfhoogte bepalen	40
5.4.2 Schade bepalen	41
5.4.3 Plaatsingsdichtheid	42
5.4.4 Werkmethode	43
6. Resultaten experimenten	45
6.1 Waarnemingen	45
6.1.1 Toegepaste definities met betrekking tot locatie	45
6.1.2 'Start-van-schade' en bezwijken	45
6.1.3 Kubussen in dubbele laag	47
6.1.4 Tetrapoden in enkele laag	50
6.1.5 Breuksteen in enkele laag	52
6.1.6 Golven	56
6.2 Analyse van de experimenten	57
6.2.1 Invloed van de plaatsingsdichtheid	57
6.2.2 Het oplichten van een kubus	61
6.2.3 Inklemming van een kubus	65
6.2.4 Afschuiven van een kubus	67
6.2.5 Stabiliteit tegen rotatie van een tetrapode	69
6.2.6 Analyse breuksteen 'armour layer'	71
6.3 Vergelijking met voorgaande onderzoeken	75
6.3.1 Kubussen	75
6.3.2 Tetrapoden	77
6.3.3 Breuksteen	78
7. Schadecriterium met plaatsingsdichtheid	83
7.1 Gebreken huidig schadecriterium	83
7.2 Bepaling aangevallen oppervlak	83
7.3 Plaatsingsdichtheid in het schadecriterium	84
7.4 Schadevormen	85
7.5 Bepaling van de coëfficiënten	86

8. Conclusies en aanbevelingen	89
8.1 Kubussen in dubbele 'armour layer'	89
8.1.1 Conclusies	89
8.1.2 Aanbevelingen	90
8.2 Tetrapoden in enkele 'armour layer'	91
8.2.1 Conclusies	91
8.2.2 Aanbevelingen	92
8.3 Breuksteen in enkele 'armour layer'	93
8.3.1 Conclusies	93
8.3.2 Aanbevelingen	94
8.4 Algemene conclusies en aanbevelingen	94
9. Literatuur	95
A. Rekenmethode zetsteenbekleding	
B. Rekenmethode tetrapoden	

## Bijlagen

I	Figuren voorgaande onderzoeken
II	Figuren huidig onderzoek
III	Foto's
IV	Gradering
V	Meting laagdikte
VI	Schaderapporten
VII	Resultaten experimenten
VIII	Schadeverloop
IX	Golfspectra
X	Vergelijking schadeverloop met voorgaande onderzoeken
XI	Berekening stabiliteit tegen oplichten element
XII	Berekening inklemming
XIII	Berekening stabiliteit tegen afschuiven
XIV	Berekening stabiliteit tegen roteren bij tetrapoden

---

## 1. Inleiding

In de waterbouwkunde zijn golfbrekers belangrijke constructies, die worden toegepast ter beperking van golfhoogtes in aanvoergeulen van havens en ter bescherming van de havens zelf. Dit is van belang om de 'downtime' van een haven zo veel mogelijk te reduceren en uiteraard om de vereiste mate van veiligheid te kunnen garanderen.

Daarnaast kunnen golfbrekers ook als functie hebben bescherming tegen aanzanding, sturing van stromingen en het leveren van kadefaciliteiten. Door de jaren heen zijn golfbrekers op verschillende manieren tot stand gekomen. Behalve de vorm is ook het soort elementen, welke voor de 'armour layer' gebruikt worden, gevarieerd. Dit heeft geresulteerd in vele vormen van elementen, alle met hun voor- en nadelen. Te denken valt aan de traditionele breuksteen, maar ook aan betonelementen, zoals kubussen, akmons, dolossen, tetrapoden, accropoden, antifer kubussen etc. Ontleend elementen aanvankelijk hun stabiliteit aan het gewicht (kubussen, breuksteen), bij de modernere elementen speelt ook de haakweerstand een rol (tetrapoden, dolossen). Door deze haakweerstand en hun slankere vorm levert dit aanzienlijke besparingen op voor het gebruik van beton en zodoende een reductie van de kosten. Daartegenover staat het feit dat, door hun bijzondere vorm, de elementen vaak bezwijken als gevolg van het overschrijden van de structurele sterkte. De laatste jaren is de interesse voor golfbrekers met een enkele 'armour layer' gestegen. Indien de stabiliteit voldoende zou kunnen worden gegarandeerd, zou dit ook een reductie in betongebruik opleveren. De accropode is zelfs speciaal ontwikkeld voor gebruik in een enkele 'armour layer'. Voor het gebruik van dit element moesten tot voor kort licentierechten worden betaald aan SOGREA. Licentierechten dienen nog wel betaald te worden voor de core lock.

Om de stabiliteit van golfbrekers te bepalen zijn vele formules ontwikkeld. Te denken valt aan die van Iribarren, Hudson en Van der Meer. Nadeel van deze formules is dat er nog altijd factoren in voorkomen, bekend als zogenaamde 'dustbin factors', welke dienen om de invloed van alle overige relevante factoren in rekening te brengen. Het meetbaar maken van de elementen in deze 'dustbin factor' zou de betrouwbaarheid van de stabiliteitsformules zeer ten goede komen.

Het onderhavige onderzoek richt zich op de stabiliteit van de 'armour layer' van een golfbreker. Voorgaand onderzoek van Bhageloe (Bhageloe 1998) en Van Gent en Spaan (Van Gent e.a. 1999) heeft uitgewezen dat de plaatsingsdichtheid een belangrijke parameter is, waar nog nader onderzoek naar moet worden verricht. Het voorliggende onderzoek zal trachten de invloed hiervan vast te stellen. Dit zal worden gedaan voor drie typen elementen, namelijk breuksteen, kubussen en tetrapoden. Breuksteen wordt traditioneel veel toegepast en krijgt daarom per definitie een plaats in dit onderzoek. Dit geldt ook voor betonkubussen. Deze elementen worden vaak gebruikt vanwege de eenvoud van constructie. Van de slanke elementen, die gebruik maken van haakweerstand, is de tetrapode betrouwbaar gebleken in verband met de structurele sterkte. Slanke elementen van grote afmetingen bleken namelijk met betrekking tot de structurele sterkte problemen te vertonen. Bovendien sluit het huidige onderzoek met de keuze van deze elementen goed aan bij de voorgaande onderzoeken, waardoor vergelijking van de meetgegevens mogelijk wordt. Bij de realisatie van de proefopstelling is deze aansluiting met voorgaande onderzoeken een belangrijk argument geweest. De kubussen zullen in een dubbele 'armour layer' geplaatst worden. De keuze voor een dubbele 'armour layer' in plaats

van een enkele is gemaakt, omdat er over een enkele 'armour layer' al relatief veel gegevens beschikbaar zijn. Bij de andere twee elementen zal gebruik worden gemaakt van een enkele 'armour layer'. De plaatsingsdichtheid is de belangrijkste te onderzoeken parameter. Bij breuksteen zullen bovendien het talud en de gradering worden gewijzigd om ook hier de invloed van deze wijzigingen vast te kunnen stellen.

De opbouw van dit rapport is als volgt. In hoofdstuk 2 wordt een analyse gegeven van het probleem, alsmede de afbakening en de aanpak die bij dit onderzoek zal worden gevolgd. In hoofdstuk 3 volgt dan een beschrijving van de bestaande theorie met betrekking tot stabiliteitsformules, alsmede de resultaten van voorgaande onderzoeken. Hierna wordt in hoofdstuk 4 de theorie met betrekking tot de plaatsing van de elementen behandeld. De toegepaste proefopstelling en de uitgevoerde experimenten komen in hoofdstuk 5 aan de orde. De resultaten van de experimenten worden vervolgens in hoofdstuk 6 geanalyseerd. Behalve een beschrijving van de resultaten omvat dit hoofdstuk ook een analyse van de opgetreden faalmechanismen en een vergelijking met voorgaande onderzoeken. In hoofdstuk 7 is een nieuwe methode ontwikkeld voor het vaststellen van schade aan de hand van een nieuw schadecriterium. Tenslotte volgen in hoofdstuk 8 de conclusies van het onderzoek en de aanbevelingen.

## 2. Probleemanalyse

### 2.1 Probleemstelling

De invloed van de plaatsingsdichtheid op de stabiliteit van golfbrekers met een enkele en dubbele ‘armour layer’ is tot op heden onderbelicht gebleven en daardoor onbekend.

### 2.2 Doelstelling

Inzicht verkrijgen in de invloed van de plaatsingsdichtheid op de stabiliteit van kubussen in een dubbele ‘armour layer’ en tetrapoden en breuksteen in een enkele ‘armour layer’ bij ‘rubble mound’ golfbrekers

Verder zal bij breuksteen in samenhang met de plaatsingsdichtheid tevens onderzoek worden gedaan naar de invloed van de helling van het talud en de breedte van de gradering.

### 2.3 Definities

Voor de duidelijkheid zullen in deze paragraaf enkele in dit rapport veel gebruikte begrippen worden gedefinieerd.

- ‘Start-van-schade’ is het geheel van condities waarbij het eerste element verdwijnt.
- Bezwijken treedt op als de filterlaag wordt aangetast. Dit betekent niet dat in het geval er delen van de filterlaag blootliggen, er sprake is van bezwijken.
- Plaatsingsdichtheid is het aantal elementen per volumemaat. In dit rapport wordt deze op twee manieren uitgedrukt. Bij kubussen en tetrapoden wordt de plaatsingsdichtheid gevarieerd door het variëren van de volumieke porositeit, bij breuksteen door het variëren van de laagdikte door het toepassen van verschillende plaatsingsmethoden.

### 2.4 Afbakening

Voor de bepaling van de begrenzing van het onderzoek is gekeken naar relevantie met betrekking tot de praktijksituatie. Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van de meest gebruikte elementen en is er gekeken naar de huidige interessegebieden, zoals plaatsingsdichtheid en enkele ‘armour layers’. Verder is aansluiting gezocht bij voorgaande onderzoeken. Er is een beperking van het huidige onderzoek gesteld in verband met de beschikbare tijd voor afstuderen en de beschikbaarheid van de onderzoeksfaciliteiten van de Technische Universiteit Delft.

- Er zal alleen gekeken worden naar tetrapoden, kubussen, en breuksteen in de ‘armour layer’.



- De samenstelling van het beton en de effecten hiervan (denk aan structurele sterkte) zullen niet bekeken worden. Dit, omdat er vanuit wordt gegaan dat de elementen hooguit zullen verplaatsen, maar niet zelf zullen bezwijken. Om dezelfde reden zullen effecten met betrekking tot de sterkte van breuksteen (breken, slijtage) niet worden onderzocht.
- Slechts één type golfbreker zal gebruikt worden. Hierbij zal getracht worden de dwarsdoorsnede, die bij voorgaande onderzoeken is toegepast, zoveel mogelijk te benaderen. Er zal geen variatie plaatsvinden in kruinhoogte of waterdiepte.
- Bezwijken van de ‘armour layer’ is het enige faalmechanisme dat zal worden bekeken. Falen als gevolg van zettingen, ontstaan van glijvlakken, etc. wordt niet bekeken.
- Golftransmissie en overslag wordt niet onderzocht. In de proefopstelling wordt uitgegaan van een voldoende hoog talud, zodat geen overslag plaats kan vinden.
- Overgangszones, zoals ‘talud met teen’ en de ‘kruin’ worden niet onderzocht.

## 2.5 Aanpak

Voor het realiseren van de gewenste doelstelling zijn experimenten verricht in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit Delft. In de zogenaamde Sedimenttransportgoot is een schaalmodel gebouwd van een golfbreker. Drie verschillende elementen werden onderzocht voor de ‘armour layer’: kubussen, tetrapoden en breuksteen. Van de ‘armour layers’ werd de plaatsingsdichtheid gevarieerd. Dit gebeurde bij kubussen en tetrapoden door de volumieke porositeit te veranderen en bij breuksteen door aanpassing van de laagdikte. Ieder configuratie van de golfbreker werd belast door een JONSWAP golfspectrum, waarbij de significante golfhoogte telkens werd verhoogd totdat de bezwijksituatie, voor zover dat bij de betreffende opstelling mogelijk was, werd bereikt. Dit gebeurde bij constante golfsteilheid. Gedurende de experimenten werden de golfhoogtes gemeten en werd de schadeontwikkeling geobserveerd. Vastgesteld werd hoeveel elementen verplaatsten en op welke wijze dit gebeurde. Bij breuksteen werd ook het talud gewijzigd en de gradering.

De data verkregen uit de experimenten zijn vervolgens geanalyseerd. De verschillende toegepaste configuraties voor de ‘armour layer’ zijn met elkaar vergeleken. Getracht is om trends te ontdekken. Slechts een kwalitatief verband tussen  $H_s/(\Delta D_n)$  en  $N_{od}$  kan worden vastgesteld, aangezien door het gebrek aan herhalingsproeven de daadwerkelijke relaties niet kunnen worden opgesteld. Voor ‘start-van-schade’ en bezwijken zijn bandbreedtes vastgesteld, waarin deze gebeurtenissen op kunnen treden. Op deze wijze kan een globale indicatie worden gegeven van deze criteria. De verschillende waargenomen faalmechanismen, kenmerkend voor bepaalde configuraties, zijn geanalyseerd. Ieder faalmechanisme is zo goed mogelijk met behulp van aannamen gekwantificeerd. Deze aannamen worden in hoofdstuk 6 behandeld. Als laatste onderdeel van de analyse zijn de data van de experimenten vergeleken met de resultaten van voorgaande onderzoeken. Na afloop van deze analyse kan de invloed van de plaatsingsdichtheid op de stabiliteit per verschillend type element worden aangegeven. Verder kunnen kenmerkende fenomenen, die optreden bij bepaalde plaatsingsdichtheden, worden vastgesteld.

De plaatsingsdichtheid komt niet voor in bestaande schadecriteria. Getracht is om een schadecriterium op te stellen, dat wel rekening houdt met de plaatsingsdichtheid.

### 3. Voorgaand onderzoek stabiliteitsformules

#### 3.1 Breuksteen

##### 3.1.1 Iribarren

De eerste formule welke gebruikt werd voor het bepalen van de stabiliteit van rots onder golfaanval was de formule van Iribarren (Schiereck 1998). Iribarren onderzocht het evenwicht van krachten, die op een element op een helling werken. De volgende factoren werden als relevant beschouwd:

- gewicht
- oprijfvermogen
- golfkracht
- wrijvingsweerstand

De formule kan als volgt worden weergegeven, waarbij de  $\pm$  geldt voor golfoploop(+) dan wel golfterugloop(-).

$$W \geq \frac{N\rho_r g H^3}{\Delta^3 (f_b \cos \alpha \pm \sin \alpha)^3} \quad (3.1)$$

$$\Delta = \frac{\rho_r}{\rho_w} - 1 \quad (3.2)$$

- $W$ = kracht ten gevolge van het eigen gewicht [N]  
 $\rho_r$ = soortelijke dichtheid van steen [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $H$ = golfhoogte [m]  
 $f_b$ = wrijvingscoëfficiënt [-]  
 $\Delta$ = relatieve dichtheid [-]  
 $\rho_w$ = soortelijke dichtheid van water [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $\alpha$ = hellingshoek van talud golfbreker [ $^\circ$ ]  
 $N$ = coëfficiënt van Iribarren [-]

$N$  is een coëfficiënt, waarin alle overige factoren zijn ondergebracht, die niet in de overige parameters van deze vergelijking zijn opgenomen. Deze coëfficiënt kan gezien worden als een zogenaamde 'dustbin factor'.

### 3.1.2 Hudson

Hudson (D'Angremond e.a. 2000) heeft vervolgens de volgende formule opgesteld na het uitvoeren van experimenten op golfbrekers van breuksteen.

$$W = \frac{\rho_r g H^3}{\Delta^3 K_D \cot \alpha} \quad (3.3)$$

$K_D$  = coëfficiënt van Hudson [-]

Deze formule is alleen geldig voor  $1:1,5 < \text{talud} < 1:4$ .  $K_D$  is net als  $N$  een coëfficiënt, welke kan worden beschouwd als een 'dustbin factor'. De variabelen waar  $K_D$  bijvoorbeeld voor staat zijn (CERC 1984) (D'Angremond 2000):

- vorm elementen
- laagdikte van de 'armour layer'
- plaatsingsmethode
- oppervlakteruwheid van de blokken en de haakweerstand
- vorm van de golfaanval (breken/niet breken)
- deel van de constructie (hoofd, lichaam)
- schaal van het model (Reynoldsgetal)
- lengte tot aan waar de 'armour layer' onder SWL (still water level) reikt
- afmetingen en porositeit onderlaag
- hoogte van de kern t.o.v. SWL
- kruintype
- kruinhoogte boven SWL t.o.v. golfhoogte
- kruinbreedte
- hoek van inval van de golven
- vorm van het voorland
- nauwkeurigheid van de golfhoogtemetingen

Voor verschillende elementen zijn representatieve waarden opgesteld voor  $K_D$  in het Shore Protection Manual (CERC 1984). Aangepast kan de formule ook op de volgende wijze worden weergegeven.

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = (K_D \cot \alpha)^{1/3} \quad (3.4)$$

$H_s$  = significante golfhoogte [m]

$D_{n50}$  = nominale diameter [m]

$$D_{n50} = \left( \frac{W_{50}}{\rho_r} \right)^{1/3} \quad (3.5)$$

$W_{50}$  = 50% waarde van de massadistributiecurve [kg]

Het linkerlid van formule 3.4 kan worden beschouwd als een stabiliteitsgetal en wordt vaak  $N_s$  genoemd. Deze formule heeft echter enkele gebreken. De formule is afgeleid op basis van regelmatige golven en verder wordt er geen rekening gehouden met de invloed van de golfperiode, de stormduur of de permeabiliteit van de golfbreker. Verder gaat deze formule uit van een 'geen-schade' criterium. Zodoende kan het verloop van de schade niet worden vastgesteld. Als voordeel van de Hudson-formule kan wel worden genoemd dat het een eenvoudige en snelle methode is. Van der Meer noemt enkele verbeteringen voor deze formule, bijvoorbeeld zoals voorgesteld door Ahrens, Losada, e.a. Deze zijn echter alleen geschikt voor regelmatige golven. Thompson en Shuttler maakten wel gebruik van onregelmatige golven, maar vonden geen afhankelijkheid van de golfperiode. Het tegendeel hiervan is later door Van der Meer gevonden (Van der Meer 1986). Dit bewijs werd geleverd door het doen van proeven met verschillende en langere golfperioden. Thompson en Shuttler gebruikten alleen steile golven met een kleine variatie in de golfperiode.

### 3.1.3 Van der Meer

Uit de proeven van Van der Meer (Van der Meer 1986) blijkt dat de stabiliteit van golfbrekers aan de hand van de volgende dimensieloze parameters kan worden beschreven:

- stabiliteitsgetal:  $H_s/\Delta D_{n50}$
- brekerparameter:  $\xi_m$
- hellingshoek:  $\cot\alpha$
- schade als functie van het aantal golven  $S/\sqrt{N}$
- permeabiliteit van de constructie:  $P$

Verder werd geen afhankelijkheid gevonden van de volgende parameters onder de geteste omstandigheden:

- gradering van de 'armour layer'
- spectrum vorm
- gegroeptheid van de golven

Van der Meer concludeerde dat, als de gemiddelde periode  $T_m$  wordt gebruikt in plaats van de piekperiode  $T_p$ , de spectrumvorm en de gegroeptheid van de golven er niet meer toe doen (Van der Meer 1986). Onder gegroeptheid van de golven wordt verstaan de manier waarop de golven elkaar opvolgen; komen er bijvoorbeeld meerdere hoge golven achter elkaar, of wisselen de hoge golven af met lage golven.

De invloed van de golfperiode relateert Van der Meer aan de brekerparameter  $\xi_m$ :

$$\xi_m = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H_s}{g T_m^2}}} \quad (3.6)$$

$T_m =$  gemiddelde golfperiode [s]

Het deel onder het wortelteken in vergelijking 3.6 is een maat voor de golfsteilheid.

Het schadeniveau wordt met de volgende vergelijking beschreven.

$$S = \frac{A}{D_{n50}^2} \quad (3.7)$$

S= schadeniveau [-]

A= dwarsdoorsnede oppervlak geërodeerd profiel [m<sup>2</sup>]

S kan ook beschreven worden als het aantal kubusvormige stenen met een ribbe van  $D_{n50}$ , geërodeerd over een breedte van  $D_{n50}$ . Het 'geen-schade'-criterium van Hudson komt overeen met een waarde voor S van 1 tot 3. Bezwijken van de constructie vindt plaats bij een waarde van S tussen 7 en 18. De exacte waarde hangt af van de helling.

De invloed van de helling is weergegeven in tabel 3.1 (Van der Meer, 1986).

Tabel 3.1: Invloed van de helling op het schadecriterium  $H_s/(\Delta D_n)$

Helling	'Start-van-schade' [-]	Repareerbare schade [-]	Bezwijken [-]
1:1,5	2	3-5	8
1:2	2	4-6	8
1:3	2	6-9	12
1:4	3	8-12	17
1:6	3	8-12	17

De proeven gedaan door Van der Meer bestonden over het algemeen uit vijf experimenten met dezelfde golfperiode, maar met variërende significante golfhoogte. De golfperiode varieerde van 1,3 tot 3,2 seconden en de golfhoogte varieerde van 0,05 tot 0,26 m. Voor de golven werd een Pierson-Moskowitz spectrum gebruikt. Daarbij werden zowel smalle als brede spectra gebruikt. Na ieder experiment werd de 'armour layer' verwijderd en weer opgebouwd. Voor  $N = 1000$  en  $N = 3000$  golven werden schadecurven getekend. Hiermee werd de  $H_s/(\Delta D_{n50})$ -waarde bepaald. Verder werd er onderzoek gedaan naar een doorlatende en een ondoorlatende kern. Permeabiliteit is een fictieve parameter, die op de in tabel 3.2 beschreven wijze uitgedrukt kan worden.

Tabel 3.2: Permeabiliteit volgens Van der Meer

P[-]	Beschrijving
0,1	'Armour layer' op ondoorlatende kern
0,4	'Armour layer', filter, kern
0,5	'Armour layer', kern
0,6	Golfbreker, geen filter, geen kern

In de Van der Meer-stabiliteitsrelaties wordt ook rekening gehouden met het aantal golven  $N$ . De golfperiode was met name bij permeabele kernen zeer van invloed. De stabiliteit neemt hier toe met toename van  $T_m$ . Dit effect is verklaarbaar door de verschillen in waterbeweging bij de helling. Bij een impermeabele kern is de stroming geconcentreerd in de 'armour layer'. Bij een permeabele kern dissipeert het water in de kern en wordt de stroming rustiger. Bij grotere golfperioden (grotere

$T_m$ ) kan meer water door de kern stromen. Hierdoor nemen de krachten af en neemt de stabiliteit van de helling toe.

Dit resulteerde in twee stabiliteitsformules (Van der Meer 1988):

‘Plunging’ golven (breken) ( $\xi_m < 2,5 - 3,5$ )

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} \sqrt{\xi_m} = 6,0P^{0,18} \left( \frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0,2} \quad (3.8)$$

‘Surging’ golven (niet breken) ( $\xi_m > 2,5 - 3,5$ )

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 1,0P^{-0,13} \left( \frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0,2} \sqrt{\cot \alpha} \xi_m^P \quad (3.9)$$

De overgang tussen de twee formules wordt weergegeven met  $\xi_t$ . Als  $\xi > \xi_t$  dan moet de formule voor ‘surging’ gebruikt worden. Als  $\xi < \xi_t$  dan moet de formule voor ‘plunging’ worden gebruikt. Als  $\cot \alpha > 4$  is er geen overgang meer en wordt alleen de formule voor ‘plunging’ gebruikt.

$$\xi_t = \left[ 6,2P^{0,31} \sqrt{\tan \alpha} \right]^{\left( \frac{1}{P+0,5} \right)} \quad (3.10)$$

### 3.1.4 Burger

Kruinhoogte, vorm en gradering van de breuksteen zijn ook relevante parameters voor de stabiliteit. Onderzoek hiernaar is gedaan door Burger (Burger 1995). De schade bleek bij Van der Meer mee te vallen in vergelijking met die bij Burger. Dit is te verklaren uit het feit dat Van der Meer zich beperkt tot de voorzijde, terwijl Burger, vanwege het gebruik van een lage kruinhoogte, ook schade heeft gevonden door golfoverslag.

De invloed van de steenvorm blijkt gering. Bij een golfsteilheid van 0,02 blijkt dat als  $H_s/(\Delta D_{n50})$  groter is dan 2,4, het uniformere materiaal stabiel is. Bij een nog groter stabiliteitsgetal blijkt dit materiaal juist weer instabieler. De lengte-breedte verhouding van een element is dus verwaarloosbaar. De hoekigheid blijkt een grotere invloed te hebben. Als het materiaal bovendien eenmaal in beweging komt, ontwikkelt de schade zich wel progressief. Onder progressieve schadeontwikkeling wordt verstaan dat bezwijken vrij snel na ‘start-van-schade’ optreedt. Wat betreft gradering was bekend dat tot  $D_{85}/D_{15} < 2,5$  de gradering geen rol speelt (Van der Meer e.a. 1996). Uit het onderzoek van Burger volgt dat, wat de gradatie betreft, er geen verschil is in schadeontwikkeling tot  $S = 2$ . Hierboven is bij een golfsteilheid van 0,04 wel schadeontwikkeling. Burger concludeert echter, dat aangezien golfbrekers toch op  $S = 2$  worden gedimensioneerd, dit verschil niet echt van belang is. Concluderend wordt gezegd dat de materiaalfactoren een relatief geringe invloed hebben. De invloed van gradatie is daarbij nog het grootst. Een brede gradatie levert de laagste stabiliteit op bij een schadegetal  $S > 2$ .

### 3.1.5 Bhageloe

Interessant is de mogelijkheid tot reductie van de constructiekosten door het toepassen van slechts één enkele laag als 'armour layer'. Bhageloe (Bhageloe 1998) heeft deze mogelijkheid onderzocht. De opstelling gebruikt door Bhageloe is weergegeven in bijlage I. Hiervoor werd breuksteen gebruikt met een gradering van  $D_{85}/D_{15} = 1,2$ . Uit het onderzoek van Bhageloe voor breukstenen volgden de bezwijkcriteria van tabel 3.3. Breuksteen bleek een progressief bezwijkgedrag te vertonen.

Tabel 3.3: Stabiliteitsniveaus voor breuksteen in een enkele laag  $H_s/(\Delta D_n)$

Talud	'Geen-schade'	'Start-van-schade'	Bezwijken
	[-]	[-]	[-]
1:1,5	0,9	1,2	1,5

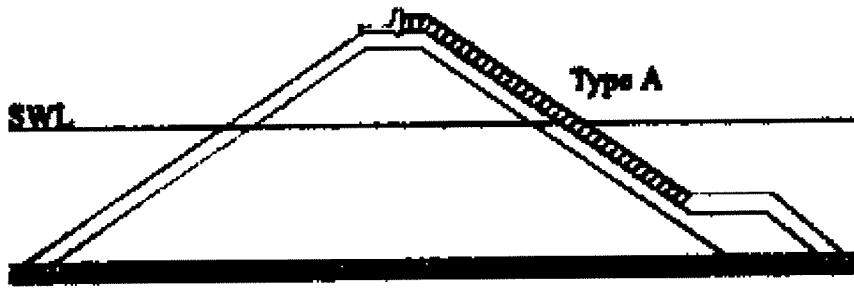
Hieruit volgde dat in geval van één enkele laag breukstenen 1,6 keer groter en 4 keer zwaarder uitgevoerd moesten worden dan voor een dubbele 'armour layer'. De plaatsingsdichtheid was 80% kleiner dan bij een dubbele 'armour layer' in geval van een porositeit van 33%. De stenenbesparing was 15%. Bhageloe gebruikt de volumieke porositeit  $n_v$  om de plaatsingsdichtheid uit te drukken. De toegepaste helling van 1:1,5 bleek een negatief effect op de stabiliteit te hebben. Flauwere hellingen lijken geschikter voor breukstenen. Bhageloe maakte gebruik van een willekeurige plaatsing voor de breukstenen.

'Start-van-schade' vond plaats rond 'Still Water Level' (SWL). Weggeslagen stenen bleven op de laag eronder liggen of rolden door naar de teen. Uit de proeven bleek dat breuksteen in één enkele 'armour layer' bij deze helling niet stabiel was. In zijn rapport wordt door Bhageloe aangeraden om andere flauwere hellingen te bekijken. Minimum stabiliteit trad op bij de gemiddelde golfsteilheid  $0,035 < s_{om} < 0,040$ .

### 3.1.6 Hald, Tørum, Holm-Karlsen

In tegenstelling tot de conclusie van Bhageloe dat een talud van 1:1,5 niet geschikt is voor breuksteen in een enkele 'armour layer' zijn in Noorwegen meer dan 600 golfbrekers gebouwd met een enkele 'armour layer' van breuksteen, welke bloot staan aan golven tot 6,5m. Deze golfbrekers zijn ook gerealiseerd met een talud van 1:1,5. Hald, Tørum en Holm-Karlsen (Hald e.a. 1998) hebben onderzoek verricht naar deze golfbrekers. In hun opstelling werd gebruik gemaakt van ordelijk en willekeurig geplaatste breukstenen. De ordelijk geplaatste stenen werden allen rechtop geplaatst. Dit is weergegeven in figuur 3.1. Gebruik werd gemaakt van breuksteen met een gradatie van  $W_{85}/W_{15}=1,8$ . Gedurende een proef werd de golfsteilheid constant gehouden en de golfhoogte vergroot tot bezwijken optrad. Verder werd er gebruik gemaakt van een JONSWAP spectrum voor het opwekken van de golven.





Figuur 3.1: Proefopstelling van Hald, Tørum en Holm-Karlsen met ordelijk geplaatste stenen

Voor ordelijk geplaatste stenen bleek de schade boven SWL te beginnen. De invloed van de golfsteilheid is niet waargenomen en de schadevoortgang is langzaam. Een schadeniveau van 5% wordt bereikt bij een stabiliteitsgetal  $H_s/(\Delta D_n)$  van 2,3, wat overeen komt met een  $K_D$ -waarde in de Hudson-formule van 8,1. Met een 5% schadeniveau wordt 5% schade aan de 'armour layer' bedoeld. Bij willekeurig geplaatste stenen begint de schade rond SWL als gevolg van de zetting van de 'armour layer' onder SWL. Wederom blijkt de invloed van de golfsteilheid gering. Schadevoortgang is in dit geval echter zeer snel. Het 5% schadeniveau wordt nu bij een waarde van 1,1 van het stabiliteitsgetal bereikt. In de vergelijking met Hudson betekent dit een  $K_D$  van 0,9. In het geval van combinaties (boven ordelijk en onder willekeurig geplaatst) vindt er een langzamere schadevoortgang plaats. De willekeurig geplaatste stenen worden verplaatst tot een bepaald niveau, waarna de ordelijk geplaatste stenen beginnen af te schuiven. De resultaten van het onderzoek van Hald e.a. komen overeen met die van het onderzoek van Bhageloe voor willekeurig geplaatste stenen.

## 3.2 Kubussen

### 3.2.1 Hudson

Ook voor betonnen kubussen heeft Hudson onderzoek verricht. De resultaten komen overeen met de theorie weergegeven in paragraaf 3.1.2. Het verschil voor kubussen ten opzichte van breuksteen is het optreden van andere waarden voor  $K_D$ .

### 3.2.2 Van der Meer

Van der Meer zette zijn onderzoek naar stabiliteitsformules voort met betonkubussen als 'armour layer'. De door Van der Meer gebruikte opstelling is in bijlage I weergegeven. Kubussen kenmerken zich door een goede weerstand tegen impactkrachten en de eenvoud van productie. Schade bij stortsteen kan bepaald worden met behulp van de variabele  $S$ . Bij kunstmatige 'armour layer' eenheden wordt de schade bepaald aan de hand van het aantal verplaatste eenheden over een afstand van meer dan een diameter. Nadeel van deze methode is de afhankelijkheid van de hellingshoek en het totale aantal 'armour layer' eenheden in een laag. Van der Meer gebruikt een andere definitie voor schade:  $N_{od}$ . Dit is de relatieve schade, die het aantal verplaatste 'armour layer' eenheden relateert aan een breedte van een nominale

diameter  $D_n$ .  $D_n$  is gelijk aan een zijde van de kubus.  $N_{od}$  is vergelijkbaar met  $S$ , met het verschil dat  $S$  ook zettingen verdisconteert.  $S$  houdt daarentegen geen rekening met de porositeit van de 'armour layer'.  $S$  is meestal twee keer zo groot als  $N_{od}$ . Onderscheid dient gemaakt te worden naar verplaatste eenheden ( $N_{od}$ ) en schade als gevolg van het breken van elementen door 'rocking' ( $N_{or}$ ). Onder 'rocking' wordt het bewegen van elementen verstaan zonder van positie te veranderen. Het totale aantal bewegende elementen wordt ook wel  $N_{omov}$  genoemd.

$$N_{omov} = N_{od} + N_{or} \quad (3.11)$$

In tabel 3.4 zijn de schadeniveaus voor betonkubussen weergegeven.

Tabel 3.4: Stabiliteitsniveaus voor beton kubussen in een dubbele laag  $H_s/(\Delta D_n)$

Talud	'Geen- Schade' [-]	'Start-van-schade' [-]	Schade(herstel nodig)[-]	Bezwijken [-]
1:1,5	0	0-0,5	0,5-1,5	>2

Van der Meer bepaalde de overheersende parameters als zijnde:

- stabiliteitsgetal:  $H_s/\Delta D_n$
- golfsteilheid:  $s_m$
- relatieve schade:  $N_o$
- aantal golven:  $N$

Conclusies van het onderzoek op kubussen waren (Van der Meer 1988) dat de invloed van de stormduur verwaarloosbaar was voor het 'geen-schade'-criterium. Van der Meer stelt dat, als 1000 golven het element niet kunnen verplaatsen, dan kunnen 2000 golven dat ook niet. Als enige schade in ogenschouw wordt genomen, wordt de schade een functie van de stormduur. Net als bij stortsteen blijkt er enige invloed van de golfperiode (langere golfperiode, betere stabiliteit) te zijn. Wel dient opgemerkt te worden dat de golfperiode geen invloed op de stabiliteit heeft als er met  $S$  gewerkt wordt en enige invloed heeft als  $N_{od}$  gebruikt wordt. Verder blijkt dat 'start-van-schade' voor kubussen en stortsteen praktisch gelijk is. Het acceptabele schadeniveau voor kubussen is lager dan voor stortsteen. De volgende stabiliteitsformule is afgeleid voor betonkubussen (Van der Meer 1986<sup>a</sup>).

$$\frac{H_s}{\Delta D_n} = \left( 6,7 \frac{N_o^{0,4}}{N^{0,3}} + 1,0 \right) s_{om}^{-0,1} \quad (3.12)$$

Aan de hand van het onderzoek van De Jong (De Jong 1996) (zie paragraaf 3.3.3) stelde Van der Meer een vergelijking op voor kubussen, waarin rekening werd gehouden met de kruinhoogte en de plaatsingsdichtheid (Van der Meer 1999).

$$\frac{H_s}{\Delta D_n} = \left( 6,7 \frac{N_o^{0,4}}{N^{0,3}} + 1,0 f(\phi) \right) s_{om}^{-0,1} f\left(\frac{R_c}{D_n}\right) \quad (3.13)$$

De invloed van de plaatsingsdichtheid is uitgedrukt in de functie  $f(\phi)$ . Deze functie is gelijk aan:

$$f(\phi) = 0,4 + 0,61 \frac{\phi}{\phi_{SPM}} \quad (3.14)$$

De parameter  $\phi$  stelt de plaatsingsdichtheid voor en  $\phi_{SPM}$  is de plaatsingsdichtheid, zoals gegeven in het Shore Protection Manual (CERC 1984).

$$\phi = n * k_{\Delta} (1 - n_v) \quad (3.15)$$

$n$ = aantal 'armour layers' [-]

$k_{\Delta}$ = laagdiktecoëfficiënt [-]

$n_v$ = volumieke porositeit [-]

De volumieke porositeit volgt uit de volgende vergelijking (CUR 1995):

$$n_v = 1 - \frac{\rho_{bulk}}{\rho_a} \quad (3.16)$$

$\rho_{bulk}$ = bulkdichtheid [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\rho_a$ = soortelijke dichtheid 'armour layer' element [ $\text{kg/m}^3$ ]

### 3.2.3 Bhageloe

Net als voor breuksteen heeft Bhageloe (Bhageloe 1998) kubussen in één enkele 'armour layer' onderzocht. Om de situatie in de werkelijkheid na te bootsen werden de kubussen willekeurig geplaatst. De uit het onderzoek gebleken schadeniveaus zijn weergegeven in tabel 3.5.

Tabel 3.5: Stabiliteitsniveaus voor kubussen in een enkele laag ( $H_s/\Delta D_n$ )

Talud	'Geen-Schade' [-]	'Start-van-schade' [-]	Schade(herstel nodig)[-]	Bezwijken [-]
1:1,5	2,15	2,8	3,0	3,2

Uit de resultaten volgde dat kubussen die in beweging kwamen meteen naar de bodem rolden. Schade ontstond over het algemeen onder SWL. De gaten werden opgevuld door andere kubussen, wat weer tot een dichtere pakking leidde in de onderste lagen. De enkele 'armour layer' bleek zeer stabiel, maar vertoonde wel progressief bezwijkgedrag. Bhageloe testte in zijn onderzoek verschillende golfsteilheden en het bleek dat de minimale stabiliteit optrad bij een golfsteilheid van 0,05. Er werd gebruik gemaakt van een volumieke porositeit van 0,28.

Uit het onderzoek blijkt dat bij 'geen-schade' de ribben van de kubussen bij één enkele 'armour layer' 40% kleiner uitgevoerd kunnen worden. Dit levert ongeveer drie keer kleinere elementen op en dus een mogelijke kostenreductie. De totale betonbesparing wordt 60%, alhoewel er wel rekening moet worden gehouden met meer materiaal in de kern. Wel wordt er aanbevolen onderzoek te doen naar de haalbaarheid van de toegepaste plaatsingsdichtheid.

### 3.2.4 Van Gent en Spaan

Voortbouwend op het werk van Bhageloe hebben Van Gent en Spaan (Van Gent e.a. 1998) verder onderzoek gedaan naar kubussen in een enkele 'armour layer'. De gebruikte opstelling is weergegeven in bijlage I. Onderzocht werden verschillende golfsteilheden, filterlagen, plaatsingsdichtheden en kruinhoogtes. Bij toepassing van een ruimere plaatsingsdichtheid ( $n_v=0,4$ ) bleek dat deze ongeschikt was, omdat deze een relatief grote schade tot gevolg had. Zetting van de 'armour layer' vond plaats, wat inhoudt dat beneden SWL de 'armour layer' compacter wordt dan boven SWL. Bij een plaatsingsdichtheid van 0,3 (hetzelfde als toegepast door Bhageloe) bleek er ook sprake te zijn van zettingen, maar dit leidde niet tot gaten zoals bij  $n_v=0,4$ , aangezien deze zich in dit geval bij de kruin concentreerden. Verder onderzoek werd gedaan met een grotere plaatsingsdichtheid ( $n_v=0,25$ ). Resultaat hiervan was een grotere stabiliteit en bovendien werd er wederom progressief bezwijkgedrag waargenomen. Voor de verschillende toegepaste plaatsingsdichtheden bleek slechts een gering verschil aanwezig te zijn tussen de schadeverlopen.

Wat filters betreft kan er gezegd worden dat in golfbrekers met een dubbele 'armour layer' de stabiliteit van de 'armour layer' afneemt als de doorlatendheid van de filterlaag kleiner is. Kleinere stenen leveren ook een vlakker talud. Uit de waarnemingen volgde dat bij het fijne filter sprake was van veel uitspoeling. Bij het ruwe filter lagen de kubussen minder stabiel. Geconcludeerd werd dan ook dat het middelste filter ( $M_{50,a}/M_{50,f} = 10-20$ ) het meest geschikt was. Deze conclusies zijn op visuele waarnemingen gebaseerd en niet op het schadeverloop op basis van het stabiliteitsgetal  $H_s/(\Delta D_n)$ .

Een lage waterstand blijkt in combinatie met de juiste filterlaag en plaatsingsdichtheid een zeer stabiele situatie voor de kubussen te leveren. Bij een hoge waterstand treedt er eerder schade op en bezwijkt de constructie sneller. Van Gent en Spaan verklaren dit aan de hand van de verhouding  $H_{2\%}/H_s$ .  $H_{2\%}$  is de golfhoogte die slechts door 2% van de golven wordt overschreden. Bij een lage waterstand daalt deze verhouding bij toename van de golfhoogte. Bij een hoge waterstand blijft deze verhouding constant. Het gevolg is dat bij laag water de constructie minder door hoge golven wordt belast. Bij een hoge waterstand is er ook sprake van minder progressief bezwijkgedrag.

De onderzoeksresultaten kwamen overeen met de resultaten van Bhageloe met als verschil:

- schade bij iets lagere golfhoogte
- verschil in schade tussen golfsteilheden minder

De oorzaak hiervan wordt gezocht in de verschillende golfspectra die zijn toegepast en enige verschillen tussen beide proefopstellingen.

De invloed van de golfsteilheid is niet duidelijk geworden aan de hand van de proeven van Van Gent en Spaan. Meestal bleek een golfsteilheid van 5% maatgevend, alhoewel deze soms juist tot de meest stabiele situatie leidde.

Van Gent en Spaan maken ook een vergelijking met een dubbele ‘armour layer’. Hieruit blijkt dat ‘start-van-schade’ en bezwijken bij één enkele ‘armour layer’ veel later optreedt.

Golfbrekers met één enkele ‘armour layer’ bestaande uit kubussen ontleen hun sterkte aan het gewicht van de kubussen, de contactkrachten tussen de kubussen en minder golfaanval als gevolg van een gladder oppervlak. Dit laatste veroorzaakt wel meer golfoverslag en transmissie. Opgemerkt wordt dat schaaffecten als gevolg van permeabiliteit en wrijving tussen de kubussen mogelijk een rol kunnen spelen.

Van der Meer merkt op dat golfbrekers met één enkele ‘armour layer’ van kubussen weliswaar stabiel zijn aan de zeezijde, maar een aanval op de kruin niet kunnen weerstaan (Van der Meer 1999). Hij baseert dit echter niet op metingen, maar op een verwachting op grond waarvan vooralsnog wordt aanbevolen dat toepassing van één enkele ‘armour layer’ alleen zou moeten worden overwogen als de overslag gelimiteerd is tot minder dan 10%.

### 3.2.5 Hoge dichtheid beton

Triemstra (Triemstra 1999) onderzocht of de stabiliteitsformules voor golfbreker ‘armour layer’ elementen ook geldig waren in geval van hoge dichtheden. Onderzocht werden elementen met een dichtheid tot  $4000 \text{ kg/m}^3$ . Invloed van de dichtheid kan met de volgende formule worden weergegeven:

$$\frac{H_s}{\Delta_1 D_1} = \frac{H_s}{\Delta_2 D_2} \quad (3.17)$$

Gebruik van  $4000 \text{ kg/m}^3$  in plaats van  $2200 \text{ kg/m}^3$  levert dan een reductie van de diameter op met een factor 2,5 en een reductie van het gewicht met een factor 8,6. In zijn onderzoek gebruikte Triemstra twee plaatsingsmethodes. Plaatsing met de hand en het dumpen van de kubussen, waarna enige herschikking met de hand plaatsvond. Normale-dichtheid kubussen vertoonden zettingen na plaatsing met de hand met als gevolg een constant plaatsingspatroon. Door deze zettingen trad uiteindelijk telkens dezelfde plaatsing op. Hoge-dichtheid kubussen vertoonden dit gedrag niet. Dit leverde dus een meer willekeurige plaatsing op. Hetzelfde fenomeen trad op bij het dumpen van kubussen. De verklaring hiervan is waarschijnlijk gelegen in de verschillende wrijvingscoëfficiënten van de elementen. Om de verschillende plaatsingen te vergelijken introduceerde Triemstra het begrip plaatsingsruwheid. Hiermee kan de specifieke ligging van de elementen worden beschreven.

Geconcludeerd werd dat de lineaire relatie tussen  $H_s/D$  en  $\Delta$  geldig is voor dichtheden tot  $4000 \text{ kg/m}^3$ . De macht voor  $\Delta$  is dus nog steeds 1.

Ook Van Gent en Kuiper (Van Gent e.a. 2000) hebben kubussen met een hoge dichtheid onderzocht. In hun onderzoek varieerden zij golfhoogte, golfsteilheid, waterniveau, plaatsingsdichtheid, filtermateriaal en kruinhoogte.

Gedurende het onderzoek bleken bij  $s_{om} = 0,04$  de 'armour layer' en de filterlaag bij een golfaanval af te schuiven over het kernmateriaal. Als mogelijke oorzaken hiervoor werden genoemd:

- het gewicht van de 'armour layer' veroorzaakte zoveel druk op de berm, dat de wrijving tussen de berm en de bodem te klein werd;
- gedurende de golfterugloop werd de 'armour layer' lichtelijk opgetild door de waterdruk van binnenuit wat leidde tot een lagere wrijving tussen het materiaal in de regio van de top en de filterlaag

Om de eerste oorzaak uit te sluiten werd de berm vervangen door een gefixeerde berm. Deze maatregel bleek voldoende.

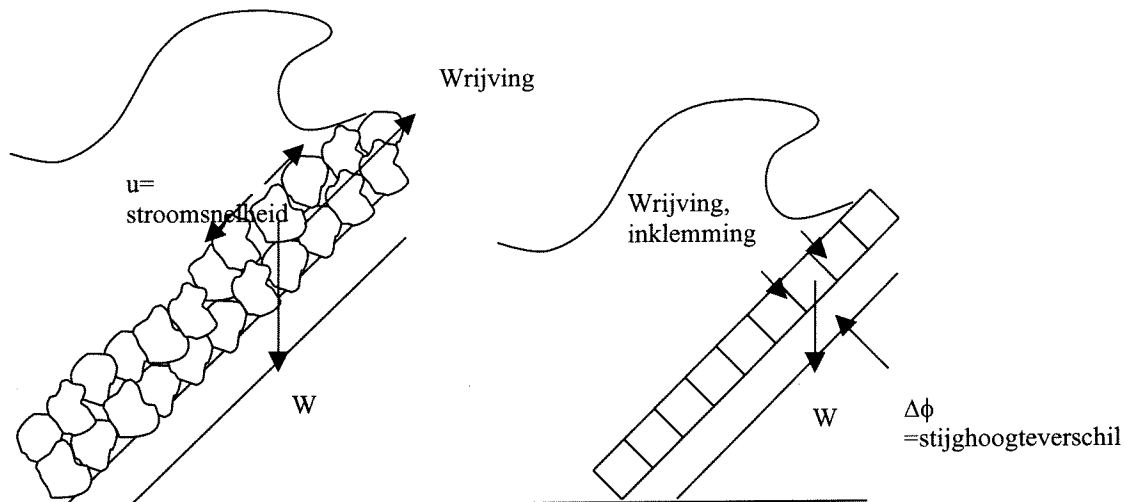
Wederom bleek een plaatsingsdichtheid van 0,4 niet haalbaar. Voor  $n_v = 0,25$  en  $n_v = 0,3$  trad 'start-van-schade' op bij de laagste golfsteilheid. De tendens was dat lagere golfsteilheden bij lagere golfhoogten 'start-van-schade' gaven. Fijner filtermateriaal leidt tot een lagere permeabiliteit en daarom lagere stabiliteit. Grover filtermateriaal leidt tot een onregelmatigere 'armour layer', waardoor meer golfaanval optreedt op de individuele elementen. De invloed van de onregelmatigheid is groter dan de invloed van de permeabiliteit.

### *3.2.6 Zetsteenbekleding als gevolg van een hoge plaatsingsdichtheid*

Het verhogen van de plaatsingsdichtheid bij kubussen leidt tot het ontstaan van een 'armour layer', die veel overeenkomsten vertoont met een zetsteenbekleding. Als er steeds meer kubussen steeds dichter op elkaar worden geplaatst is het onvermijdelijk dat op een gegeven moment deze situatie ontstaat. Dit verschijnsel werd ook vastgesteld bij het onderzoek van Van Gent en Spaan (Van Gent e.a. 1998). Optredende 'armour layer'-vormen kunnen nu worden opgedeeld in twee categorieën.

- Los gestort, open, doorlatend
- Coherent, semi-permeabel.

De laatste vorm komt overeen met een zetsteenbekleding. In figuur 3.2 zijn deze twee categorieën weergegeven.



Figuur 3.2: Schematisatie stortsteen 'armour layer' en bekleding

Als voordelen van een zetsteenbekleding kunnen worden genoemd:

- golfloop en golfterugloop oefenen weinig belasting uit op de constructie; dit komt door de gladde bovenkant en de geringe doorlatendheid;
- de blokken kunnen als gevolg van inklemming onderling krachten op elkaar overbrengen.

Er worden drie mechanismen onderscheiden waarop een 'armour layer' in het geval van een zetsteenbekleding kan bezwijken.:

- afschuiven van de 'armour layer';
- een element wordt uit de armour layer opgelicht;
- beweging van een los element als gevolg van onvoldoende wrijving tussen de kubussen.

Om de belastingen veroorzaakt door deze faalmechanismen en het bezwijkmoment te berekenen zijn methoden ontwikkeld. Deze zijn achterin dit rapport onder 'A rekenmethode zetsteenbekleding' weergegeven. Gekozen is voor de rekenmethode van Wolsink-Banach vanwege de eenvoud hiervan. Door het gebrek aan informatie over veel relevante parameters werd er gekozen voor een eenvoudige methode. In verband met de beschikbare tijd is de methode zelf niet kritisch onderzocht.

### 3.3 Tetrapoden

#### 3.3.1 Invloed van de haakweerstand

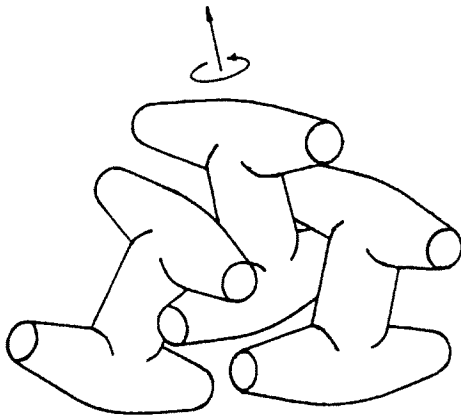
Elementen als tetrapoden ontleen hun sterkte aan hun haakweerstand. Door op elkaar in te haken zijn ze in staat tezamen een grotere sterkte te behalen dan als los element. Als de stroming van water dezelfde krachten op alle elementen zou uitoefenen, zou de haakweerstand niet bijdragen aan de stabiliteit van de individuele elementen. Bij overschrijding van de kritieke snelheid worden dan al deze elementen verplaatst. Golfenergie is echter geconcentreerd op een aantal punten. Alleen de elementen die zich op deze posities bevinden ondervinden deze krachten. Als ze inhaken op andere

elementen, die deze krachten niet ondervinden, zullen zij hun positie behouden. Dit is het voordeel van elementen als tetrapoden en dolossen.

Indien de mate van haakweerstand bekend zou zijn, is het nog onmogelijk om te voorspellen welke kracht nodig is om een element te verplaatsen. Haakweerstand en verplaatsing vinden op een willekeurige manier plaats. Het stabiliteitsniveau van de elementen verandert continu (Alan Price 1979). Nadat het 'geen-schade' criterium is overschreden, bestaat de 'armour layer' uit elementen waarvan de stabiliteit in tijd en plaats verandert, op een willekeurige manier. Onder invloed van de golfaanval zullen elementen gaan 'rocken' en zich herschikken en kunnen vervolgens weer een volledig stabiele situatie bereiken. Op deze wijze verandert de stabiliteit van de elementen continu in tijd en plaats.

Er kan een onderscheid worden gemaakt tussen de benodigde krachten om elementen met of zonder haakweerstand te verplaatsen (Vasco Costa 1989):

- om een element zonder haakweerstand te verwijderen is een kracht nodig boven zijn gewichtscentrum loodrecht op het 'armour layer'-vlak.;
- indien sprake is van haakweerstand zijn een kracht en een moment nodig (zie figuur 3.3)(Vasco Costa 1989) .



Figuur 3.3: Kracht plus moment op een dolos, benodigd om het element te verwijderen

In figuur 3.3 is de situatie voor een dolos geschetst. Deze is echter vergelijkbaar met die voor tetrapoden, aangezien deze laatste op dezelfde wijze steun van elkaar ondervinden.

Als er eenmaal een element is verwijderd, heeft dit een verzwakking van de naburige elementen tot gevolg, aangezien zij hun stabiliteit ontlenen aan de haakweerstand, die ze ook met dit element hadden.

Hoe steiler het talud, hoe beter de inhaking van de elementen. Wat echter ook geldt is, dat hoe steiler het talud, des te sneller de spreiding van de schade plaatsvindt na de verwijdering van het eerste element.



Er is door Hattori, Yauchi en Kasahara (Hattori e.a., 1999) een methode ontwikkeld om te berekenen, wanneer een element bezwijkt. Deze methode is weergegeven onder 'B rekenmethode tetrapoden' achterin dit rapport.

### 3.3.2 Van der Meer

Schade wordt op dezelfde wijze bepaald als beschreven bij kubussen. Voor tetrapoden is  $D_n$  echter gelijk aan  $0,65h$  ( $h$  = hoogte van de tetrapode). In tabel 3.6 zijn de schadeniveaus voor tetrapoden weergegeven.

Tabel 3.6: Stabiliteitsniveaus voor tetrapoden in een dubbele laag ( $H_s/\Delta D_n$ )

Talud	'Geen- Schade' [-]	'Start-van-schade' [-]	Schade(herstel nodig)[-]	Bezwijken [-]
1:1,5	0	0-0,5	0,5-1,5	>1,5

De conclusies van het onderzoek door Van der Meer (Van der Meer 1988) zijn dat de invloed van de golfperiode en de stormduur groter is dan bij kubussen. Zowel  $S$  als  $N_{od}$  worden er door beïnvloed. De stabiliteit neemt toe met langere golfperioden en neemt af met langere stormduur. Verder is de initiële stabiliteit hoger dan die van kubussen en stortsteen. Net als bij kubussen geldt dat de hoeveelheid toegestane schade lager is dan voor stortsteen. Dit resulteert in de volgende vergelijking.

$$\frac{H_s}{\Delta D_n} = \left( 3,75 \frac{N_o^{0,5}}{N^{0,25}} + 0,85 \right) s_{om}^{-0,2} \quad (3.18)$$

### 3.3.3 De Jong

De Jong (De Jong 1996) heeft onderzoek gedaan naar golfbrekers met een lage kruin met een 'armour layer' van tetrapoden. Het streven was om de vergelijking van Van der Meer op zodanige wijze uit te breiden dat er rekening zou worden gehouden met een variabele kruinhoogte en een variabele plaatsingsdichtheid. Het voordeel van een golfbreker met een lage kruin is dat er meer overslag en dus aanval op meer delen van de golfbreker plaatsvindt. Dit levert een stabielere golfbreker op, aangezien de golfenergie over een groter gebied wordt gedissipeerd. Van der Meer vond een reductiefactor voor de benodigde diameter van breuksteen  $D_{n50}$  afhankelijk van de kruinhoogte,  $R_c/H_{si}$ , en de piekgolfsteilheid op diep water  $s_{op}$ . Burger (zie paragraaf 3.1.4) ontdekte dat dit niet klopte. Stabiliteit blijft hetzelfde totdat de kruinhoogte op het waterniveau ligt. Pas als de kruin onder het waterniveau komt, vindt er een reductie van  $D_{n50}$  plaats.

In zijn onderzoek concludeert De Jong dat de volgende parameters de schade  $N_{od}$  bij golfbrekers met een lage kruin beschrijven:

- significante, inkomende golfhoogte  $H_{si}$
- gemiddelde golfperiode  $T_m$
- aantal golven  $N$
- kruinhoogte  $R_c$  ten opzichte van de waterlijn

- nominale diameter van de ‘armour layer’ elementen  $D_n$
- plaatsingsdichtheid uitgedrukt in laagdiktecoëfficiënt  $k_\Delta$
- soortelijke dichtheid beton  $\rho_b$

De volgende dimensieloze parameters zijn gebruikt:

- relatieve kruinhoogte  $R_c/D_n$
- stabiliteitsgetal  $H_{si}/\Delta D_n$
- fictieve golfsteilheid  $s_{om}$

Negatieve kruinhoogte is het beste voor stabiliteit. Hieronder wordt verstaan dat de kruin zich onder de waterlijn bevindt. De meeste schade vindt plaats bij een hoge kruin, omdat alle golfenergie hierop moet worden gedissipeerd.

Lage golfsteilheid geeft meer schade dan hoge golfsteilheid bij dezelfde golfhoogte. Dit is niet dezelfde conclusie als uit de Van-der-Meer vergelijking volgt. Deze was namelijk gebaseerd op een lage fictieve golfsteilheid van  $s_{om} < 0,03$ . Waarschijnlijk geldt dezelfde invloed zowel voor tetrapoden als voor breuksteen. Dus een verschil tussen ‘plunging’ en ‘surging’ is mogelijk. Een verklaring voor het  $s_{om}$ -effect op de stabiliteit is dat voor  $s_{om} > 0,035$  de snelle golfloop na het breken van de golf bepalend is voor de stabiliteit. De krachten gedurende golfsterugloop zijn vrij klein. Aangezien een toename van  $s_{om}$  leidt tot een afname van de golfloop, zal de schade ook minder zijn. De invloed van  $s_{om}$  is onafhankelijk van de kruinhoogte  $R_c$  en de waterdiepte.

Aangezien het aantal tetrapoden per vierkante meter afhankelijk is van de nominale diameter, is het beter om de laagdiktecoëfficiënt  $k_\Delta$  te gebruiken om de plaatsingsdichtheid te bekijken. Een afnemende laagdiktecoëfficiënt, die leidt tot minder haakweerstand tussen de tetrapoden, leidt tot toename van de schade.

De variatie van de waterdiepte is niet van invloed op de ontwikkeling van de schade.  $H_s$  is een goede maat voor de maximale golfhoogte.

De Jong stelde een nieuwe formule op voor de stabiliteit van tetrapoden. De formule is ook geschikt voor hoge golfsteilheden. Net als bij breuksteen wordt er onderscheid gemaakt naar de manier van breken. Voor een hoge  $s_{om}$  leidt toename van  $T_m$  (en dus afname van  $s_{om}$ ) tot toename van het schadegetal  $N_{od}$ . Dit resulteert in een afname van  $N_s$ .

‘Surging’ golven

$$\frac{H_s}{\Delta D_n} = \left( 3,75 \left( \frac{N_{od}}{\sqrt{N}} \right)^{0,5} + 0,85 f(\phi) \right) s_{om}^{-0,2} f \left( \frac{R_c}{D_n} \right) \quad (3.19)$$

'Plunging' golven

$$\frac{H_s}{\Delta D_n} = \left( 8,6 \left( \frac{N_{od}}{\sqrt{N}} \right)^{0,5} + 3,94 f(\phi) \right) s_{om}^{0,2} f \left( \frac{R_c}{D_n} \right) \quad (3.20)$$

De functie  $f(\phi)$  beschrijft de plaatsingsdichtheid en heeft de gedaante van vergelijking 3.14. De invloed van de kruinhoogte wordt met de volgende vergelijking weergegeven.

$$f \left( \frac{R_c}{D_n} \right) = 1 + 0,17 e^{\left( -0,61 \frac{R_c}{D_n} \right)} \quad (3.21)$$

### 3.3.4 Bhageloe

Ook voor tetrapoden in één enkele 'armour layer' werd door Bhageloe (Bhageloe 1998) een onderzoek uitgevoerd. De bezwijkcriteria die hiervoor werden gevonden staan in tabel 3.7. Tetrapoden vertonen een progressief bezwijkgedrag.

Tabel 3.7: Stabiliteitsniveaus voor tetrapoden in een enkele laag  $H_s/(\Delta D_n)$

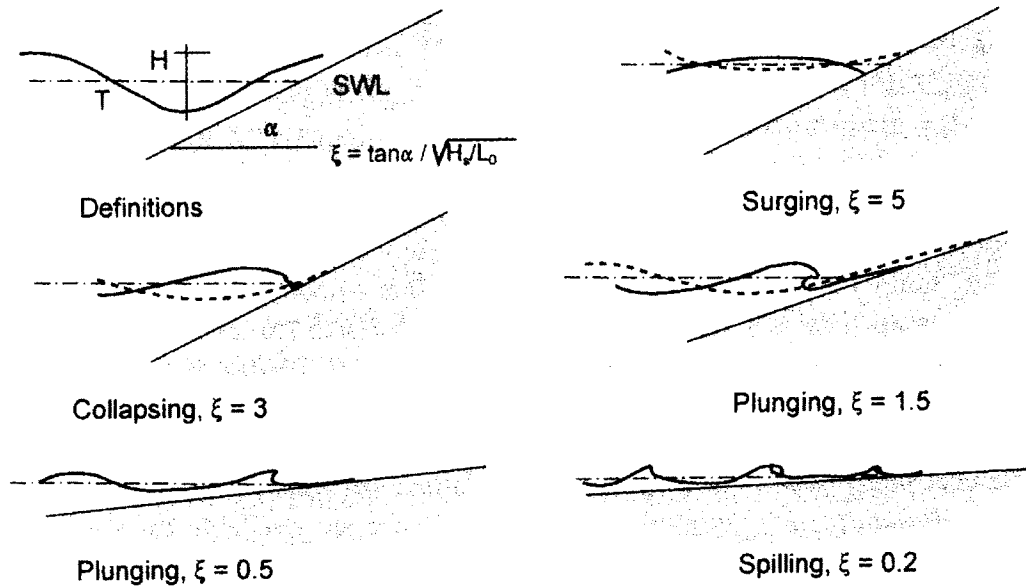
Talud	'Geen- Schade' [-]	Schade(herstel nodig)[-]	Bezwijken [-]
1:1,5	0,8	1,2	1,2

Uit dit onderzoek volgde dat tetrapoden in één enkele 'armour layer' in vergelijking met een dubbele 'armour layer' 6,6 keer zwaarder en 1,8 keer groter uitgevoerd moesten worden. Dit resulteerde in een betonbesparing van 28%. De toegepaste porositeit bij deze proeven was echter 62%, wat bijzonder hoog genoemd kan worden. Ook kunnen er problemen met deze grote elementen ontstaan ten aanzien van de structurele sterkte.

Ook bij tetrapoden blijkt de schade rond SWL te beginnen. In tegenstelling tot kubussen blijken weggeslagen elementen op de laag eronder te blijven liggen en hier een stabiele dubbele laag te vormen. De minimum stabiliteit van tetrapoden vindt plaats bij een waarde van  $s_{om}$  tussen 0,020 en 0,045.

### 3.4 Invloed van het talud op de stabiliteit

De brekerparameter wordt gebruikt om onder andere de invloed van het talud weer te geven. Naast de taludhelling worden hiermee ook het brekertype en de golfoploop gekarakteriseerd. Het brekertype bepaalt of een golf met grote kracht op de 'armour layer' klappt of juist een grote golfoploop dan wel golfterugloop vertoont. De terugloop bepaalt de locatie van de golfklap en de locatie waar de constructie van binnenuit het zwaarst wordt belast op druk. De brekerparameter verdeelt golven in 'spilling', 'surging', 'plunging' en 'collapsing' golven. Deze verschillende vormen zijn weergegeven in figuur 3.4 (Schiereck 1998).



Figuur 3.4: Golftypen

Experimenten (Alan Price 1979) hebben aangetoond dat de gemiddelde kracht die benodigd is om een element te verwijderen onafhankelijk is van de positie van het element als dit zich in de bovenste laag van de ‘armour layer’ bevindt. Voor de onderste laag van de ‘armour layer’ is er een toename voor elementen onder aan de helling, maar het verschil is vrij gering.

De elementen in de bovenste laag worden losser gemaakt door de hoge snelheden in de jet van een brekende golf. Dit initieert het ontstaan van ‘rocking’. ‘Collapsing’ golven worden gezien als de golven die de meeste schade toebrengen aan een golfbreker. Deze breken op het punt van maximale golfsterugloop. De maximale golfsterugloop met 2 % overschrijding wordt wel gedefinieerd als (Schiereck 1998):

$$R_{d2\%max} = -1.5H_s \tag{3.22}$$

Deze formule geldt voor onregelmatige golven. Als er naar een golf wordt gekeken, bijvoorbeeld in het geval dat de stabiliteit tegen oplichten berekend moet worden, kan de golfsterugloop voor regelmatige golven worden gebruikt:

$$R_d = H(1 - 0.4\xi_m)\xi_m \tag{3.23}$$

$\xi_m$  = brekerparameter [-]

Flauwere taluds vergroten de stabiliteit. De brekerparameter neemt af met als resultaat een afname van het aantal ‘collapsing’ golven. ‘Plunging’ golven treden nu veel vaker op, maar deze zijn veel minder schadelijk. Een andere reden waarom de stabiliteit van de constructie toeneemt is dat de elementen veel stabielere liggen. Bij verflauwing van het talud neemt de destabiliserende zwaartekrachtcomponent af en de stabiliserende zwaartekrachtcomponent toe. De andere factoren blijven constant.

### 3.5 Conclusies aan de hand van het voorgaande onderzoek

Concluderend kan gezegd worden dat onderzoek naar elementen in één 'armour layer' vereist is. Het blijkt dat hierbij een groot voordeel behaald kan worden met betrekking tot materiaalbesparing. Variatie in de plaatsingsdichtheid blijkt uit onderzoeken van Van Gent en Spaan (Van Gent e.a. 1998) en Bhageloe (Bhageloe 1998) zeer interessant. Verder onderzoek kan zich het beste richten op de meest toegepaste elementen in de praktijk en op de elementen, die bij voorgaande onderzoeken zijn toegepast. Het gaat in dit geval om kubussen, tetrapoden en breuksteen.

Uit het onderzoek van Bhageloe volgt dat een talud van 1:1,5 te steil is voor breuksteen in een enkele 'armour layer'. Onderzoek naar flauwere taluds is dan ook vereist. Het onderzoek van Hald, Tørum en Holm-Karlsen (Hald e.a. 1998) geeft betere resultaten voor de stabiliteit in het geval van 'ordelijke' plaatsingsmethoden. Verder onderzoek naar de toepassing van verschillende plaatsingsmethoden is aan te raden.

Opgemerkt dient te worden dat Van Gent in zijn onderzoek al verschillende plaatsingsdichtheden heeft onderzocht voor een enkele 'armour layer' van kubussen. Verschillende plaatsingsdichten bij een dubbele 'armour layer' is echter nog niet onderzocht. De mogelijkheid bestaat dat 'armour layers' van kubussen in het geval van hoge plaatsingsdichtheden zich zullen gaan gedragen als zetsteenbekledingen. Van Gent merkt dit al op in zijn onderzoek (Van Gent e.a. 1998).

Tetrapoden blijken volgens het onderzoek van Bhageloe erg instabiel. In dit onderzoek is echter een zeer ruime plaatsingsdichtheid gebruikt. Het is aan te raden om bij verder onderzoek grotere plaatsingsdichtheden te gebruiken.

Verder dient in verder onderzoek de invloed van de verschillende typen golven op het optreden van verschillende typen faalmechanismen geobserveerd te worden.

## 4. Plaatsing

### 4.1 Algemeen

Stabiliteit wordt in grote mate beïnvloed door de manier van plaatsing. Elementen verkrijgen immers niet alleen hun stabiliteit door hun gewicht, maar tevens door de grootte van de haakweerstand. Van belang is ook het aantal toegepaste lagen voor de ‘armour layer’. Traditioneel werd gewerkt met twee lagen, maar recentelijk is er veel onderzoek gedaan naar golfbrekers met één enkele ‘armour layer’. Tevens zijn er elementen ontworpen speciaal voor het gebruik als enkele ‘armour layer’, zoals de accropode. Een methode om het aantal benodigde elementen te bepalen voor de ‘armour layer’ is gegeven in de volgende formule (CERC 1984).

$$N_a = \frac{nk_\Delta(1 - n_v)}{D_n^2} \quad (4.1)$$

$N_a$  = aantal elementen per  $m^2$  [ $m^{-2}$ ]

Een andere methode is om het aantal elementen te bepalen aan de hand van de gewenste plaatsingsdichtheid  $n_v$  en de  $D_{n50}$ , zoals in de volgende vergelijkingen is weergegeven. Deze methode is gebruikt door Van Gent en Spaan (Van Gent e.a. 1998). In principe is het dezelfde methode als gebruikt in vergelijking 4.1. Het enige verschil schuilt in het feit dat er geen rekening wordt gehouden met de laagdiktecoëfficiënt en het aantal lagen. Het is een zeer geschikte methode om van tevoren de laagdikte en het aantal elementen te bepalen. Vervolgens kunnen na plaatsing de werkelijk opgetreden waarden worden gemeten. Met deze waarden kunnen vervolgens de werkelijke porositeit en de laagdikte  $d_a$  worden bepaald.

$$d_a = n(1 - n_v)D_{n50} \quad (4.2)$$

$$N_a = \frac{d_a}{D_{n50}^3} \quad (4.3)$$

Er bestaat veel onduidelijkheid over de methode om het totale aantal geplaatste elementen te bepalen. Bregman (Bregman 1998) heeft hier onderzoek naar gedaan, waarbij overigens alleen naar breuksteen is gekeken. Hierbij heeft Bregman gekeken naar:

- ontwerpparameters
- materiaaleigenschappen
- plaatsingsmethode
- surveymethode
- invloed onderliggende lagen
- tijd-gerelateerde invloeden

## 4.2 Porositeit

De porositeit van de steenlaag is afhankelijk van de steilheid van de gradering, de plaatsing, de vorm van de elementen en de surveymethode. De porositeit is een onduidelijke parameter, aangezien verschillende richtlijnen andere waarden geven voor deze porositeit. Bovendien wordt er geen rekening gehouden met alle waarden waar de porositeit afhankelijk van wordt verondersteld, zoals plaatsings- en surveymethode. Alleen de CUR/CIRIA handleiding (CUR 1995) houdt rekening met de plaatsingsmethode. Maar ook over de methode waarop hier rekening wordt gehouden met de plaatsing bestaat de nodige twijfel (Bregman 1998).

## 4.3 Laagdikte

Met de laagdiktecoëfficiënt wordt getracht het laagdikte-effect mee te nemen. Deze wordt gebruikt bij meerdere lagen, omdat bijvoorbeeld bij twee lagen de totale laagdikte niet eenvoudig op  $2 D_{n50}$  kan worden gesteld. De coëfficiënt hangt af van de vorm van de elementen en de plaatsingsmethode. Ook over de waarden van de laagdiktecoëfficiënt bestaat de nodige onenigheid. Wederom wordt bij de bepaling van de waarden van de laagdiktecoëfficiënt geen rekening gehouden met de survey- en de plaatsingsmethode. Alleen de CUR/CIRIA handleiding (CUR 1995) neemt de plaatsingsmethode mee.

Zeer belangrijk bij de bepaling van de laagdikte is de definiëring van de bovenkant van de 'armour layer'. Worden bij de survey de uiterste toppen van de elementen gemeten of wordt er juist in de openingen tussen de elementen gemeten. Dit levert twee verschillende diktes op. Een eenduidige definitie voor de laagdikte is er niet.

Bregman (Bregman 1998) suggereert de volgende methode om de laagdiktecoëfficiënt te bepalen. Na bepaling van de  $D_{n50}$  dient één laag aangebracht te worden van deze steenstukken. Hiervan wordt de dikte bepaald door een profielmeting, waarna een tweede laag wordt aangebracht van identieke elementen. Van deze dubbele laag wordt de dikte weer bepaald. Dit proces kan voor meer lagen herhaald worden, waarna er een goede waarde voor de laagdiktecoëfficiënt kan worden bepaald. Bregman raadt wel aan om dit onderzoek op ware grootte uit te voeren.

## 4.4 Materiaaleigenschappen

Eigenschappen welke van invloed zijn, zijn hieronder opgesomd:

- specifieke dichtheid
- natuurlijke gesteldheid
- steilheid gradering
- vorm elementen

Specifieke dichtheid beïnvloedt de porositeit, aangezien het lijkt alsof er veel meer materiaal (in gewicht) in de laag is opgenomen. Uit berekeningen volgt dan een veel lagere porositeit (Gauss e.a. 1995). In huidige rekenmethoden wordt hier wel

voldoende rekening mee gehouden. Als gevolg van de natuurlijke gesteldheid (graad van verwerking) zal er veel fijn materiaal ontstaan, wat weer een afnemende porositeit tot gevolg heeft.

De invloed van de gradering is zelden onderzocht. Alleen voor zand is dit onderzocht. Hierbij is wel gekeken naar de verhouding  $D_{60}/D_{10}$ , terwijl voor steen de waarde  $D_{85}/D_{15}$  gebruikt wordt. Geconcludeerd wordt dat een bredere gradering een afname van de porositeit tot gevolg heeft. Bregman (Bregman 1998) concludeert ook dat de steilheid van de gradering vóór verdichting een grotere invloed heeft dan nadat de verdichting is toegepast. De steilheid blijkt bovendien bij iedere vormklasse dezelfde invloed te hebben. Na het verdichten vindt er een 3% afname plaats van de porositeit. Verder blijkt dat bij een toename van de verhouding  $W_{85}/W_{15}$  de invloed van verdichten op de porositeit afneemt.

Bregman vermeldt ook dat er zelden onderzoek is gedaan naar de vorm van de elementen. Na onderzoek concludeert Bregman dat naarmate de vorm van de steenstukken regelmatig wordt, het resultaat een lagere porositeit is. Na het verdichten neemt het verschil in porositeit iets af. De geometrische vormklasse lijkt belangrijker dan de visuele vormklasse, al kan Bregman dit niet voldoende bewijzen, aangezien er in zijn onderzoek te weinig variatie was in de visuele vormen in de geometrische vormklassen. Onder de geometrische vormklasse wordt de lengte/breedte verhouding van een element verstaan. De visuele vormklasse verdeelt elementen in onregelmatige stenen, gladde stenen, etc.

#### 4.5 Plaatsingsmethode

Bij modelonderzoek is de plaatsingsmethode een lastige factor. Het is immers moeilijk om de plaatsingsmethode, zoals deze zich in de werkelijkheid voordoet, te imiteren. Bovendien is het niet mogelijk om dit met een bepaalde waarde weer te geven. In zijn onderzoek concludeert Bregman (Bregman 1998) dat de methode van plaatsing een uiterst geringe invloed heeft. De volgende methoden zijn daarbij toegepast voor het aanbrengen van het materiaal:

- stuk voor stuk handmatig plaatsen
- laagsgewijs, waarna geheel getrild
- laagsgewijs, iedere laag afzonderlijk verdicht

#### 4.6 Surveymethode

Gauss en Latham (Gauss e.a. 1995) hebben onderzoek gedaan naar de invloed van de surveymethode op de porositeit. In hun onderzoek bepaalden zij de dikte van de steenlaag, de laagdiktecoëfficiënt, de bulkdichtheid en de porositeit aan de hand van verschillende surveymethoden. De volgende drie surveymethoden werden gebruikt:

- het profiel van de 'armour layer' wordt bepaald met het grondvlak van een bolvormig voetstuk van een baak. Dit bolvormig voetstuk heeft een diameter van  $0,5 D_{n50}$ . Er werd om de meter gemeten. Deze methode wordt aangeraden in de CUR/CIRIA handleiding (CUR 1995);



- het profiel van de 'armour layer' wordt bepaald met behulp van een conventionele baak. Het meetinterval wordt nu op 2,5 meter gezet;
- methode identiek aan de voorgaande, maar nu worden alleen de hoogste punten gemeten.

De bovenkant van de 'armour layer' varieert over het talud. Er kan onderscheid worden gemaakt in twee ruwheden (Koolwaaij e.a. 2000):

- natuurlijke ruwheid van het materiaal;
- toegevoegde ruwheid als gevolg van het ongelijkmatig plaatsen van de 'armour layer'.

Relevant voor de bepaling van de laagdikte van de 'armour layer' is de positie van de top van de filterlaag. Gauss en Latham maakten gebruik van de volgende twee methoden om deze te bepalen:

- top filterlaag is identiek aan ontwerp-tekening;
- top filterlaag wordt bepaald door middel van conventionele baak.

De conclusie van het onderzoek van Gauss en Latham is dat de meestal gebruikte porositeitswaarde van 40% veel te hoog is. De door hen gemeten waarde schommelt rond de 30%. Een verklaring hiervoor is dat vroeger waarschijnlijk altijd met de hoogste punten werd gewerkt. Als gebruik wordt gemaakt van de CUR/CIRIA methode kunnen het beste de volgende richtlijnen gebruikt worden in het geval van breuksteen:

- laagdiktecoëfficiënt van  $0,85 \pm 0,03$
- porositeit van  $31 \pm 3\%$ .

Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat deze waarden door de overige factoren, zoals plaatsingsmethode, gradering en vorm van de steenstukken, beïnvloed kan worden.

Om een goede vergelijking mogelijk te maken met voorgaande onderzoeken is het van groot belang om te weten welke surveymethoden in die onderzoeken zijn gebruikt. Het blijkt echter onmogelijk om dit te achterhalen. Bij de meeste onderzoeken wordt niet voldoende duidelijk aangegeven hoe de laagdikte is gemeten.

## 5. Experimenten

### 5.1 Schaalregels

Het te gebruiken schaalmodel wordt 'Froude geschaald'. De Froudeschaalregel geldt als de te onderzoeken processen gedomineerd worden door traagheid en zwaartekracht. Als de viscositeit dominant wordt treden er schaaffecten op. Viscositeit wordt relevant als bijvoorbeeld de doorlatendheid van het filter of de kern van belang wordt. Dit is niet het geval bij dit onderzoek. Wel dient er op te worden gelet dat de schaal van het model niet te klein wordt, want dan verliest de Froudeschaalregel zijn geldigheid.

Volgens de Froudeschaalregel wordt elke lengtemaat en snelheidshoogte op dezelfde lengteschaal weergegeven. Er is sprake van meetkundige gelijkvormigheid. Het Froudegetal is in dit geval in het model en het prototype gelijk.

Voor de opstelling van de schaalregels is gebruik gemaakt van een methode weergegeven door De Vries (De Vries 1977).

De golfsnelheid kan als volgt worden gedefinieerd:

$$c = \sqrt{\left[ \frac{gL}{2\pi} + \frac{2\pi\sigma}{\rho_w L} \right] \tanh \frac{2\pi h}{L}} \quad (5.1)$$

- c= golfsnelheid [m/s]
- L= golflengte [m]
- h= waterdiepte [m]
- $\sigma$ = oppervlaktespanning [N/m]

De invloed van de oppervlaktespanning bij het prototype kan als verwaarloosbaar worden beschouwd. Zodoende moet dit ook geldig zijn in het gebruikte model, mits de golflengte groter is dan 0,1 à 0,2 m.

De vergelijking voor de golfsnelheid reduceert dan tot:

$$c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L}} \quad (5.2)$$

In het schaalmodel is er sprake van een overgangsgebied tussen diep water en ondiep water. Er treden geen schaaffecten op in c als het argument van de hyperbolische tangens in model en prototype gelijk is. Dit houdt in dat moet gelden:

$$n_h = n_L \quad (5.3)$$

- $n_h$ = schaal waterdiepte
- $n_L$ = schaal golflengte

Er is sprake van meetkundige gelijkvormigheid, waaruit volgt dat algemeen gesteld kan worden:

$$n_G = n_H \quad (5.4)$$

$n_G$ = schaal geometrie  
 $n_H$ = schaal golfhoogte

Uit vergelijking 5.2 volgt dan dat:

$$n_c = \sqrt{n_L} = \sqrt{n_G} \quad (5.5)$$

$n_c$ = schaal golfsnelheid

Voor de golflengte geldt de volgende vergelijking:

$$L = cT \quad (5.6)$$

Hieruit volgt dat:

$$n_T = n_L * n_c^{-1} = \sqrt{n_L} = \sqrt{n_G} \quad (5.7)$$

Viskeuze krachten kunnen verwaarloosd worden zolang het Reynoldsgetal groter is dan  $4 \cdot 10^4$ . Het Reynoldsgetal is als volgt gedefinieerd:

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (5.8)$$

$U$ = snelheidsverschil [m/s]  
 $L$ = karakteristieke lengte, waarover dit snelheidsverschil optreedt [m]  
 $\nu$ = kinematische viscositeit [m<sup>2</sup>/s]= $1 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>

Het Reynoldsgetal in het filter en de 'armour layer' kan op de volgende wijze worden weergegeven:

$$Re = \frac{u_p D_p}{\nu} \quad (5.9)$$

$u_p$ = snelheid in de poriën [m/s]  
 $D_p$ = poriëngrootte =  $0,25 D_{f50}$  [m]  
 $D_{f50}$ = gemiddelde diameter filterelement

De snelheid in de poriën kan bepaald worden aan de hand van de filtersnelheid. De filtersnelheid is afhankelijk van de permeabiliteit  $k_f$  van de filterlaag en het verhang  $i$  en kan op de volgende wijze uitgedrukt worden:

$$u_f = k_f i^p \quad (5.10)$$

$k_f$ = permeabiliteit van filter =  $10^{-3} - 10^{-1}$  m/s (Schierreck 1998)  
 $i$ = verhang [-]

$p =$  constante = 1 (laminaire stroming) en 2 (turbulente stroming)

Het verhang varieert vanwege de golven met de tijd. Als er gekeken wordt naar de meest extreme situatie, waarbij het Reynoldsgetal zo groot mogelijk is, dan moet de filtersnelheid zo groot mogelijk zijn. Het verhang zou maximaal worden als de waterstand in het filter constant zou blijven en alleen de waterstand buiten de golfbreker zou variëren onder invloed van de golven. De golfhoogten variëerden gedurende de experimenten tussen de 0,05 en de 0,3 meter. Als de waterstand in de filterlaag constant verondersteld wordt rond de waterlijn, is het maximale niveauverschil gelijk aan de amplitude van de maximale golf. Aangezien de 'armour layer' niet volledig impermeabel was, kan het maximale niveauverschil op een orde van grootte van 0,1 m gesteld worden. Het verhang wordt in het meest extreme geval gelijk aan 1 gesteld. Voor de permeabiliteit wordt de grootste waarde aangenomen om zodoende de maximale filtersnelheid te kunnen berekenen. Als voor  $k_f 10^{-1}$  m/s wordt gebruikt, levert dit een filtersnelheid op van 0,1 m/s. De poriënsnelheid kan dan op de volgende wijze bepaald worden:

$$u_p = \frac{u_f}{n_f} \quad (5.11)$$

$n_f =$  porositeit van de filterlaag [-] = 0,3

De poriënsnelheid wordt dan 0,33 m/s. Dit levert een getal van Reynolds op van 1167. Dit betekent dat er sprake is van een stroming in de overgangsfase tussen laminaire en turbulente stroming in het geval van het meest extreme verhang en de grootst mogelijke permeabiliteit. Dit houdt automatisch in dat er bij ieder ander geval, waarbij de filterstroming kleiner is, ook sprake moet zijn van een overgangsfase dan wel laminaire stroming.

Een zelfde redenering kan worden gevolgd voor het getal van Reynolds voor de 'armour layer'. De afmeting van de poriën is in dit geval afhankelijk van de plaatsingsdichtheid. In het geval van een lage plaatsingsdichtheid zullen deze maximaal 1 cm zijn en in het geval van een hoge plaatsingsdichtheid zullen deze maximaal 0,5 cm zijn. Deze waarden zijn aan de hand van foto's geschat. De snelheid door de poriën wordt op maximaal 0,5 m/s geschat. Het getal van Reynolds wordt dan bij een lage plaatsingsdichtheid gelijk aan 5000 en in het geval van een hoge plaatsingsdichtheid gelijk aan 2500. In het laatste geval is er sprake van de overgangsfase tussen laminaire en turbulente stroming. Er is echter gerekend met extreme waarden en dit betekent dat de werkelijke waarde voor het Reynoldsgetal alleen maar kleiner kan zijn. Er kan dus gesteld worden dat de stroming door de 'armour layer' bij hoge plaatsingsdichtheden zich in de overgangsfase tussen laminair en turbulent zal bevinden.

In het geval van een hypothetische golfbreker met filterelementen met een  $D_n$  van 0,7 m, 'armour layer' elementen met een  $D_n$  van 2,2 m, een stroomsnelheid door de poriën van het filter van 2,3 m/s en een stroomsnelheid door de poriën van de 'armour layer' van 3,5 m/s, gelden de volgende Reynoldsgetallen:

$$\begin{aligned} Re_f &= 4 \cdot 10^5 \\ Re_a &= 1,9 \cdot 10^6 \text{ (hoge plaatsingsdichtheid)} \end{aligned}$$

Er is in het prototype sprake van turbulente stroming. De stroming door de filterlaag en de 'armour layer' in het schaalmodel kan niet zonder meer worden vergeleken met de stroming in het prototype. Er treden schaaleffecten op. In veel modelonderzoek wordt hiervoor gecompenseerd door in het model iets groter materiaal te gebruiken dan op grond van de geometrische maat. Hierdoor kunnen verhangen verkregen worden, die overeenkomen met het prototype.

Ondanks het feit dat er in het huidige onderzoek geen sprake is van modelonderzoek naar een bestaande golfbreker is het toch nuttig om de schaaleffecten te behandelen. Zo kan een idee worden verkregen of de resultaten verkregen bij het model overeenkomen met de resultaten die bij een hypothetische golfbreker op reële schaal zouden optreden.

## 5.2 Proefopstelling

### 5.2.1 Toegepaste hoofdafmetingen

Het huidige onderzoek is uitgevoerd op de Technische Universiteit Delft aan de Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen. De hier beschikbare golfgoot heeft een breedte van 0,80 meter en een hoogte van 0,85 meter. Verder heeft deze golfgoot een lengte van 40 meter. In bijlage II is een tekening van de golfgoot gegeven. In figuur 5.1 is een foto van de gebruikte golfgoot weergegeven.



Figuur 5.1: Golfgoot Laboratorium voor Vloeistofmechanica

De onderzoeken van Van der Meer, Bhageloe en Van Gent, waarmee een vergelijking zal worden gemaakt, hebben alle plaatsgevonden in het laboratorium van Delft Hydraulics. Van Gent maakte gebruik van een geometrische schaal met een orde van grootte van 1:40. Als gevolg van het gebruik van verschillende faciliteiten verschilt de opstelling van dit onderzoek enigszins met die van de voorgaande onderzoeken. Desondanks is bij het realiseren van de opstelling geprobeerd zoveel mogelijk aan te sluiten bij de opstellingen van Bhageloe en van Van Gent om een goede vergelijking met hun resultaten mogelijk te maken. In bijlage I zijn de dwarsdoorsneden van de opstellingen van Bhageloe, Van Gent en Van der Meer weergegeven.

In tabel 5.1 zijn de hoofdafmetingen weergegeven van de gebruikte proefopstelling. Hierin zijn tevens de specificaties van de gebruikte materialen weergegeven.

Tabel 5.1: Afmetingen model

Hoofdafmetingen		Waarde	Teen	Waarde	
Lengte golfgoot		40 m		$D_{n50}$	14 mm
Afstand golfschot tot constructie		31,4 m		$M_{50}$	9,5 g
Breedte constructie		0,8 m		$D_{85}/D_{15}$	1,3
Lengte voortalud		6,7 m		$n_v$	0,3
Helling voortalud		1:30	<b>Kubus</b>		
$h_0$		0,60 m		M	176 g
$h_c$		0,23 m		$D_n$	0,043 m
Talud		1:1,5 (1:2/1:3 breuksteen)		$\Delta$	1,21
$h_{kruin}$		0,9 m		$n_v$	0,25 / 0,3 / 0,4
$B_{kruin}$		0,15 m	<b>Tetrapode</b>		
$\rho_w$		1000 kg/m <sup>3</sup>		M	202 g
<b>Kern</b>				$D_n$	0,044 m
	$D_{n50}$	8,4 mm		$\Delta$	1,32
	$M_{50}$	2,65 g		$n_v$	0,3 / 0,4 / 0,5
	$D_{85}/D_{15}$	1,5	<b>Breuksteen</b>		
	$n_v$	0,3		$M_{50}$	130 g
<b>Filter</b>				$D_{n50}$	0,036 m
	$D_{n50}$	14 mm		$\Delta$	1,62
	$M_{50}$	9,5 g		$D_{85}/D_{15}$	1,2 / 1,6
	$D_{85}/D_{15}$	1,3		$n_v$	0,3 / A / B
	$d_f$	0,04 m			
	$n_v$	0,3			

$h_0$ = stilwaterdiepte bij golfschot [m]

$h_c$ = stilwaterdiepte bij teen constructie [m]

$h_{kruin}$ = hoogte van de kruin vanaf de bodem [m]

$B_{kruin}$ = breedte van de kruin [m]

A= methode A (zie paragraaf 5.3.4)

B= methode B (zie paragraaf 5.3.4)

In bijlage II zijn figuren weergegeven van de verschillende dwarsdoorsneden.

De afmetingen van de tetrapoden en de kubussen lagen vast door de beschikbaarheid van deze elementen bij Delft Hydraulics.

Verder is in bijlage IV de gradering van de breuksteen gebruikt voor ‘armour layer’, filter, teen en kern weergegeven.

Het talud vóór de golfbreker is gemaakt van cement. Na het bereiken van de gewenste hoogte, waarop de golfbreker zal worden gebouwd, wordt deze cementen constructie horizontaal doorgetrokken. De totale lengte van het horizontale deel bedraagt vier meter. Dit geeft voldoende ruimte om hierboven de golfbrekermodellen op te bouwen. De afstand van het golfschot tot aan het begin van het voortalud is zo groot mogelijk genomen. Dit is gedaan om de golven de mogelijkheid te geven om voldoende tot ontwikkeling te komen. Verder wordt er in deze proefopstelling uitgegaan van een ‘oneindig’ lang talud van de golfbreker, zodat er geen golfoverslag plaatsvindt. Aangezien alleen het voortalud onderzocht zal worden is er voor gekozen om de achterkant van de golfbreker uit te voeren als een talud van 1:1,5. Een andere optie was om de achterkant uit te voeren als verticale wand. Nadeel hiervan is dat dit opstuwing kan veroorzaken vóór de golfbreker. Om dit te voorkomen moet de wand permeabel worden gemaakt en geplaatst worden op de plek waar de fretische waterlijn onder normale omstandigheden naar buiten zou treden. Op deze wijze is de constructie dan goed gemodelleerd rond de waterlijn. Een talud van 1:1,5 is daarom een betere oplossing. Dit talud is hetzelfde uitgevoerd als het voortalud. De ‘armour layer’ bestaat hier echter in alle gevallen uit breuksteen. Voor deze breuksteen is gebruik gemaakt van breuksteen met een wijde gradering (1,6). Hierdoor hoeft dit materiaal niet voor iedere proef vervangen te worden.

### 5.2.2 Filter-, teen- en kernmateriaal

Van der Meer heeft enkele vuistregels opgesteld voor het bepalen van de afmetingen van de overige lagen van de golfbreker (Van der Meer 1993). Bhageloe (Bhageloe 1998) maakt in zijn onderzoek ook gebruik van deze regels.

- filterlaag:  $\frac{1}{25} M_{toplaag} < M_{filterlaag} < \frac{1}{15} M_{toplaag}$
- teen:  $\frac{1}{15} M_{toplaag} < M_{teen} < \frac{1}{10} M_{toplaag}$
- kern:  $D_{n50} = 0,011 \text{ m}$

$M_{\text{‘armour layer’}}$  = massa van de ‘armour layer’ (kg)

$M_{\text{filterlaag}}$  = massa van de filterlaag (kg)

$M_{\text{teen}}$  = massa van de teen (kg)

Met deze regels blijft de waarde voor de permeabiliteit  $P$  van een dubbele ‘armour layer’ gelijk aan die van een enkele ‘armour layer’. Gelet op deze regels en rekening houdende met de gewenste afmetingen voor het huidige onderzoek volgt voor het filter de volgende eis:

- kubussen  $7\text{gram} < M_{\text{filterlaag}} < 12\text{gram}$
- tetrapoden  $8\text{gram} < M_{\text{filterlaag}} < 14\text{gram}$
- breuksteen  $5\text{gram} < M_{\text{filterlaag}} < 9\text{gram}$

Van Gent (Van Gent e.a. 1998) past in zijn onderzoek drie verschillende filterlagen toe, te weten:

- grof ( $1/5 - 1/10$  van  $M_{\text{kubus}}$ )
- middel ( $1/10-1/20$  van  $M_{\text{kubus}}$ )
- fijn ( $1/50$  van  $M_{\text{kubus}}$ )

Zowel het grove als het gemiddelde filter worden in dit onderzoek geschikt bevonden. Het middelste filter is het meest te vergelijken met het door Bhageloe gebruikte filter. Gebruik makend van de hiervoor gestelde eisen volgen als afmetingen voor het filtermateriaal voor het huidige onderzoek:

- kubussen  $9\text{gram} < M_{\text{filterlaag}} < 18\text{gram}$
- tetrapoden  $10\text{gram} < M_{\text{filterlaag}} < 20\text{gram}$
- breuksteen  $7\text{gram} < M_{\text{filterlaag}} < 13\text{gram}$

Gelet op de beoogde afmetingen voor het huidige onderzoek is er voor gekozen om het door Van Gent gebruikte middelste filter toe te passen in de huidige proeven. Zodoende is wederom een vergelijk mogelijk met voorgaand onderzoek. De gegevens van het materiaal verkregen bij Delft Hydraulics, zijn:

$$D_{n50} = 14 \text{ mm}$$

$$D_{85}/D_{15} = 1,3$$

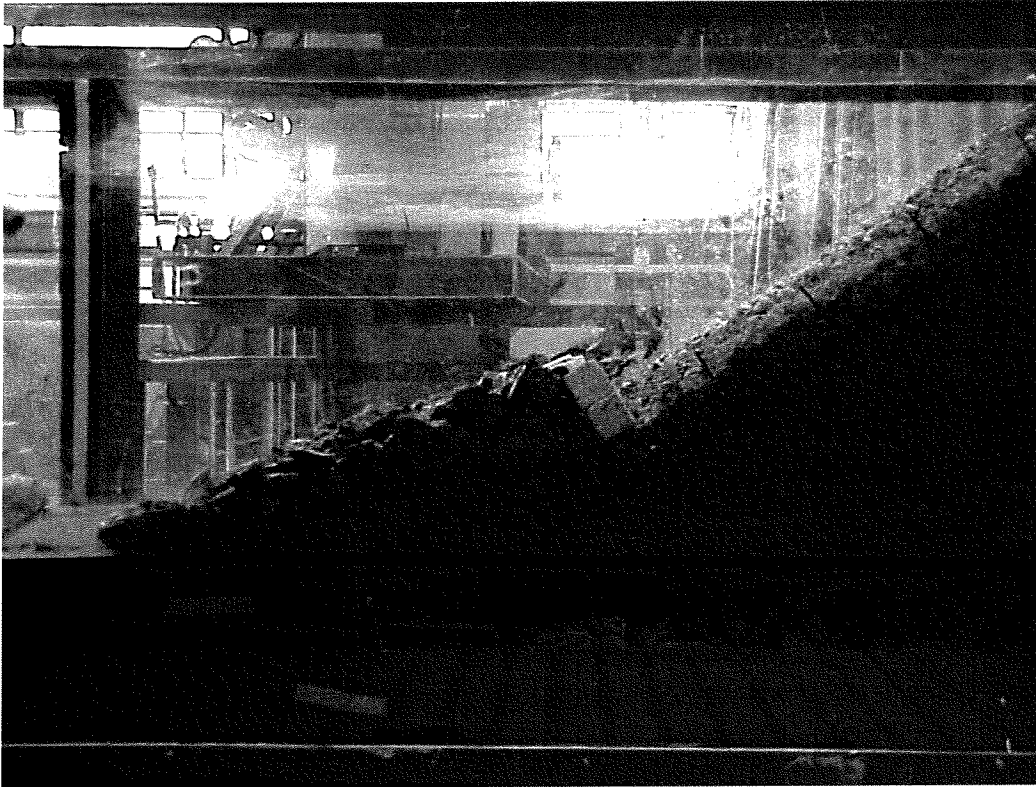
De zeefkromme is weergegeven in bijlage IV.

Voor de teen is hetzelfde materiaal gebruikt als voor het filter. Dit komt overeen met de werkwijze in voorgaande onderzoeken, zoals dat van Bhageloe.

Voor de kern zal gebruik worden gemaakt van materiaal met een  $D_{n50}$  van 8,4 mm en een  $D_{85}/D_{15}$  van 1,5. Dit is conform beide voorgaande onderzoeken (Van Gent en Bhageloe). Ook van de kern is de zeefkromme opgenomen in bijlage IV.

Tijdens de bouw van het model zijn het filter-, teen-, en kernmateriaal gestort, waarna deze met de hand zijn bijgewerkt om de gewenste afmetingen te bereiken. In figuur 5.2 wordt een zijaanzicht getoond van de golfbreker zonder 'armour layer'. De teen is op deze foto versterkt met breuksteen. Na de eerste proeven is besloten om de teen versterkt uit te voeren, omdat er teveel schade optrad aan de teen.





Figuur 5.2: Zijaanzicht golfbreker zonder 'armour layer' en met versterkte teen

### 5.2.3 Golven

Het JONSWAP-spectrum (Hasselmann e.a. 1973) is gebruikt als energiespectrum van het golfveld. Dit is ook door Van Gent en Spaan gebruikt. Dit spectrum komt beter overeen met het optredende golfveld in de Noordzee. Spectra geobserveerd tijdens JONSWAP hebben een scherpere piek dan het Pierson-Moskowitz spectrum. Het JONSWAP-spectrum komt voort uit het Pierson-Moskowitz spectrum na bewerking met een piekversterkingsfunctie. De uitdrukking voor het JONSWAP spectrum wordt dan:

$$E(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp\left\{-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right\} \gamma \exp\left[\frac{1}{2}\left(\frac{f-f_p}{\sigma f_p}\right)^2\right] \quad (5.12)$$

$f$  = frequentie [Hz]

$f_p$  = piekfrequentie [Hz]

$\sigma$  =  $\sigma_a$  ( $f \leq f_p$ )

$\sigma$  =  $\sigma_b$  ( $f > f_p$ )

$E(f)$  = frequentiespectrum

$\gamma$  = verhouding van de maximale spectrale energie en het maximum van het bijbehorende Pierson-Moskowitz spectrum [-]

$\alpha$  = energieschaalparameter [-]

De parameters  $\alpha$ ,  $\sigma_a$ ,  $\sigma_b$ , en  $\gamma$  worden vaak uitgedrukt als functies van de dimensieloze piekfrequentie  $\tilde{f}_p$ :

$$\alpha = 0,032 \tilde{f}_p^{0,67} \quad (5.13)$$

$$\gamma = 5,87 \tilde{f}_p^{0,86} \quad (5.14)$$

$$\sigma_a = 0,054 \tilde{f}_{peak}^{-0,32} \quad (5.15)$$

$$\sigma_b = 0,078 \tilde{f}_p^{-0,16} \quad (5.16)$$

De dimensieloze piekfrequentie is afhankelijk van de dimensieloze strijklengte. De strijklengte is dimensieloos gemaakt met de windsnelheid en de zwaartekrachtversnelling. De gemiddelde waarden van  $\gamma$ ,  $\sigma_a$  en  $\sigma_b$  zijn respectievelijk 3,3, 0,07 en 0,09. Deze waarden worden vaak gebruikt in de praktijk.

Waar Van der Meer gebruik maakte van 3000 golven, maken Bhageloe en Van Gent voornamelijk gebruik van 1000 golven per serie. In verband met de beschikbare tijd is ook bij het huidige onderzoek gebruik gemaakt van 1000 golven. Hierbij wordt aangenomen dat, als er bij 1000 golven nog geen schade is opgetreden, meer golven ook niet tot onacceptabele schade zullen leiden.

Gedurende de proeven is de golfsteilheid constant gehouden. De golfhoogte is geleidelijk vergroot, totdat uiteindelijk de constructie bezweek of het golfschot de maximaal op te wekken golfhoogte bereikte. Met de golfhoogte is ook de golfperiode aangepast om zodoende de golfsteilheid constant te houden. Uit voorgaande onderzoeken (Van Gent e.a. 1998) is niet gebleken dat de golfsteilheid invloed heeft op de stabiliteit. Gedurende alle experimenten is daarom een golfsteilheid gebruikt van 5%. Voor de golfsteilheid geldt de volgende formule:

$$s_{om} = \frac{2\pi H_{s0}}{g(T_{m0})^2} \quad (5.17)$$

$H_{s0}$  = significante golfhoogte op diep water (m)

$T_{m0}$  = gemiddelde golfperiode op diep water (s)

#### 5.2.4 Plaatsingsdichtheid

Zoals al eerder is vermeld, is de plaatsingsdichtheid de primair te onderzoeken parameter in het huidige onderzoek. De plaatsingsdichtheid, uitgedrukt in de volumieke porositeit  $n_v$  die in dit onderzoek wordt gebruikt, is weergegeven in tabel 5.2. Bij de vaststelling van de te onderzoeken plaatsingsdichtheden is rekening gehouden met voorgaande onderzoeken om dubbel werk te voorkomen.

Tabel 5.2: Toegepaste plaatsingsdichtheden

Element	$n_v$
Kubus dubbele laag	0,4; 0,3; 0,25
Tetrapode	0,4; 0,3; 0,25
Breuksteen	0,3 (zie par. 5.3.4)

Bhageloe (Bhageloe 1998) maakte gebruik van een grote plaatsingsdichtheid bij zijn onderzoek naar kubussen. Vraagtekens worden dan ook gezet bij de haalbaarheid van deze dichtheid in de praktijk. In het hierop voortbouwende onderzoek van Van Gent (Van Gent e.a. 1998) worden meerdere plaatsingsdichtheden gebruikt. Bij het toepassen van een lagere plaatsingsdichtheid bleek dat deze niet voldeed. De plaatsing was niet eenvoudig, aangezien deze gelijk leidde tot een herschikking van de kubussen. Het resultaat van deze herschikking was dat er een andere plaatsingsdichtheid gerealiseerd werd dan aanvankelijk de bedoeling was. Door de herschikking ontstond namelijk een grotere plaatsingsdichtheid aan de onderkant. Ook uit de resultaten van de proeven bleek dat de lagere dichtheid (0,4) ongeschikt was voor gebruik in verband met het getoonde bezwijkgedrag. Verder werd er alleen gebruik gemaakt van hogere plaatsingsdichtheden.

De plaatsingsdichtheid voor tetrapoden toegepast door Bhageloe is daarentegen veel te ruim. Ook bij breuksteen kan er nog gevarieerd worden in dichtheid en methode van plaatsing. In tabel 5.3 zijn de in de vorige onderzoeken gebruikte plaatsingsdichtheden weergegeven uitgedrukt in waarden van de volumieke porositeit.

Tabel 5.3: Toegepaste plaatsingsdichtheden voorgaande onderzoeken

Element	Van der Meer	Bhageloe	Van Gent
Kubus dubbele laag	0,5	niet onderzocht	niet onderzocht
Kubus enkele laag	niet onderzocht	0,28	0,25; 0,3; 0,4
Tetrapode enkele laag	niet onderzocht	0,62	niet onderzocht
Breuksteen enkele laag	niet onderzocht	0.33	niet onderzocht

## 5.3 Meetplan

### 5.3.1 Inleiding

Zoals eerder werd vermeld bestaat een serie uit het doen van proeven met telkens 1000 golven. De golfhoogte wordt geleidelijk opgevoerd. De constructie wordt tot aan bezwijken belast, of totdat de maximale op te wekken golfhoogte is bereikt. In tegenstelling tot de proeven van Van der Meer vond er geen tussentijds herstel plaats na toepassing van een golfhoogte. Van Gent (Van Gent e.a. 1998) en Bhageloe (Bhageloe 1998) deden dit bij hun onderzoek ook niet. Pas na een complete serie is overgegaan op herstel van de constructie.

Om de observatie van verplaatste elementen eenvoudig te maken zijn de elementen in kleurenbanden geplaatst. Iedere kleurenband is twee elementen breed. Elementen die tot buiten hun kleurenband zijn verplaatst, zijn meegeteld bij de bepaling van de schade.

### 5.3.2 Dubbele 'armour layer' kubussen

De proeven met een dubbele 'armour layer' zijn uitgevoerd met drie verschillende plaatsingsdichtheden. Deze plaatsingsdichtheden zijn dezelfde als door Van Gent (Van Gent e.a. 1998) werden gebruikt voor zijn onderzoek met kubussen in een enkele 'armour layer'. Dit resulteert in een aantal van respectievelijk 759 kubussen

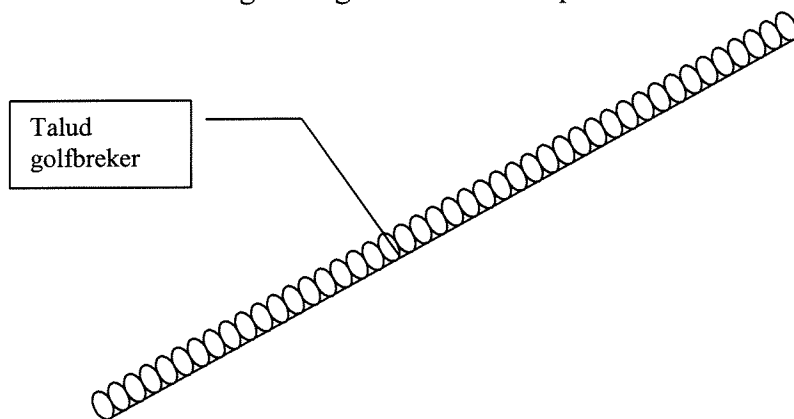
per  $m^2$ , 886 kubussen per  $m^2$  en 949 kubussen per  $m^2$  voor plaatsingsdichtheden van 0,4, 0,3, en 0,25. Voor de hoeveelheidbepaling werd gebruik gemaakt van vergelijking 4.1 en een  $k_{\Delta}$  van 1,17. Deze kubussen zijn willekeurig geplaatst, wat inhoudt dat ze ook op ribben en hoeken zijn geplaatst. De toegepaste golfhoogten zijn in bijlage VII weergegeven.

### 5.3.3 Enkele 'armour layer' tetrapoden

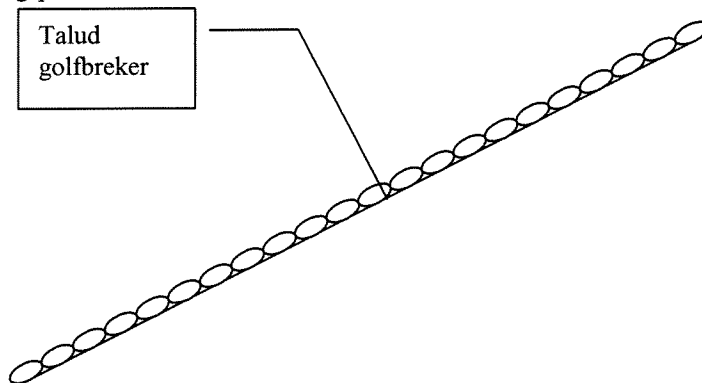
Voor de tetrapoden zijn enkele hogere plaatsingsdichtheden onderzocht dan gebruikt in het onderzoek van Bhageloe. Dit levert respectievelijk 322 tetrapoden per  $m^2$ , 376 tetrapoden per  $m^2$  en 400 tetrapoden per  $m^2$  voor plaatsingsdichtheden van 0,4, 0,3 en 0,25. Wederom is vergelijking 4.1 gebruikt met een  $k_{\Delta}$  van 1,04. Bhageloe maakte gebruik van een min of meer regelmatige plaatsing bij tetrapoden. Bij dit onderzoek is getracht ze een meer willekeurige plaatsing te geven, zoals gebruikelijk is in de werkelijkheid. De toegepaste golfhoogten zijn weergegeven in bijlage VII.

### 5.3.4 Enkele 'armour layer' breuksteen

Ook hier worden wederom de plaatsingsdichtheden gevarieerd. Dit geschiedt in dit geval door de methode van plaatsing. Allereerst is een willekeurige plaatsing toegepast met een plaatsingsdichtheid van 0,3. Dit resulteerde in een aantal van 540 stenen per vierkante meter. Vervolgens zijn er twee andere manieren van plaatsing uitgetoetst, zoals weergegeven in figuur 5.3 en figuur 5.4. Deze methoden kenmerken zich door een regelmatigere vorm van het patroon.



Figuur 5.3: Plaatsingspatroon A



Figuur 5.4: Plaatsingspatroon B

Bij plaatsingsmethode A zijn, na het aanbrengen van de 'armour layer', de elementen zodanig bijgewerkt dat ze enigszins 'rechtop' stonden. Om te bepalen hoeveel elementen geplaatst moesten worden, is uitgegaan van de hoeveelheden die benodigd zijn voor de 'normale' plaatsingsmethode. Na bewerking werden waar nodig nieuwe elementen toegevoegd. Het aantal elementen dat toegevoegd is, is in het huidige onderzoek beperkt tot een maximum van 25%. Na deze wijziging kan de nieuwe porositeit worden berekend. In het geval van plaatsingsmethode B zijn, na het aanbrengen van de 'armour layer', de elementen zodanig bijgewerkt dat ze enigszins 'plat' zijn komen te liggen. Ook hier werd in eerste instantie uitgegaan van de hoeveelheden die benodigd zijn voor de 'normale' plaatsingsmethode. Tijdens de bewerking werden waar nodig elementen weggehaald. Het maximum aantal elementen dat weggehaald mocht worden bedroeg 25%. De nieuwe waarde voor de porositeit kan nu bepaald worden.

Uit het onderzoek van Bhageloe (Bhageloe 1998) volgt bovendien dat het toegepaste talud van 1:1,5 niet geschikt is voor breuksteen, omdat de elementen van de helling af glijden ten gevolge van het eigen gewicht. Daarom zijn in dit onderzoek ook twee andere hellingen onderzocht, namelijk 1:2 en 1:3. De toegepaste golfhoogten zijn in bijlage VII weergegeven

Hall, Kao en Mulcahy hebben onderzoek gedaan naar de invloed van de gradering van breuksteen bij een dynamisch stabiele golfbreker (Hall e.a. 1991). Het doel van hun onderzoek was weliswaar anders dan de doelstelling van dit onderzoek. Het doel van hun onderzoek was om, bij gegeven initiële ontwerprestricties vast te stellen welke begincondities leiden tot een uiteindelijk stabiel profiel. Hierbij wordt  $D_{85}/D_{15}$  gevarieerd tussen 1,35 en 5,4. Het lijkt de moeite waard om een variatie aan te brengen in de gradering bij het onderzoek van één enkele 'armour layer'. Zodoende zijn bij het talud van 1:2 en 1:3 twee verschillende graderingen toegepast. Naast de gebruikelijke breedte van 1,2 is ook een breedte van 1,6 onderzocht. De zeefkromme van de 'armour layers' is opgenomen in bijlage IV.

Burger (Burger 1995) heeft onderzoek gedaan naar de kruinhoogte, de vorm en de gradering van breuksteen. Burger houdt ook rekening met golfoverslag. Uit het onderzoek van Burger bleek de invloed van de gradatie het grootste te zijn. Bij een schadegetal  $> 2$  bleek dat hoe wijder de gradatie des te lager de stabiliteit was. Burger deed zijn onderzoek bij een talud van 1:2. Bhageloe had al opgemerkt dat een talud van 1:1,5 niet geschikt is voor breuksteen. Om de gradering te onderzoeken lijkt het dan ook beter om een flauwere helling te nemen. Gekozen wordt om de flauwste helling te nemen voor dit onderzoek. Aangezien Burgers onderzoek gericht was op een dubbele 'armour layer' lijkt dit onderzoek bij één enkele 'armour layer' een goede aanvulling.

## 5.4 Meetmethodieken

### 5.4.1 Golfhoogte bepalen

Tijdens de proeven werd de golfhoogte gemeten, gebruik makend van een tweepuntsmeting halverwege de golfgoot en een voor de constructie. Deze methode dient om de inkomende golf  $H_{si}$  van de gereflecteerde golf  $H_{sr}$  te scheiden. In totaal

werd dus gebruik gemaakt van vier golfhoogtemeters. Elk tweetal werd in een rechte lijn geplaatst in de lengte-as van de goot (i.e. in de richting van de golfvoortplanting). Ieder tweetal werd op een onderlinge afstand geplaatst van 0,3 m. Een andere mogelijkheid zou het toepassen van een driepuntsmeting (drie golfhoogtemeters) zijn. Vanwege het niet beschikbaar zijn van geëigende software is er voor gekozen om met tweepuntsmetingen te werken.

Om de werkelijk opgetreden golfhoogte bij de constructie te bepalen zijn er ook proeven zonder constructie gedaan. De reden hiervoor is dat er bij aanwezigheid van de constructie niet goed gemeten kan worden, vanwege brekende golven. Wederom werd met twee tweepuntsmetingen gewerkt. Eén halverwege de golfgoot en één op de positie waar de constructie zich bevond.

Van Gent (Van Gent e.a 1998) en Bhageloe (Bhageloe 1998) maakten gebruik van driepuntsmetingen voor golfhoogtebepaling tijdens hun onderzoeken. Van Gent concludeert dat na het voorland de golfhoogte als gevolg van 'shoaling' en breking iets verandert afhankelijk van de golfsteilheid. Aan de hand hiervan zijn de golfhoogtes gemeten tijdens de proeven met de constructie aangepast om de werkelijk opgetreden golfhoogte bij de teen te bepalen.

#### 5.4.2 Schade bepalen

Bij de schadebepaling is alleen rekening gehouden met elementen die meer dan twee keer hun diameter zijn verplaatst en zich dus buiten hun kleurenband bevinden.  $N_o$  wordt bepaald door het tellen van het aantal verplaatste elementen. Het aantal benodigde kleurenbanden per talud is in tabel 5.4 weergegeven.

Tabel 5.4: Kleurenbanden benodigd per talud

Element	Talud	# Kleurenbanden
Kubus	1:1,5	7
Tetrapode	1:1,5	7
Breuksteen	1:1,5	7
	1:2	9
	1:3	12

$N_{od}$  wordt op de volgende wijze berekend uit  $N_o$ :

$$N_{od} = \frac{N_o}{B/D_n} \quad (5.18)$$

Voor de breedte  $B$  is in dit geval de breedte van de goot gekozen.  $N_{od}$  kan uitgezet worden tegen het schadegetal  $H_s/\Delta D_n$ .

### 5.4.3 Plaatsingsdichtheid

De stabiliteit wordt als gevolg van de plaatsing beïnvloed door de volgende parameters:

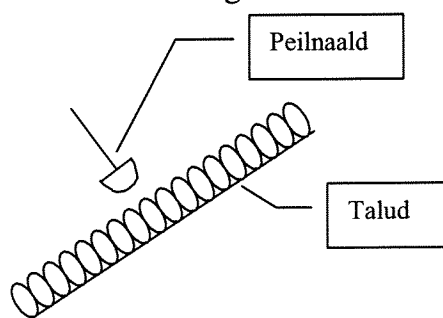
- aantal elementen per oppervlakte-eenheid
- porositeit
- laagdikte
- aantal lagen
- haakweerstand
- plaatsingsruwheid

Deze parameters moeten gemeten worden tijdens het onderzoek om de invloed hiervan vast te kunnen stellen.

De haakweerstand is een moeilijk meetbaar verschijnsel. Getracht is om deze constant te houden door de plaatsing iedere keer zo identiek mogelijk te houden. Om de plaatsingsruwheid (Triemstra 1999) constant te houden is eveneens getracht de plaatsing van de elementen iedere keer hetzelfde te laten verlopen.

Aan de hand van de gewenste porositeit wordt het aantal elementen per oppervlakte-eenheid bepaald.

Voor de bepaling van de laagdikte bestaat geen standaardrichtlijn. Een methode is gebruik maken van peilnaalden. Hiervan is gebruik gemaakt gedurende dit onderzoek. De bovenkant van de filterlaag werd gelijk aan de ontwerptekening verondersteld. Na plaatsing van de 'armour layer' werd de bovenkant van de 'armour layer' gemeten. Om te voorkomen dat openingen tussen stenen voor misleidende waarden zouden zorgen, werd aan de onderkant van de peilnaald een halve bol bevestigd met een straal van  $0,5D_{n50}$ . Dit is de door de CUR/CIRIA (CERC 1995) aangeraden methode voor bepaling van de laagdikte. De gebruikte opstelling is geschetst in figuur 5.5. In het huidige onderzoek is gebruik gemaakt van één peilnaald. De halve bol is scharnierend bevestigd aan de peilnaald. Deze peilnaald is bevestigd aan een constructie, die het mogelijk maakt om de peilnaald zowel in de lengte als in de breedte van de goot te bewegen. Zodoende kon op iedere willekeurige positie van het talud worden gemeten. Na het uitvoeren van voldoende metingen is hiervan een gemiddelde waarde bepaald. Nadeel van het bepalen van de laagdikte op deze manier is dat de uitkomst sterk bepaald wordt door de meetmethode. Indien men gebruik zou maken van een halve bol met een andere afmeting zouden er andere resultaten worden verkregen.



Figuur 5.5: Zijaanzicht peilnaald

Door de voor de laagdikte bepaalde waarde te delen door de  $D_{n50}$  kan het aantal lagen worden vastgesteld.

#### 5.4.4 Werkmethode

Het aantal benodigde elementen voor de 'armour layer' is vastgesteld aan de hand van de benodigde porositeit. Dit is gedaan met behulp van de in paragraaf 4.1 vermelde vergelijkingen. Met vergelijking 4.2 is de laagdikte  $d_a$  bepaald:

$$d_a = n(1 - n_v)D_{n50} \quad (4.2)$$

Met vergelijking 4.3 is het aantal elementen per vierkante meter  $N_a$  bepaald:

$$N_a = \frac{d_a}{D_{n50}^3} \quad (4.3)$$

Door  $N_a$  te vermenigvuldigen met de oppervlakte is het totale aantal elementen  $N$  bepaald. Hierbij dient wel te worden bedacht, waar men het oppervlak definieert. Doet men dit bij de overgang 'armour layer'-filter, bij de bovenkant 'armour layer', in het midden van de 'armour layer', of op een andere locatie. Wouters (Wouters 1993) stelt zich dezelfde vraag bij zijn modelonderzoek naar de Kerith golfbreker. In zijn onderzoek wordt gekozen om het oppervlak te definiëren in het midden van de 'armour layer'. Voor de definitie hiervan bestaan geen richtlijnen. Er wordt in het huidige onderzoek voor gekozen om bestaande onderzoeken te volgen en daarom wordt er voor gekozen om het midden van de 'armour layer' te gebruiken. Na het volgen van deze stappen zijn de gewenste laagdikte en het aantal elementen bepaald aan de hand van de vereiste porositeit. Tijdens de opbouw van het model dient te worden bewezen dat deze waarden ook daadwerkelijk bereikt worden. Om de berekende waarden daadwerkelijk te bereiken is een praktisch onuitvoerbaar taak. Zoals in paragraaf 4.1 wordt vermeld houdt deze methode ook geen rekening met het aantal lagen en de laagdiktecoëfficiënt. Daarom is er voor gekozen om vanaf dit punt de volgende methode te volgen.

De berekende waarde voor  $N$  is aangehouden en dit aantal elementen is geplaatst. Na plaatsing is met de in paragraaf 5.4.3 genoemde methode de werkelijke laagdikte bepaald. Op deze wijze kan de werkelijk aanwezige porositeit worden berekend

$$n_v = 1 - \frac{\rho_{bulk}}{\rho_a} \quad (3.16)$$

De waarde voor  $\rho_{bulk}$  volgt uit:

$$\rho_{bulk} = \frac{M_{bulk}}{V_{bulk}} \quad (5.19)$$

$M_{bulk}$  = massa bulk [kg]  
 $V_{bulk}$  = volume bulk [m<sup>3</sup>]



Voor de vaststelling van het volume zijn de laagdikte nodig en het oppervlak. De laagdikte is gemeten en het oppervlak is vastgesteld als het midden van de 'armour layer'. De massa is bekend.

Tijdens het onderzoek blijkt dat de gewenste porositeit vrij nauwkeurig kan worden bereikt. Daarom is er in dit rapport verder alleen gewerkt met de gewenste waarden.

Nadat de porositeit was vastgesteld werd begonnen met een meetserie. Een golfserie bestaande uit 1000 golven met een bepaalde significante golfhoogte werd op de golfbreker losgelaten. Tijdens deze golfaanval werd visueel vastgesteld wat de effecten op de golfbreker waren. Gekeken werd naar verplaatste elementen, bewegende elementen, uitspoeling van het filter en eventueel andere fenomenen. Vervolgens werd de golfhoogte opgevoerd (golfsteilheid blijft constant) en werden de volgende 1000 golven op de golfbreker losgelaten. Dit proces werd herhaald totdat de golfbreker was bezweken of het golfschot de maximale op te wekken golfhoogte had bereikt.

## 6. Resultaten experimenten

### 6.1 Waarnemingen

#### 6.1.1 Toegepaste definities met betrekking tot locatie

Tijdens de uitvoering van de experimenten is per opstelling een schaderapport opgesteld. Deze zijn in bijlage VI opgenomen. Aan de hand hiervan is  $N_{od}$  bepaald. In de schaderapporten wordt een onderscheid gemaakt tussen verschoven elementen en verplaatste elementen. Onder verplaatst element wordt verstaan een element dat uit de constructie is weggeslagen en op de teen of bovenop de 'armour layer' ligt. Onder verschuiven wordt verstaan dat een element geleidelijk omlaag zakt zonder uit zijn plek te worden weggeslagen. Een element wordt pas tot de categorie verschoven of verplaatst gerekend op het moment dat het zijn kleurenband heeft verlaten.  $N_o$  wordt gedefinieerd als de som van beide verschijnselen. De opgetreden schade is iedere keer vastgelegd op foto's, die in bijlage III zijn opgenomen. In bijlage VIII zijn de grafieken weergegeven van het schadeverloop.

In de volgende paragrafen zal geregeld gesproken worden over de bovenste 'armour layer' en de onderste 'armour layer', wanneer er sprake is van een dubbele laag. Met onderste 'armour layer' wordt het deel van de 'armour layer' bedoeld dat direct op de filterlaag is geplaatst. De laag hierboven, die direct blootstaat aan golfaanval is de bovenste laag genoemd. De 'armour layer' is opgebouwd uit kleurenbanden. Indien er gesproken wordt over de onderste kleurenbanden, worden de kleurenbanden bedoeld, welke zich het dichtst bij de teen bevinden.

#### 6.1.2 'Start-van-schade' en bezwijken

Bij elk experiment is het moment van 'start-van-schade' en -indien opgetreden- het moment van bezwijken vastgesteld. De manier waarop deze momenten zijn bepaald zal in deze paragraaf worden beschreven.

'Start-van-schade' is gedefinieerd als het moment waarop het eerste element zijn kleurenband verlaat. Dit kan zowel gebeuren door wegspoelen als door verschuiven. Hier hoort afhankelijk van het type element een bepaalde waarde van  $N_{od}$  bij. Deze zijn in tabel 6.1 weergegeven.

Tabel 6.1: Waarde van  $N_{od}$  voor 'start-van-schade'

Element	$N_{od}[-]$
Kubus	0,054
Tetrapode	0,055
Breuksteen	0,045

Er kunnen enkele gebreken worden genoemd betreffende de keuze voor deze waarde van  $N_{od}$ . Allereerst kan er opgemerkt worden dat het eerste element dat weggeslagen wordt niet per definitie 'start-van-schade' voorstelt. Een ongelukkig geplaatst element kan wegslaan zonder dat dit bijdraagt aan het proces van schadeontwikkeling. Om een correctere waarde voor  $N_{od}$  vast te stellen zouden vele herhalingsproeven moeten worden uitgevoerd, waarbij alleen gekeken zou moeten worden naar de 'start-van-

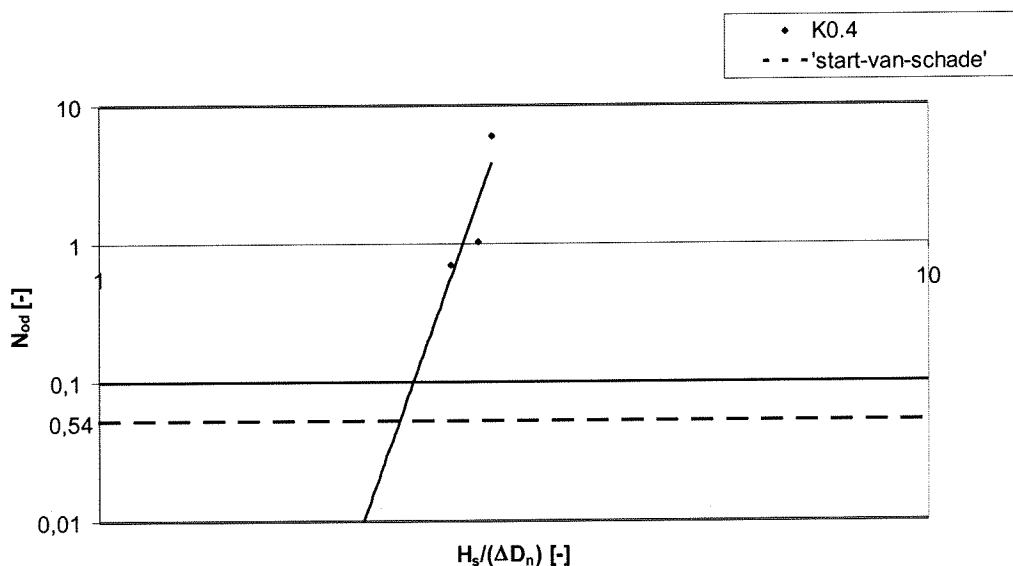
schade'. Hieruit zou de  $N_{od}$ -waarde vastgesteld kunnen worden waarbij het schadeproces daadwerkelijk begint. Het tweede punt dat genoemd kan worden is dat deze 'start-van-schade' waarden niet per definitie hetzelfde zijn bij verschillende plaatsingsdichtheden. Bij een hogere plaatsingsdichtheid zou meer schade kunnen worden toegestaan. Ook dit zou onderzocht moeten worden aan de hand van vele herhalingsproeven.

Om de bij deze waarde van  $N_{od}$  behorende waarde van  $H_s/(\Delta D_n)$  te vinden is alleen gebruik gemaakt van de meetpunten waarbij schade is opgetreden. Dit is geïllustreerd met behulp van de meetpunten van het experiment K0,4. Dit betreft het experiment met kubussen in een dubbele laag met een  $n_v$  van 0,4 en geen verstevigde teen. In tabel 6.2 zijn de gemeten waarden voor  $N_{od}$  en  $H_s/(\Delta D_n)$  weergegeven.

Tabel 6.2: Meetwaarden van K0.4

$H_s/(\Delta D_n)$ [-]	$N_{od}$ [-]
1,0	0
1,29	0
1,86	0
2,21	0
2,65	0,70
2,86	1,02
2,98	6,02

Uit de resultaten van de experimenten is in de schadeverlopen een machtsfunctie herkenbaar. Ook in de vergelijking van Van der Meer (1986,1987) is de relatie met  $N_{od}$  een bepaalde machtsfunctie. Gebruikmakend van de meetwaarden, waarbij schade is opgetreden, kan teruggeëxtrapoleerd worden naar de waarde van  $N_{od}$ , waarbij 'start-van-schade' was gedefinieerd. De meetwaarden worden hiervoor op dubbellogaritmisch papier geplott. Van deze meetwaarden wordt een lineaire trendlijn vastgesteld en deze wordt doorgetrokken tot de gezochte waarde van  $N_{od}$ . Dit is afgebeeld in figuur 6.1.



Figuur 6.1: Bepaling waarde van  $H_s/(\Delta D_n)$  voor 'start-van-schade'

Op deze wijze wordt de bijbehorende waarde voor  $H_s/(\Delta D_n)$  bepaald. Opgemerkt moet worden dat er slechts een beperkt aantal meetpunten aanwezig is. Het aantal herhalingsproeven is bovendien niet voldoende om voor een gegeven configuratie van een golfbreker een vaste waarde voor 'start-van-schade' te geven. Bij twee herhalingsproeven worden twee verschillende waarden voor 'start-van-schade' gevonden. Dit is te wijten aan het stochastische karakter van de experimenten. De plaatsing van de elementen en de inkomende golven zijn bij elk experiment verschillend. Wat wel gezegd kan worden met het beperkte aantal uitgevoerde herhalingsproeven is dat de eigenlijke waarde van 'start-van-schade' zich in ieder geval in het gevonden gebied bevindt. Er kan in dit geval geen waarde worden toegekend aan het 'start-van-schade' criterium, maar er kan wel een richting voor worden gegeven.

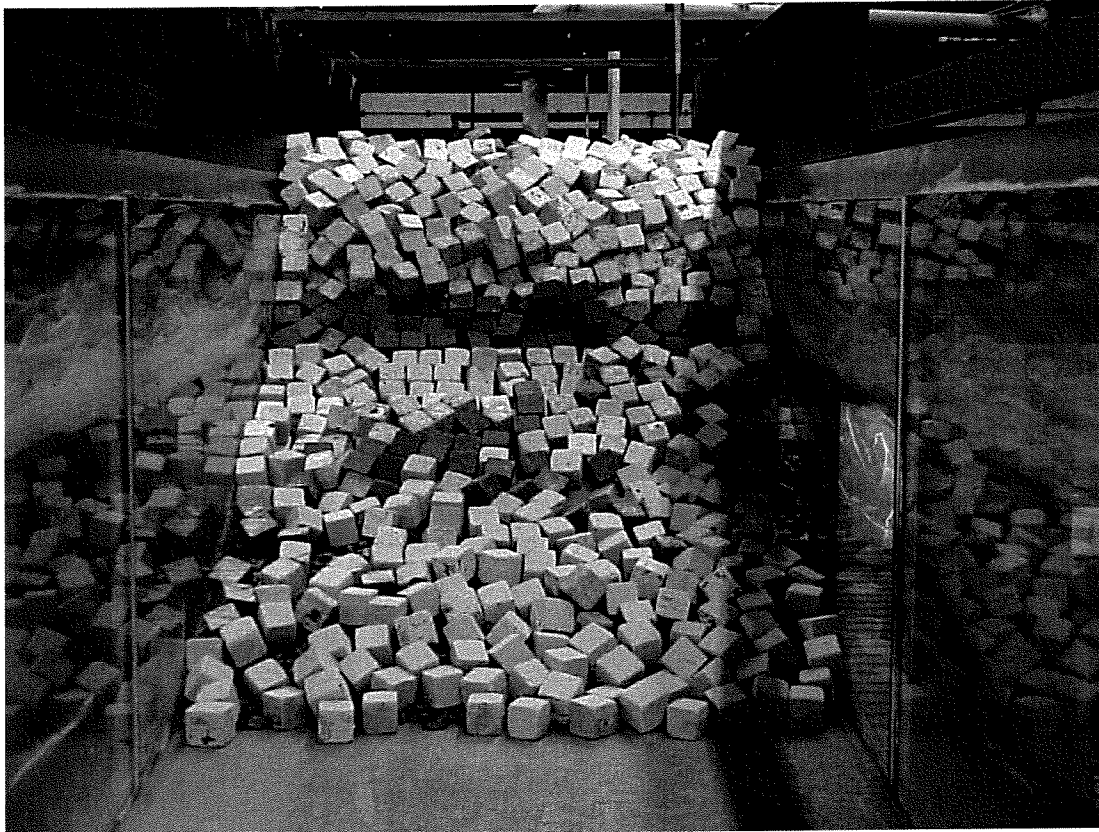
Bezwijken is gedefinieerd als het moment waarop het filter wordt aangetast. Iedere configuratie van de golfbreker is, voor zover mogelijk tot bezwijken toe belast. Per experiment is aan de hand van de gemeten gegevens duidelijk vast te stellen, wanneer dit bezwijkmoment optrad. Gezien het beperkte aantal herhalingsproeven is het niet mogelijk om per configuratie een algemeen geldend bezwijkcriterium vast te kunnen stellen. Wel kan net zoals bij 'start-van-schade' per configuratie een bepaalde bandbreedte worden aangegeven. Deze zijn in paragraaf 6.2 weergegeven.

Opgemerkt dient te worden dat de definities voor 'start-van-schade' en bezwijken kunnen verschillen met de definities gebruikt in voorgaande onderzoeken.

### 6.1.3 Kubussen in dubbele laag

De eerste experimenten werden uitgevoerd met het oorspronkelijk ontwikkelde golfbrekerontwerp. Dit houdt in dat de teen was opgebouwd uit hetzelfde materiaal als toegepast voor het filter. De plaatsing van de kubussen leverde geen problemen op, al was het voor de hogere plaatsingsdichtheden wel vereist om de elementen meer te manipuleren om de gewenste plaatsing te bereiken. Onder deze manipulaties wordt verstaan het enigszins met de hand verplaatsen van de kubussen om plaatsing van alle elementen mogelijk te maken. Uit metingen bleek dat de gewenste plaatsingsdichtheid zonder problemen werd bereikt. In bijlage V wordt, bij wijze van voorbeeld, getoond op welke wijze de laagdikte werd bepaald.

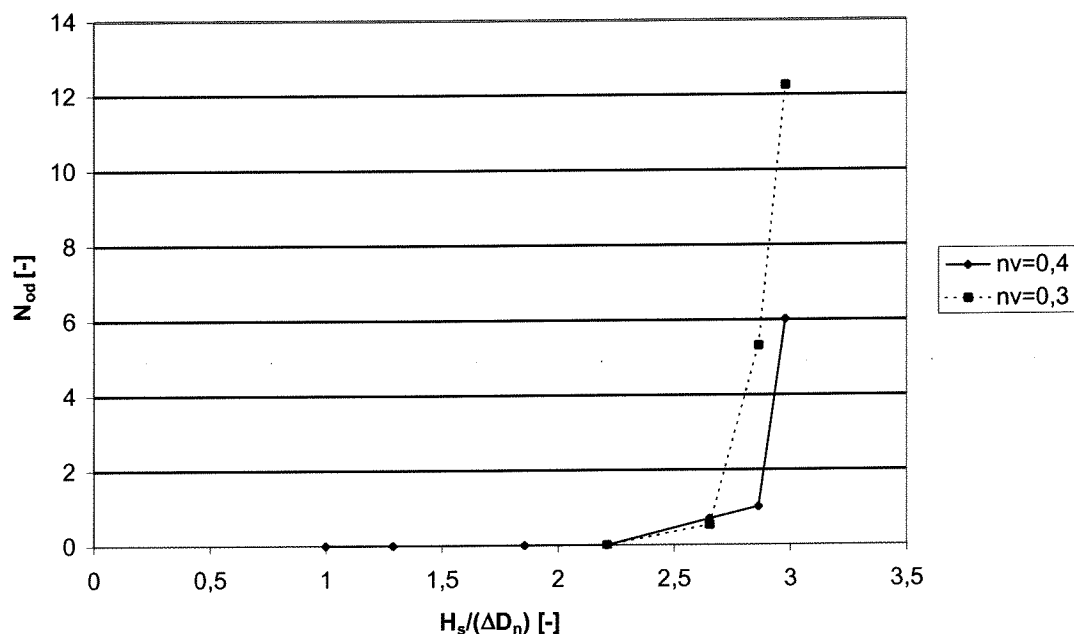
Uit de experimenten met de originele teen bleek dat de teen erg zwak was. Veel elementen uit de onderste kleurenband spoelden weg als gevolg van zwakke punten in de berm. Dit leidde vervolgens tot het afschuiven van de bovenste 'armour layer' over de onderste 'armour layer', die zelf totaal geen schade ondervond. Deze werd zelfs samengedrukt en zodanig herschikt dat een soort zetsteenbekleding ontstond. Alleen de bovenste twee kleurenbanden van de onderste 'armour layer' behielden nog enigszins hun originele plaatsing. Dit fenomeen was zichtbaar bij een plaatsingsdichtheid van 0,4 en met name bij 0,3. Bij een plaatsingsdichtheid van 0,25 vond dit niet meer plaats. Er dient wel opgemerkt te worden dat bij een plaatsingsdichtheid van 0,25 de teen al steviger was uitgevoerd. In figuur 6.2 is de afschuiving getoond, welke optrad gedurende het experiment met plaatsingsdichtheid 0,3.



Figuur 6.2: Afschuiving bij kubussen in dubbele laag zonder verstevigde teen en een  $n_v$  van 0,3

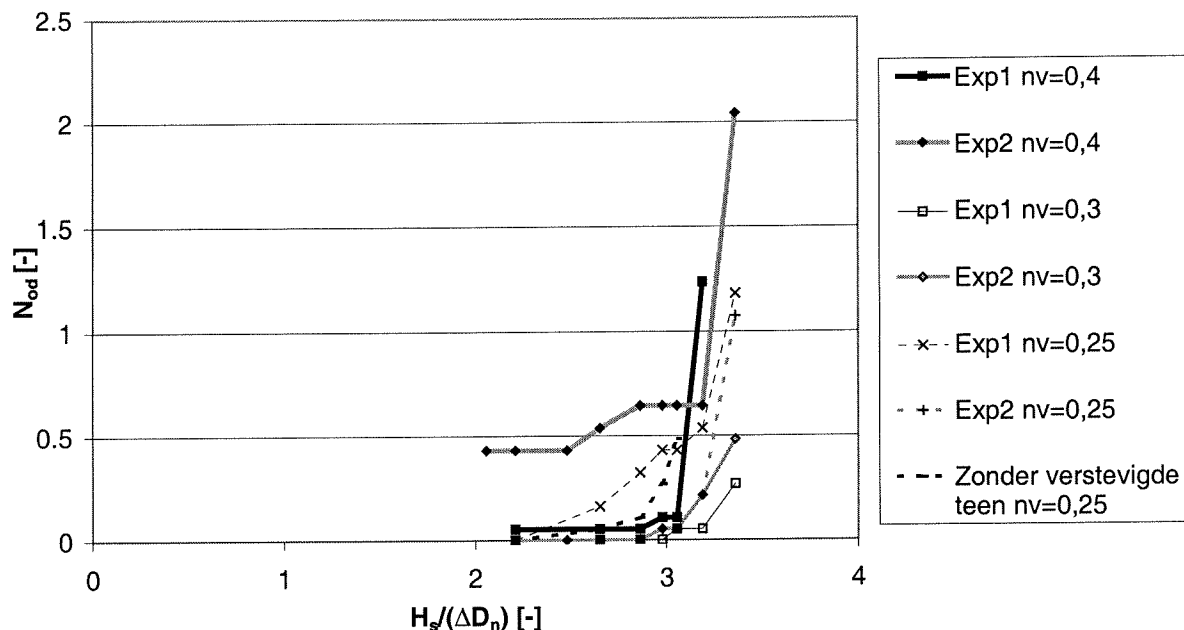
Nadat enige aantasting van de teen had plaatsgevonden, werd deze erosie steeds meer versterkt door de afschuiving van meer elementen. Dit leidde uiteindelijk tot de volledige afschuiving van de bovenste 'armour layer'. De afschuiving kenmerkte zich op een gegeven moment door een afgeschoven deel, dat zich al op de teen bevond. Hierboven bevond zich een gat en daarboven bevond zich het intacte deel. Dit verschijnsel is duidelijk zichtbaar in figuur 6.2. De elementen op de rand van het intacte deel waren zeer instabiel. De golven klapten op deze elementen, die onmiddellijk omlaag rolden. Het gat in de bovenste 'armour layer' schoof op deze wijze steeds verder naar boven. De afgeschoven elementen hoopten zich op aan de onderkant van de teen en vormden van daaruit een nieuwe dubbele 'armour layer'. De verwachting was dat uiteindelijk de gehele bovenste 'armour layer' zou afschuiven. Constructief gezien was in geen van beide gevallen de golfbreker bezwaken. De onderste 'armour layer' was nog intact en het filter had dus nog geen enkele schade ondervonden. Wel kan worden gezegd dat de toestand van de golfbreker door niemand zou worden geaccepteerd.

Bij de golfbreker met een plaatsingsdichtheid van 0,25 was de aantasting van de teen ook zichtbaar, maar bereikte gedurende het experiment nooit het stadium, waarbij afschuiving van de 'armour layer' mogelijk werd. Het feit dat de teen sterker was uitgevoerd en niet de grotere plaatsingsdichtheid lijkt de enige reden waarom de resultaten van dit experiment afweken van de voorgaande resultaten. Daarom is besloten om het experiment met plaatsingsdichtheid 0,25 op te nemen bij de resultaten van de experimenten met de versterkte teen. In figuur 6.3 is het schadeverloop weergegeven voor de plaatsingsdichtheden 0,4 en 0,3.



Figuur 6.3: Schadeverloop kubussen zonder verstevigde teen

Om bezwijken als gevolg van een te zwakke teen te voorkomen is vervolgens de teen verstevigd met een laag breuksteen. Hiervoor werd dezelfde breuksteen gebruikt die later is gebruikt als ‘armour layer’ (wijde gradering  $D_{85}/D_{15}=1,63$ ). De teen bleek nu wel voldoende stevig te zijn. Naarmate de plaatsingsdichtheid toenam werd het verschijnsel ‘oplichting’ van de elementen steeds vaker waargenomen. Het oplichten van elementen vond plaats rond het punt van maximale golfterugloop. De eerste elementen, die uit de ‘armour layer’ werden verwijderd, waren altijd elementen die uit het talud werden opgelicht. Nadat dit eenmaal had plaatsgevonden ontstond de mogelijkheid om andere elementen weg te spoelen. Dit laatste gebeurde meestal rond de waterlijn. Afschuiving van de bovenste ‘armour layer’ trad niet meer op dezelfde schaal op als gedurende de experimenten zonder versterkte teen. Wel waren dezelfde verschijnselen zichtbaar. Na verwijdering van de bovenste ‘armour layer’ na afloop van een experiment bleek de onderste ‘armour layer’ de vorm te hebben van een zetsteenbekleding. Daar waar ruimte ontstond als gevolg van enkele verwijderde elementen schoven bovenliggende elementen eenvoudig in deze gaten. Duidelijk zichtbaar was de samendrukking van de onderste kleurenbanden. Iedere plaatsingsdichtheid is twee keer getest. Het schadeverloop is weergegeven in figuur 6.4.



Figuur 6.4: Schadeverloop kubussen met verstevigde teen

Er bleek een behoorlijke spreiding te zitten in de resultaten van de herhaalde experimenten. Wel kon een algemene tendens opgemerkt worden. Zoals verwacht bleek de constructie met plaatsingsdichtheid 0,4 het zwakst. Dit is ook de enige constructie die bij één experiment de bezwijksituatie bereikt. Een plaatsingsdichtheid van 0,3 levert een stevigere constructie op. De resultaten van het tweede experiment bij deze plaatsingsdichtheid blijken ook goed overeen te komen met het eerste experiment. Een verhoging van de plaatsingsdichtheid naar 0,25 levert echter weer meer schade op.

### 6.1.4 Tetrapoden in enkele laag

Ook de experimenten met de tetrapoden zijn gedaan bij de met breuksteen verstevigde teen. Besloten werd om alle experimenten op deze wijze uit te voeren. De plaatsing van de tetrapoden bleek geen problemen op te leveren. Wel was er in het geval van hoge plaatsingsdichtheden sprake van meer manipulaties met de elementen om de juiste dichtheid te bereiken. Ook hier wordt met manipulaties het met de hand verplaatsen van elementen verstaan om zo de gewenste plaatsingsdichtheid mogelijk te maken.

In tegenstelling tot losgeslagen kubussen rolden tetrapoden niet gelijk naar beneden, maar bleven vaak op een afstand van enkele elementen lager liggen. Dit werd veroorzaakt door de grotere ruwheid van het oppervlak. Alhoewel de tetrapoden hier enkellaags waren aangebracht, kan er worden verondersteld dat, in geval ze dubbellaags zouden worden aangebracht, het bij kubussen vertoonde bezwijkmechanisme van afschuiven niet zou optreden. Dit komt omdat de tetrapoden ook in het geval van hoge plaatsingsdichtheden nooit op een bekleding gaan lijken. Bovendien speelt de haakweerstand bij tetrapoden een grote rol. Bij tetrapoden bleek

het oplichten van elementen ook geen rol te spelen in geval van hoge dichtheden. Door de grote ruimtes tussen de elementen kan er niet voldoende druk onder een element worden ontwikkeld. Wel trad er veel herschikking op. Deze herschikking was zelfs zodanig dat, alleen al als gevolg van schuivende elementen, er op een gegeven moment een gat in de 'armour layer' kon ontstaan. Bij het experiment met een plaatsingsdichtheid van 0,4 bleek dit duidelijk. Als slechts twee elementen waren weggeslagen was de constructie al bezwaken.

Wat bij tetrapoden werd opgemerkt was het uitspoelen van filtermateriaal bij slechts een geringe herschikking. Het bleek dat er vanwege de vorm van de tetrapoden zoveel ruimte aanwezig was tussen de elementen, dat de golven vrijwel meteen het filter konden aanvallen. Dit verschijnsel trad ook op bij hoge plaatsingsdichtheden. Zodoende bleek er filtermateriaal weg te spoelen rond de waterlijn. Er ontstond een holle ruimte onder de 'armour layer', welke weer ondermijnend werkte. Dit alles kon plaatsvinden zonder dat er een element was weggespoeld. Het filtermateriaal spoelde onder de 'armour layer' door naar beneden. Dit vond met name net boven de waterlijn plaats. Weggespoelde elementen kwamen van rond de waterlijn. Het uiteindelijke gat in de 'armour layer', waarbij bezwijken werd vastgesteld, kon wel hoger liggen als gevolg van zakking van de elementen. Dit trad bijvoorbeeld op bij het tweede experiment met een plaatsingsdichtheid van 0,25. Het uiteindelijke gat waarbij de constructie als bezwaken werd beschouwd bevond zich in de groene band. Ter illustratie is in figuur 6.5 een foto van deze bezwijksituatie afgebeeld.

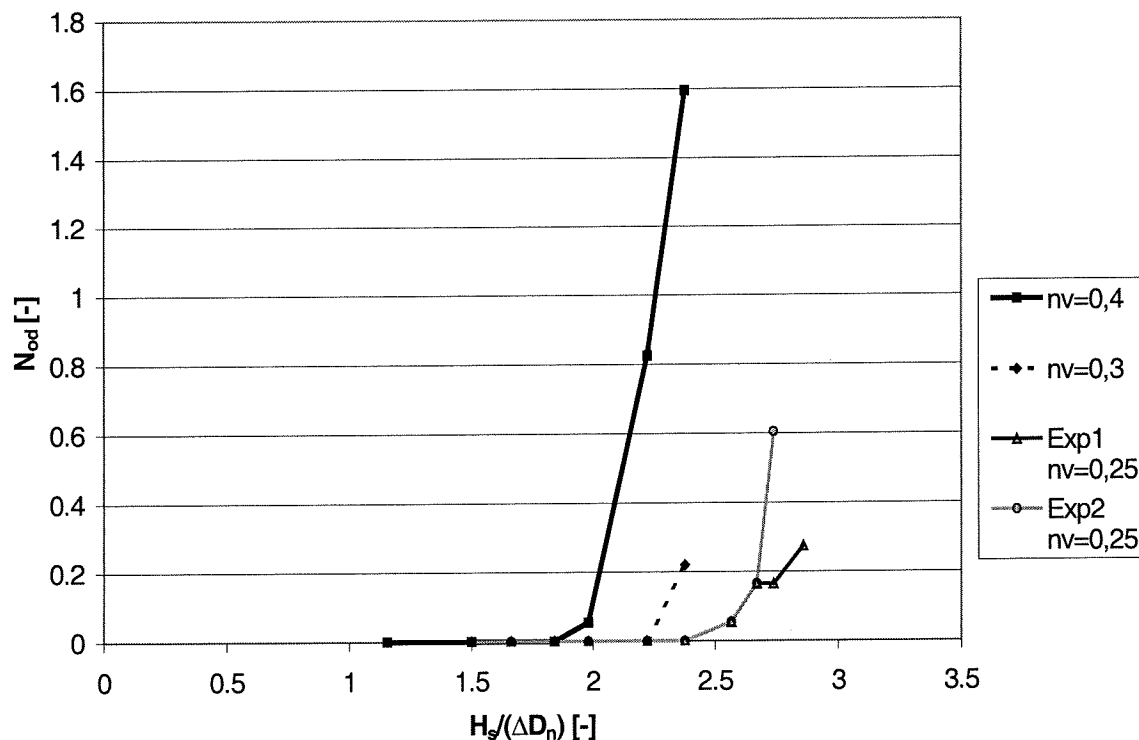


Figuur 6.5: Bezweken golfbreker met enkele 'armour layer' tetrapoden en een  $n_v$  van 0,25

Tetrapoden bleken verraderlijke elementen te zijn in het geval van één enkele 'armour layer', omdat het bezwijken onopvallend plaatsvond. Met onopvallend wordt bedoeld het uitspoelen van filtermateriaal en de behoorlijke herschikking van de elementen



zonder dat er een element is verwijderd. De stabiliteit neemt hier echter wel met toenemende plaatsingsdichtheid toe. Alle experimenten zijn slechts één keer gedaan, behalve het experiment met een plaatsingsdichtheid van 0,25, dat één keer is herhaald. In figuur 6.6 is het schadeverloop van de tetrapoden weergegeven.



Figuur 6.6: Schadeverloop tetrapoden

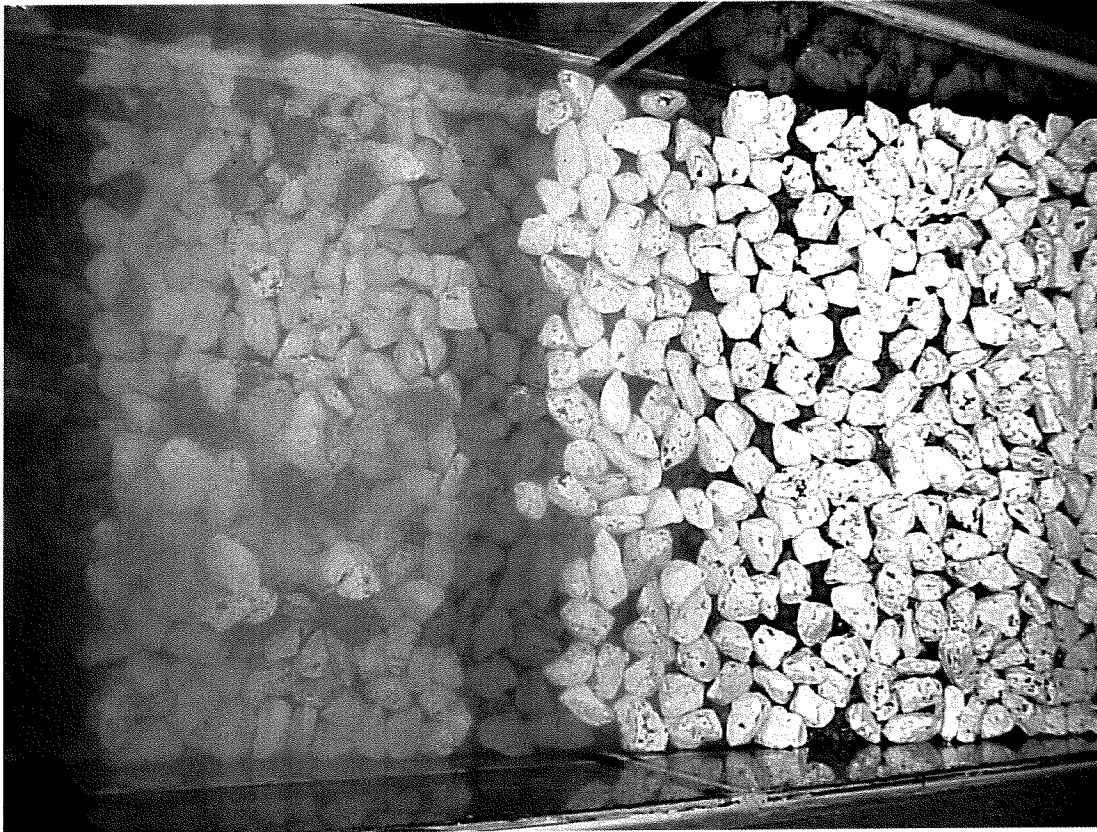
Bij een plaatsingsdichtheid van 0,4 was er sprake van progressief bezwijkgedrag. Hieronder wordt verstaan dat als er eenmaal schade optreedt de constructie vrij snel bezwijkt.

### 6.1.5 Breuksteen in enkele laag

De plaatsing van de breuksteen verliep zonder problemen. Vergeleken met de plaatsing van tetrapoden en kubussen waren de benodigde manipulaties verwaarloosbaar. Bij breuksteen werden drie plaatsingmethoden gehanteerd: normale plaatsing, methode A (rechttop geplaatst) en methode B (plat geplaatst).

Allereerst zal de normale plaatsing worden behandeld. Schade bleek met name op te treden rond de waterlijn. Wel kwam de filterlaag veel hoger bloot te liggen als gevolg van zakkings van elementen. Bij de taluds 1:1.5 en 1:2 was er sprake van progressief bezwijkgedrag. Bij een talud van 1:3 was dit niet meer het geval. Bij een flauwer talud bleken 'collapsing' golven minder vaak op te treden, maar 'plunging' golven des te meer. De golf klapte dus niet op de constructie, maar op het water. Dit betekende veel minder schade, omdat het water de meeste energie opnam. De 'collapsing' golven traden op bij het punt van maximale golfterugloop. Bij een talud van 1:3 was dit rond de gele band. Als gevolg van een 'collapsing' golf werden deze lagere kleurenbanden opgestuwd. De golfklap stuwde de elementen op en plaatste ze

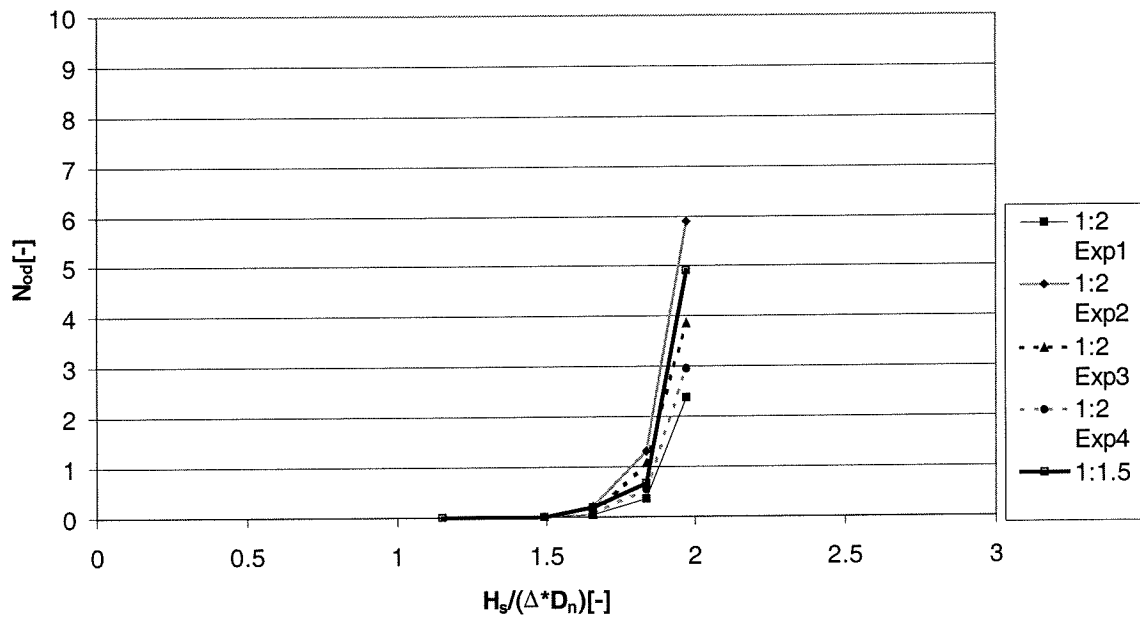
recht overeind. Als gevolg hiervan werden de onderste kleurenbanden veel compacter, waardoor de hogere banden konden zakken en een lagere plaatsingsdichtheid aannamen met als gevolg dat deze ruimer gepakte elementen weer makkelijker weggespoeld konden worden. Om dit te verduidelijken is in figuur 6.7 een foto weergegeven die genomen is tijdens de experimenten met een talud van 1:3.



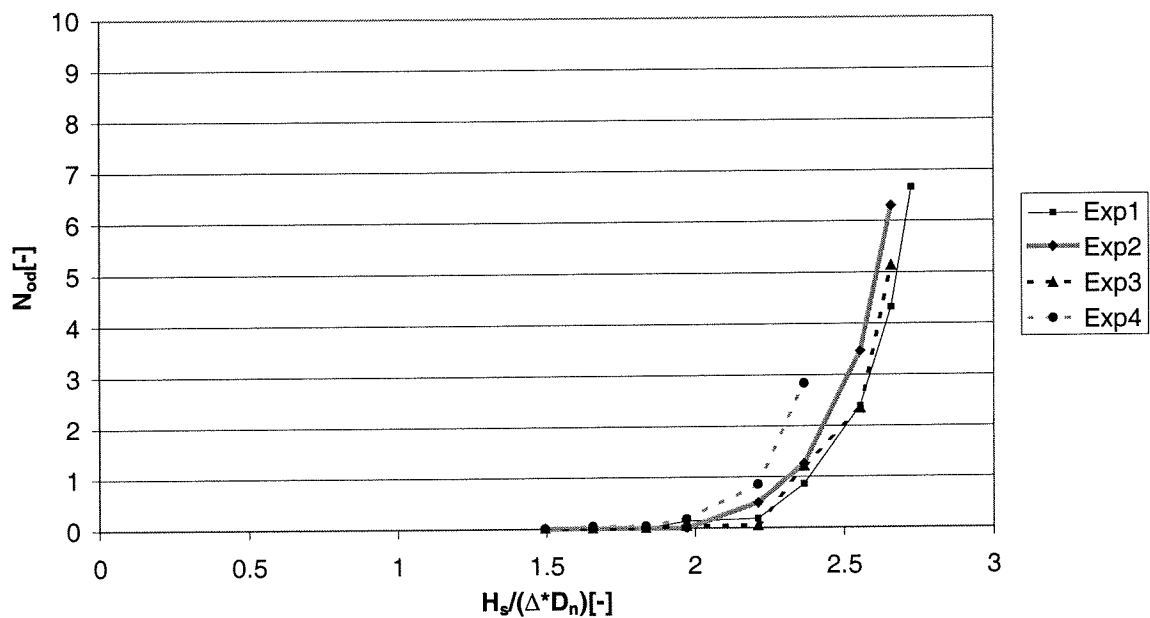
Figuur 6.7: Samendrukking van de onderste kleurenbanden bij een talud van 1:3

In de foto is duidelijk te zien dat de gele en de grijze band veel compacter zijn geworden en ook veel nauwer zijn dan de overige kleurenbanden. De bovenliggende kleurenbanden wit, groen en roze hebben een hele ruime pakking aangenomen, terwijl hier toch vrij weinig elementen uit zijn weggeslagen.

In figuur 6.8 en 6.9 zijn de schadeverlopen van breuksteen op verschillende taluds weergegeven.



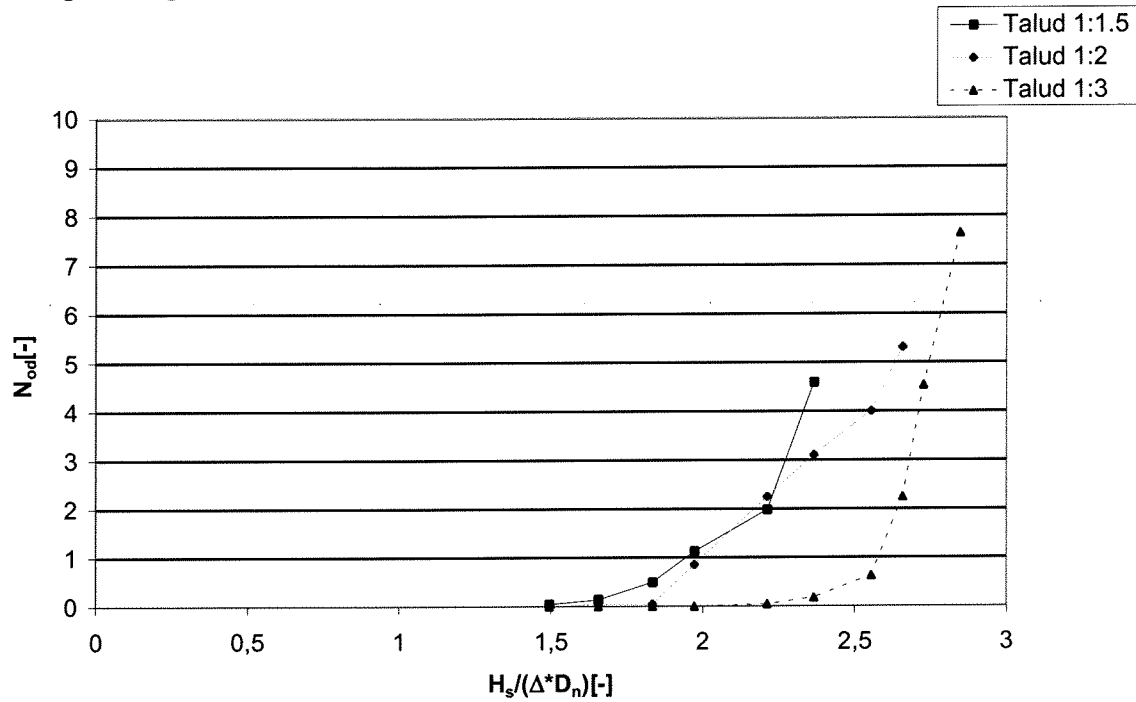
Figuur 6.8: Schadeverloop breuksteen; talud 1:1,5 en 1:2; normale plaatsing



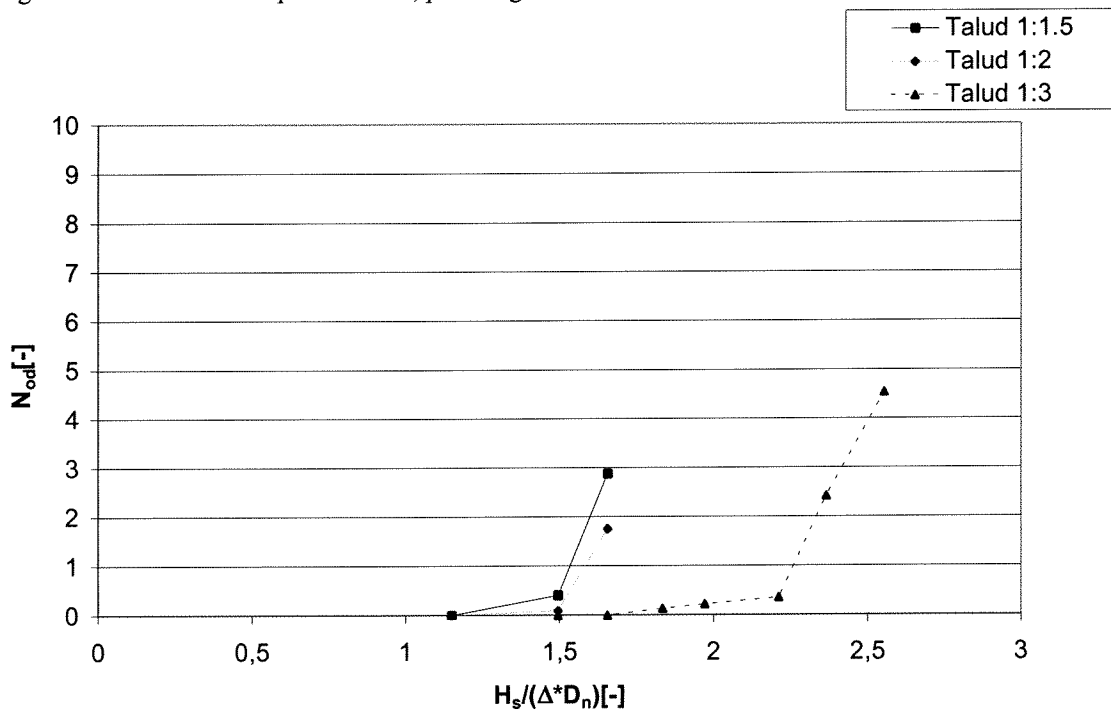
Figuur 6.9: Schadeverloop breuksteen; talud 1:3; normale plaatsing

Plaatsingsmethode A bleek een zelfherstellend vermogen te hebben, waardoor deze constructie later bezweek dan de constructie met normale plaatsing. De rechtopstaande elementen konden door plat te gaan liggen ontstane ruimtes opvullen. Plaatsingsmethode B daarentegen bezat totaal geen zelfherstellend vermogen. Deze constructie bezweek dan ook eerder dan de constructie met een normale plaatsing. Methode A vertoonde geen progressief bezwijkgedrag. Methode B vertoonde progressief bezwijkgedrag voor de twee steilste taluds. Bij een talud van 1:3 was daar

geen sprake meer van. In figuur 6.10 en figuur 6.11 zijn de schadeverlopen van deze twee plaatsingsmethoden weergegeven.

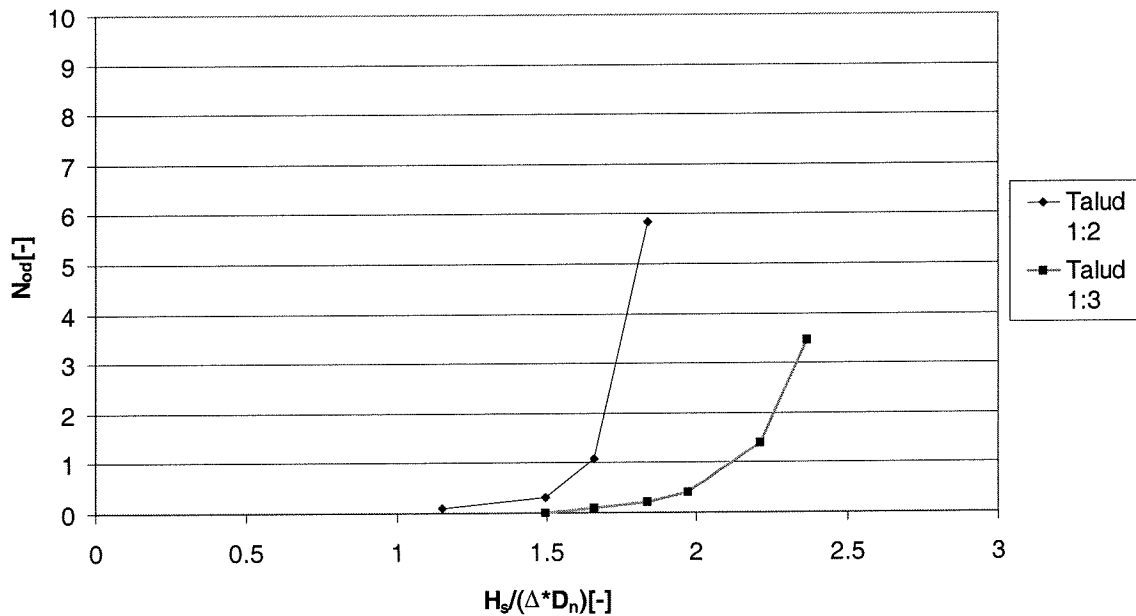


Figuur 6.10: Schadeverloop breuksteen; plaatsingsmethode A



Figuur 6.11: Schadeverloop breuksteen; plaatsingsmethode B

Tot slot werd nog een wijde gradering toegepast bij de taluds 1:2 en 1:3. Deze werd met de normale plaatsingsmethode aangebracht. Wat hierbij opviel was dat, als er eenmaal een zwak punt was ontstaan, de kleinere elementen heel gemakkelijk wegspoelden. De situatie werd sneller instabiel dan bij een nauwe gradering. In figuur 6.12 is het schadeverloop weergegeven.



Figuur 6.12: Schadeverloop breuksteen; wijde gradering; normale plaatsing

### 6.1.6 Golven

De inkomende golf wordt gebruikt in het schadegetal  $H_s/(\Delta D_n)$ . Om de inkomende golf van de gereflecteerde golf te scheiden werd een tweepuntsmeting toegepast. Dit gebeurde op twee plaatsen: halverwege de goot en bij de teen van de constructie. Voor de scheiding werd gebruik gemaakt van het programma Reflec. Uit deze berekening bleek dat de golfhoogten bij de teen van de constructie lager waren dan halverwege de goot. Voor dit verschijnsel zijn drie verklaringen. Allereerst vond er in de goot zelf al breking plaats als gevolg van golven die elkaar inhaalden. Er ging dus al energie verloren voordat de golven op de constructie braken. Het tweede punt was dat er, als gevolg van het voortalud, 'shoaling' optrad. Op het voortalud was sprake van een overgangszone tussen diep water en ondiep water voor de optredende golven. Als gevolg hiervan was de shoaling-coëfficiënt voor de optredende golven kleiner dan 1. Tot slot kan nog worden genoemd dat er energie verloren ging door de wrijving met de wanden.

De invloed van 'shoaling' kan met een berekening worden weergegeven, zoals gepresenteerd in tabel 6.3. Voor deze berekening is gebruik gemaakt van de metingen, die zijn gedaan bij het experiment zonder constructie. In de eerste kolom staat de gemeten, significante, inkomende golfhoogte halverwege de goot. In de tweede kolom staat de gemeten, significante, inkomende golfhoogte bij de teen van de constructie. In de derde kolom is de gemeten, gemiddelde, golfperiode behorende bij de gemeten, significante, inkomende golfhoogte weergegeven. In de vierde kolom staat het golfgetal  $k$ . Vervolgens is iteratief de golflengte bepaald, die in de vijfde kolom is weergegeven. Aan de hand van de in de zesde kolom genoteerde verhouding  $h/L$  kan de shoaling-coëfficiënt worden bepaald, die in kolom 7 is genoteerd. Vervolgens is in de laatste kolom de significante, inkomende golfhoogte bij de teen berekend, die volgens de bepaalde shoaling-coëfficiënt en gemeten  $H_{s10}$  zou moeten optreden. De

berekende waarden komen redelijk overeen met de gemeten waarden. Het verschil is te verklaren aan de hand van het feit dat deze rekenmethode eigenlijk voor regelmatige golven is opgesteld.

Tabel 6.3: Invloed van 'shoaling'

$H_{s,0}$ [m]	$H_{s,1}$ [m]	$T_{m0}$ [s]	$k$ [m <sup>-1</sup> ]	$L$ [m]	$h/L$ [-]	$K_s$ [-]	$H_{s,cal}$ [m]
0,057	0,052	0,91	5,10	1,23	0,31	0,95	0,054
0,075	0,067	1,00	4,33	1,45	0,26	0,93	0,069
0,097	0,087	1,14	3,56	1,77	0,22	0,92	0,088
0,107	0,097	1,19	3,34	1,88	0,20	0,91	0,098
0,119	0,107	1,22	3,22	1,95	0,19	0,91	0,108
0,128	0,115	1,28	3,03	2,08	0,18	0,91	0,117
0,138	0,129	1,29	2,99	2,10	0,18	0,91	0,126
0,144	0,138	1,37	2,76	2,27	0,17	0,92	0,132
0,154	0,149	1,43	2,61	2,41	0,16	0,92	0,142
0,163	0,155	1,47	2,50	2,51	0,15	0,92	0,151
0,167	0,159	1,52	2,40	2,61	0,15	0,93	0,155
0,172	0,166	1,59	2,27	2,77	0,14	0,94	0,161
0,183	0,175	1,62	2,23	2,82	0,13	0,94	0,172

Optredende 'wave set-up' en 'wave set-down' worden verwaarloosd, aangezien er pas zeer laat sprake is van ondiep water.

Voor de bepaling van de gemiddelde golfperiode  $T_{m0}$  is gebruik gemaakt van het programma 'Waves', dat aan de hand van het meetbestand  $T_{m0}$  kan bepalen. Uiteindelijk is met het databestand uit het programma Reflec het spectrale energie-spectrum getekend voor verschillende significante golfhoogten. Deze spectra zijn weergegeven in bijlage IX.

Voor de bepaling van de opgetreden schade is voor de golfhoogte bij de teen van de constructie gebruik gemaakt van de gevonden waarden bij het experiment zonder constructie. Dit is gedaan, omdat er tijdens de proeven met constructie op deze positie geen goede metingen gedaan konden worden, aangezien er hier als gevolg van de aanwezigheid van de constructie teveel brekende golven waren. Voor de bepaling van de golfhoogten in het midden van de goot is wel gebruik gemaakt van de afzonderlijke metingen per experiment.

## 6.2 Analyse van de experimenten

### 6.2.1 Invloed van de plaatsingsdichtheid

Gedurende de experimenten zijn als gevolg van veranderingen van de plaatsingsdichtheid veranderingen waargenomen in de optredende faalmechanismen. Deze kunnen onderverdeeld worden in drie categorieën:

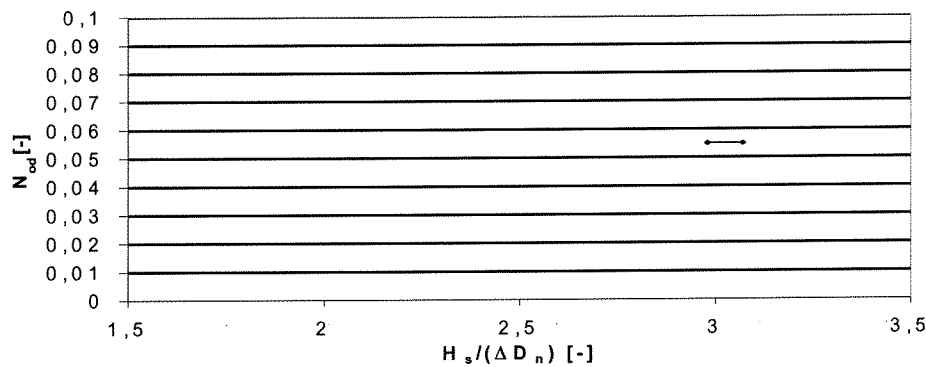
- het oplichten van een element. Dit verschijnsel werd waargenomen bij kubussen en nam toe naarmate de plaatsingsdichtheid werd opgevoerd.
- afschuiven van elementen;
- 'rocking' van een element met als uiteindelijk resultaat het wegspoelen hiervan.

Het eerste faalmechanisme (het oplichten van een element) trad alleen op in het geval van kubussen. Het is duidelijk zichtbaar dat een dubbele 'armour layer' van kubussen zich bij een verhoging van de plaatsingsdichtheid gaat gedragen als een zetsteenbekleding met de hiervoor kenmerkende faalmechanismen als oplichten van elementen en afschuiven van een laag. Bij een  $n_v$  van 0,4 gedraagt de golfbreker zich nog als een los gestorte laag, maar bij een  $n_v$  van 0,3 en 0,25 is er al sprake van een bekledingachtige vorm.

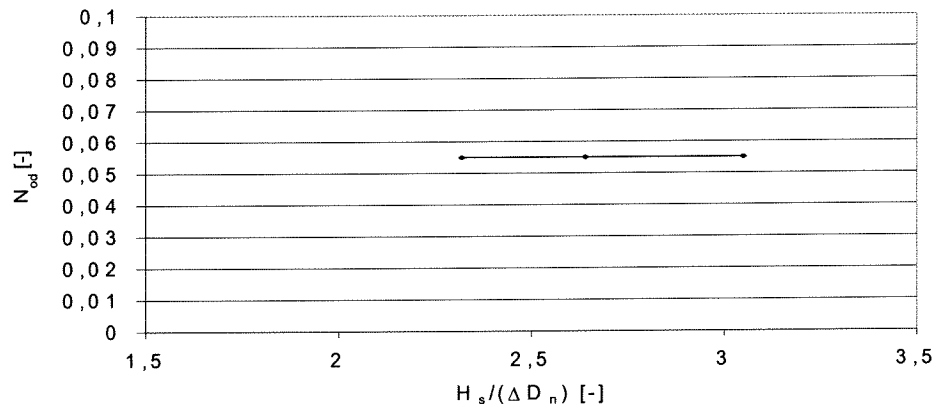
Het tweede faalmechanisme (afschuiven) is typerend voor een zetsteenbekleding. Dit is te wijten aan het feit dat door de druk van de bovenste 'armour layer' en door het schuiven zelf de onderste 'armour layer' de vorm aanneemt van een zetsteenbekleding. De ruwheid tussen de bovenste 'armour layer' en de onderste 'armour layer' is in dat geval gering. Dit wordt erger naarmate de plaatsingsdichtheid toeneemt en de 'armour layer' steeds meer op een zetsteenbekleding gaat lijken. Door dit gebrek aan ruwheid oefent de bovenste 'armour layer' een grote druk uit op de elementen bij de teen. Dit levert in combinatie met een zwakke teen een gevaarlijk faalmechanisme op. Vooral bij een plaatsingsdichtheid van 0,3 is dit zeer goed zichtbaar. Hier schuift de volledige bovenste 'armour layer' over de teen omlaag. Wat in ieder geval uit deze experimenten geconcludeerd kan worden, is het belang van de teen. Dit geldt in het bijzonder voor hoge plaatsingsdichtheden, omdat dan door het genoemde gebrek aan ruwheid de bovenste 'armour layer' kan afschuiven.

Tijdens de experimenten is vastgesteld dat 'collapsing' golven de zwaarste schade veroorzaakten bij iedere geobserveerde 'armour layer', met uitzondering van de 'armour layer' opgebouwd uit kubussen met een hoge plaatsingsdichtheid. In het geval van tetrapoden zorgden 'collapsing' golven voor het losschudden van elementen. Dit veroorzaakte, zoals gezegd 'rocking'. Vervolgens konden 'surging' golven het al losliggende element eenvoudiger bewerken. De golfoploop en golfterugloop veroorzaakten de uiteindelijke verwijdering. De kracht van de 'collapsing' golf zorgde bij breuksteen voor een opstuwning van elementen. De elementen werden in groten getale opgetild, maar meestal nog niet verwijderd ten gevolge van de onderlinge wrijving. Wel volgde er een herschikking door zakking van andere elementen. Deze opstuwning van de elementen werd tijdens de experimenten met breuksteen duidelijk waargenomen. De nieuwe plaatsing was veel minder stabiel en kon door de 'surging' golven worden afgebroken. Golfterugloop was in dit geval maatgevend.

Zoals in paragraaf 6.1.2 reeds is vermeld, is het vanwege het beperkte aantal herhalingsproeven moeilijk om 'harde' criteria te stellen voor 'start-van-schade' en bezwijken. Wel zal getracht worden om 'gebieden' aan te geven voor deze verschijnselen. Bij de configuratie met een dubbele 'armour layer' van kubussen en een  $n_v$  van 0,3 zijn bijvoorbeeld twee experimenten uitgevoerd. Beide leveren verschillende waarden voor 'start-van-schade'. Door deze twee punten met elkaar te verbinden kan er een gebied worden aangegeven, waarbinnen in ieder geval 'start-van-schade' op kan treden. Indien er meer herhalingsproeven zouden worden uitgevoerd is het te verwachten dat ook buiten deze punten 'start-van-schade' zal optreden. De band zal dus groter worden. In figuur 6.13 en 6.14 zijn deze banden voor kubussen met versterkte teen weergegeven.



Figuur 6.13: 'Start-van-schade' dubbele 'armour layer' kubussen  $n_v=0,3$



Figuur 6.14: 'Start-van-schade' dubbele 'armour layer' kubussen  $n_v=0,25$

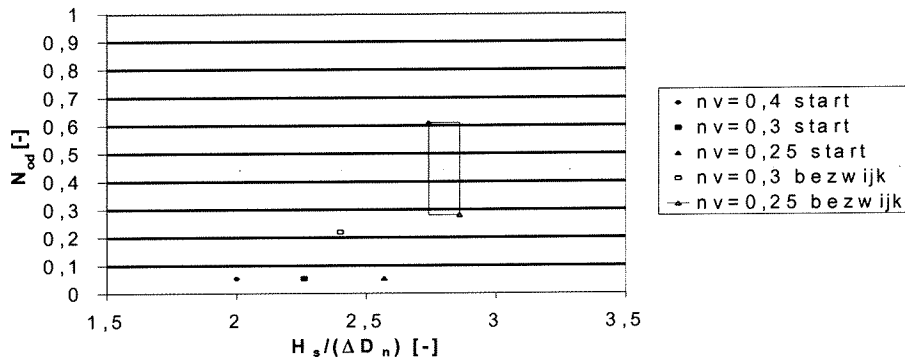
Voor de 'armour layer' van kubussen met een  $n_v$  van 0,4 werd slechts één waarde voor 'start-van-schade' betrouwbaar bevonden. Door de manier van 'curve fitting' is een onrealistische waarde van  $H_s/(\Delta D_n) = 0,87$  voor één experiment gevonden. Wel is duidelijk uit het verloop van de schade waar te nemen dat de gezochte waarde lager moet zijn dan die van het andere experiment (zie bijlage VIII of paragraaf 6.1.3). De waarde voor 'start-van-schade' die wel geldig werd bevonden is:  $H_s/(\Delta D_n) = 2,47$ . Ondanks het feit dat er geen 'harde' criteria opgesteld kunnen worden aan de hand van deze gegevens, kunnen er wel bepaalde trends worden vastgesteld. De 'start-van-schade' waarden voor een  $n_v$  van 0,4 zijn het laagst. Uit de figuren 6.13 en 6.14 blijkt dat de  $n_v$  van 0,3 de hoogste waarden heeft voor het 'start-van-schade' gebied. Dit komt overeen met de waarneming dat deze constructie het meest stabiel was. In tabel 6.4 zijn de 'gebieden' voor kubussen nog eens samengevat. In het geval dat er slechts één experiment heeft plaatsgevonden kon er echter maar één waarde worden genoteerd.

Tabel 6.4: Indicatie 'start-van-schade' en bezwijken voor dubbele 'armour layer' kubussen

$n_v$ [-]	'Start-van-schade'		Bezwijken		Opmerking
	$H_s/(\Delta D_n)$ [-]	$N_{od}$ [-]	$H_s/(\Delta D_n)$ [-]	$N_{od}$ [-]	
0,4	2,3	0,055	-	-	zonder versterkte teen
0,3	2,41	0,055	-	-	zonder versterkte teen
0,4	2,47	0,055	3,3	2	versterkte teen
0,3	2,98-3,07	0,055	-	-	versterkte teen
0,25	2,32-3,05	0,055	-	-	versterkte teen



Voor tetrapoden kunnen op een zelfde wijze ‘gebieden’ voor ‘start-van-schade’ en bezwijken vastgesteld worden. In figuur 6.15 is dit weergegeven. De resultaten van de experimenten leveren nu een oppervlakte op voor bezwijken in plaats van een lijn.



Figuur 6.15: ‘Start-van-schade’ en bezwijken enkele ‘armour layer’ tetrapoden

Tabel 6.5: Indicatie ‘start-van-schade’ en bezwijken voor ‘armour layer’ tetrapoden

$n_v$ [-]	‘Start-van-schade’		Bezwijken	
	$H_s/(\Delta D_n)$ [-]	$N_{od}$ [-]	$H_s/(\Delta D_n)$ [-]	$N_{od}$ [-]
0,4	2,00	0,054	-	-
0,3	2,26	0,054	2,4	0,22
0,25	2,57	0,054	2,74-2,86	0,28-0,61

Omdat bij een  $n_v$  van 0,4 sprake was van progressief bezwijken, heeft het geen zin om te spreken over een bezwijkcriterium en kan er beter met ‘start-van-schade’ gewerkt worden. Bij een  $n_v$  van 0,25 bleek bij herhaling van het experiment de waarde voor ‘start-van-schade’ hetzelfde. Er is een duidelijke trend waarneembaar, dat de ‘start-van-schade’ en het bezwijken later optreedt naarmate de plaatsingsdichtheid toeneemt. Bij een toename van de plaatsingsdichtheid wordt een toename van de haakweerstand verwacht, omdat een groter aantal elementen elkaar raakt of omdat hetzelfde aantal elementen elkaar beter raakten. Bij kubussen kan dit verschijnsel onder inklemming worden gerangschikt. Bij tetrapoden is de haakweerstand duidelijker aanwezig, aangezien deze elementen gemaakt zijn om in elkaar te haken. Een grotere plaatsingsdichtheid zou in het geval van de tetrapoden een grotere stabiliteit moeten opleveren. Uit de resultaten van de experimenten blijkt dit ook het geval te zijn.

In paragraaf 3.3.1 wordt vermeld dat het stabiliteitsniveau van de elementen continu verandert om het willekeurige karakter van haakweerstand te illustreren. Dit werd geregeld waargenomen gedurende de proeven. Elementen begonnen te ‘rocken’, verplaatsten enigszins en stabiliseerden op een gegeven moment weer. Dit kon plaatsvinden met licht ‘rockende’ elementen, maar ook in extreme gevallen kunnen elementen die ieder moment lijken te bezwijken als gevolg van optredende verplaatsing en verplaatsingen van andere elementen volledig stabiliseren. Tetrapoden hebben geen zelfherstellend vermogen, zoals bijvoorbeeld breuksteen (zie paragraaf 6.2.6). Juist het belang van de haakweerstand voor deze elementen maakt de verplaatsing van een element zo fataal.

### 6.2.2 Het oplichten van een kubus

Aan de hand van de beschikbare data kan de stabiliteit van een element in de ‘armour layer’ worden berekend met betrekking tot oplichten met behulp van formules voor taludbekledingen van gezette steen. Essentieel hierbij is de vraag of de stroming door de ‘armour layer’ en door de filterlaag laminair of turbulent is. In paragraaf 5.1 zijn de Reynoldsgetallen voor de filterlaag en de ‘armour layer’ bepaald. Het blijkt dat er sprake is van stroming in het overgangsgebied tussen laminaire en turbulente stroming. In het prototype zullen stromingen tussen de elementen door turbulent zijn. De effecten die zich hebben voorgedaan bij de zetsteenbekledingsachtige vorm van de ‘armour layer’ worden deels bepaald door het type stroming. Men kan zich afvragen of de opgetreden verschijnselen bij de hoge plaatsingsdichtheden ook een rol spelen in het prototype of slechts schaaffecten zijn. Het model is niet Reynolds geschaald en voor berekeningen met betrekking tot de stabiliteit van de bekledingsachtige vorm eigenlijk niet geschikt. Om vast te stellen of dit daadwerkelijk het geval is zal eerst een stabiliteitsberekening uitgevoerd worden voor het model, waarna met behulp van schattingen een berekening uitgevoerd zal worden voor de werkelijke situatie. Aan de hand hiervan wordt vastgesteld of er sprake is van schaaffecten, of dat het in de werkelijkheid ook een rol speelt.

Allereerst moeten de doorlatendheden van de filterlaag en de ‘armour layer’ vastgesteld worden. De doorlatendheid van het filter kan worden beschreven met de Forchheimer relatie:

$$i = a_f u + b_f u^2 \quad (6.1)$$

- $i$  = verhang[-]  $\approx 1$   
 $a_f$  = lineaire weerstandscoefficiënt van het filter [s/m]  
 $b_f$  = kwadratische weerstandscoefficiënt van het filter [s<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]

Voor  $b_f$  zijn verschillende formuleringen in omloop. In dit geval zal de door Bezuijen, Burger en Klein Breteler (Bezuijen e.a. 1990) gebruikte methode worden gevolgd. In het geval van stroming in de overgangsfase kan de doorlatendheid worden geschreven als (Bezuijen e.a. 1990):

$$k_f = \frac{-a_f + \sqrt{a_f^2 + 4b_f i_f}}{2b_f i_f} \quad (6.2)$$

$$a_f = 160 \frac{\nu (1 - n_f)^2}{g n_f^3 D_{f15}^2} \quad (6.3)$$

$$b_f = \frac{2,2}{g n_f^2 D_{f15}} \quad (6.4)$$

$D_{f15}$  = diameter van een filterelement, waarvoor geldt dat slechts 15% van de elementen een kleinere diameter heeft = 0,0012 m

De doorlatendheid  $k_f$  wordt gelijk aan 0,065 m/s. Dit is een realistische waarde. Zoals eerder is vermeld, varieert de doorlatendheid van materiaal van deze afmetingen tussen  $10^{-3}$  en  $10^{-1}$ .

De doorlatendheid van de 'armour layer',  $k_a$ , is de som van de stromingsweerstand van het filter, de toestroming en de wandwrijving. Er is hier sprake van een overgangstype stroming, waardoor  $k_a$  op de volgende wijze kan worden bepaald (Bezuijen e.a. 1990):

$$k_a = \frac{-a_a + \sqrt{a_a^2 + 4b_a i_a}}{2b_a i_a} \quad (6.5)$$

$a_a$ = lineaire weerstandscoefficiënt van de 'armour layer' [s/m]  
 $b_a$ = kwadratische weerstandscoefficiënt van de 'armour layer' [s<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]  
 $i_a$ = verhang over de 'armour layer' [-]

$$a_a = \frac{12vl}{gs^2} + \frac{lsa_f}{\pi d_a} \ln\left(\frac{ls}{\pi r_{\min} e}\right) \quad (6.6)$$

$$b_a = \frac{l^2}{2gd_a} \left[ \left( \frac{1}{n_f} - 1 \right)^2 + 1 \right] + \frac{lsb_f}{\pi d_a} \left[ \frac{ls}{\pi r_{\min}} - 2 \right] \quad (6.7)$$

$s$ = spleetbreedte [m]  
 $r_{\min}$ = 0,5 $D_{f15}$  als 0,5 $D_{f15} > 0,4*s$  of  
 0,4\*s als 0,5 $D_{f15} \leq 0,4*s$  [m]  
 $l$ = verhouding tussen zettingsoppervlak en spleetoppervlak [-]

$$l = \frac{D_n^2}{(D_n s + D_n s)} \quad (6.8)$$

In tabel 6.6 zijn de verschillende benodigde parameters opgenomen om de waarde voor  $k_a$  te berekenen. Onder spleetbreedte wordt de gemiddelde grootte van de spleten tussen de kubussen verstaan. De waarde van  $s$  is voor  $n_v=0,3$  op 5 mm geschat. Voor  $n_v = 0,25$  volgt dan dat  $s = 4$  mm. De laagdikte  $d_a$  is gemeten tijdens de experimenten. Het verhang  $i_a$  is zo extreem mogelijk verondersteld en is gelijk gesteld aan 1.

Tabel 6.6: Berekening doorlatendheid

	$n_v=0,3$	$n_v=0,25$
$r_{\min}(\text{m})$	0,006	0,006
$s(\text{m})$	0,005	0,004
$l(-)$	4,3	5,4
$v(\text{m}^2/\text{s})$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$
$a_f(\text{s}/\text{m})$	2,06	2,06
$b_f(\text{s}^2/\text{m}^2)$	207,6	207,6
$n_f(-)$	0,3	0,3
$d_a(\text{m})$	0,09	0,09
$i_a(-)$	1	1
$a_a(\text{s}/\text{m})$	0,07	0,27
$b_a(\text{s}^2/\text{m}^2)$	53,9	91,9
$k_a(\text{m}/\text{s})$	<b>0,14</b>	<b>0,10</b>

Deze waarden voor  $k_a$  kunnen ook als realistisch worden beschouwd. Voor breuksteen van soortgelijke afmetingen hoort een waarde voor  $k_a$  die varieert rond de 0,1 m/s (Schiereck 1998). Zetsteenbekledingen hebben meestal een waarde voor  $k_a$  die varieert tussen 0,01 en 0,001. De gevonden waarden voor beide plaatsingsdichtheden komen overeen met de waarde van  $k_a$  voor breuksteen 'armour layers'. De 'armour layer' is nog niet zodanig gepakt dat er sprake is van een zetsteenbekleding. Toch is er geen sprake meer van een stortsteen 'armour layer'. De doorlatendheid moet afnemen met toenemende plaatsingsdichtheid als gevolg van de afname van de spleetbreedte.

Met de methode van Wolsink-Banach (Bezuijen e.a. 1990), die gegeven is bij rekenmethode A kan de stabiliteit van een element tegen oplichten worden bepaald. De resultaten voor deze berekening zijn in bijlage XI opgenomen.

De stabiliteit van een kubus neemt af bij toename van de plaatsingsdichtheid. Dit is te verklaren door de toename van de lek lengte. Dit heeft tot gevolg dat het maximale stijghoogteverschil toeneemt. Dit verklaart de grotere schade bij een hoge plaatsingsdichtheid. Bij deze berekening is het niveau van de freatische lijn bij beide plaatsingsdichtheden constant gehouden. Aannemelijk is dat deze bij een lagere plaatsingsdichtheid af zal nemen als gevolg van de grotere doorlatendheid. Hierdoor zou het maximale stijghoogteverschil nog meer afnemen bij de lage plaatsingsdichtheid.

Er is onderscheid gemaakt tussen een  $n_v$  van 0,3 en een  $n_v$  van 0,25 voor de stabiliteitsberekening. Het faalmechanisme dat hier onderzocht is, treedt op bij het punt van maximale golfterugloop. Dit deel van de golfbreker zal door herschikking en druk van de bovengelegen lagen de maximale plaatsingsdichtheid hebben bereikt. De plaatsingsdichtheid in geval van een  $n_v$  van 0,3 zal in deze regionen waarschijnlijk hoger zijn en meer in de buurt komen van een  $n_v$  van 0,25.

Ter vergelijking zal deze rekenmethode worden toegepast op een hypothetische golfbreker. Uitgangspunt is dat het model gebouwd is op een schaal van 1:50. In tabel 6.7 zijn de relevante waarden opgenomen van deze golfbreker.

Tabel 6.7: Parameters van hypothetische golfbreker  $n_v=0,25$ 

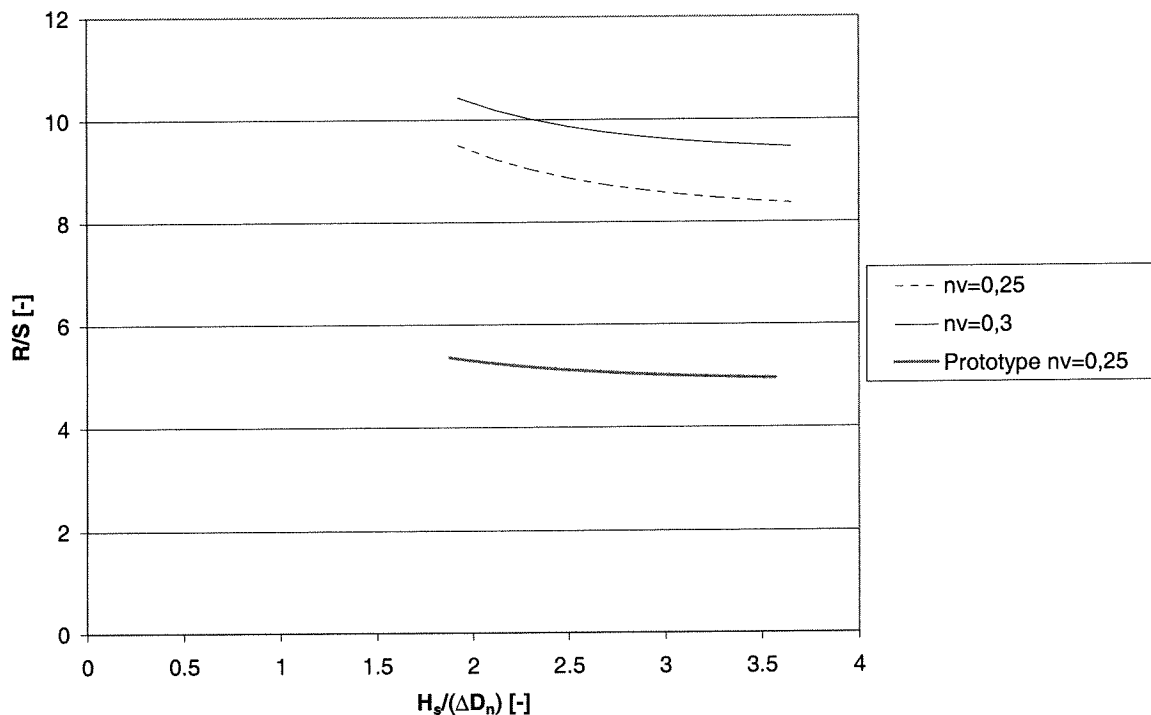
Parameter	
$D_n$ (m)	2,2
$r_{\min}$ (m)	0,3
$s$ (m)	0,2
$D_{f15}$ (m)	0,6
$n_f$ (-)	0,3
$k_f$ (m/s)	0,5
$k_a$ (m/s)	0,73
$\cotan\alpha$	1,5
$\Lambda$ (m)	2,5
$\lambda$ (m)	1,4

$\Lambda$ = lek lengte [m]

$\lambda$ = lek hoogte [m]

Bij deze golfbreker is er sprake van turbulente stroming door het filter en door de 'armour layer'.

In figuur 6.16 zijn de verhoudingen sterkte/stabiliteit ( $R/S$ ) en  $H_s/(\Delta D_n)$  tegen elkaar uitgezet voor de berekeningen met het schaalmodel en de hypothetische golfbreker.



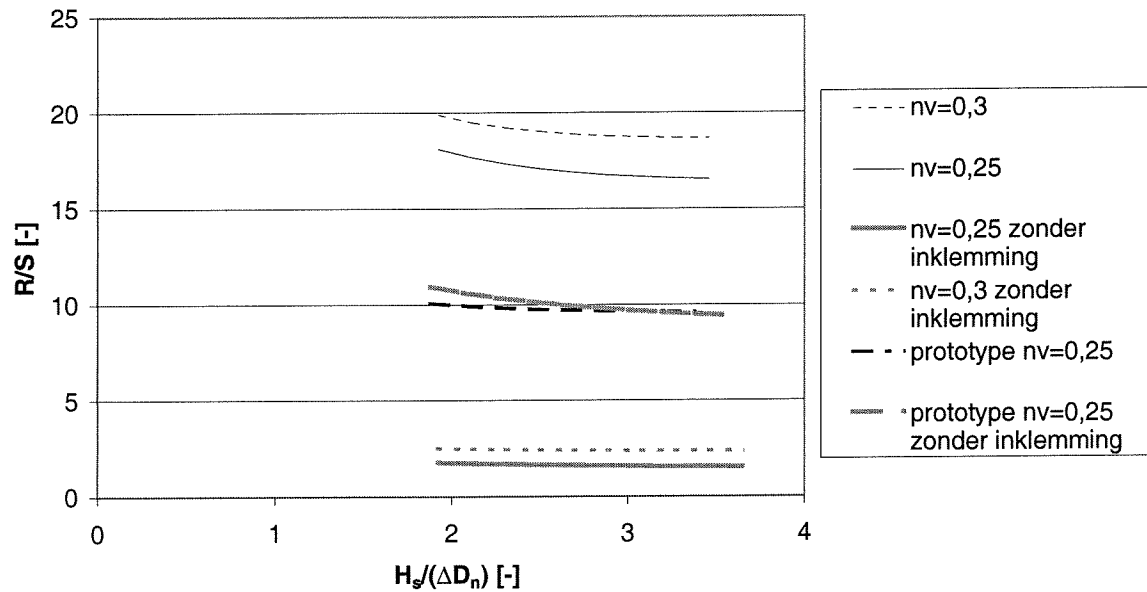
Figuur 6.16: Vergelijking experimenten met hypothetische golfbreker met betrekking tot oplichting

Onder de sterkte wordt de bijdrage van de wrijvingskracht en de traagheidskracht verstaan. De belasting volgt uit het stijghoogteverschil over de 'armour layer'. Uit de figuur blijkt dat bij een hogere  $n_v$  er een grotere stabiliteit is. Dit is eenvoudig te verklaren door het feit dat het 'oplichten' pas een rol begint te spelen als de 'armour layer' op een zetsteenbekleding begint te lijken. Dit treedt op bij hoge

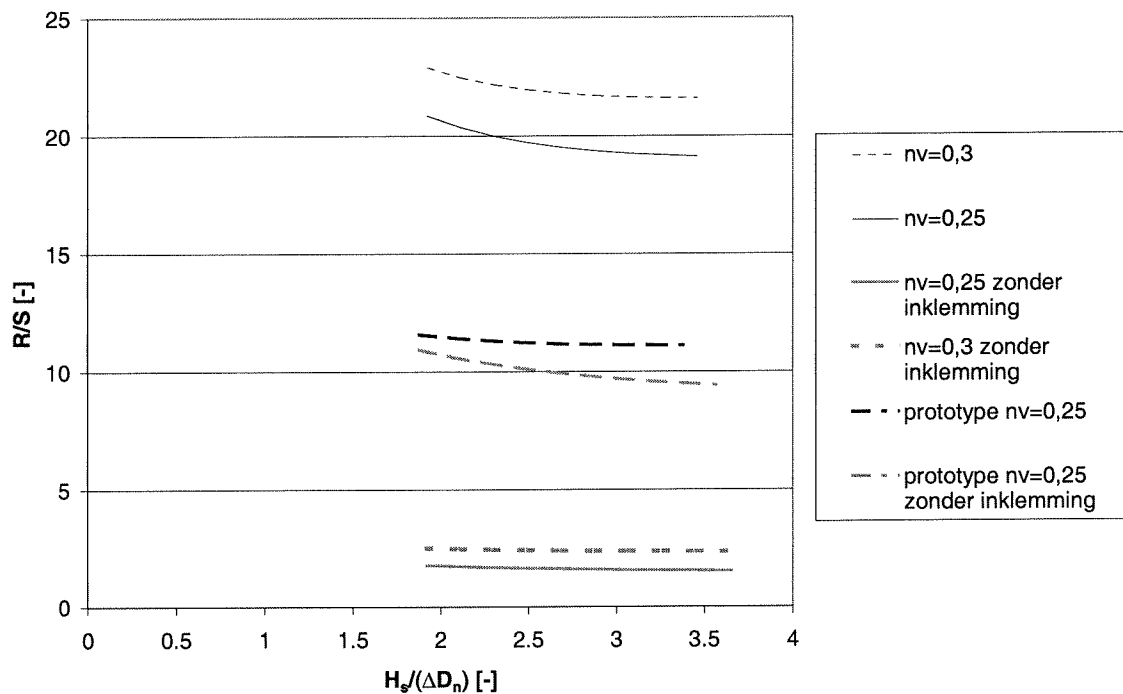
plaatsingsdichtheden. Het prototype blijkt aanzienlijk minder stabiel dan de schaalmodellen. De oorzaak ligt in het feit dat het maximale stijghoogteverschil relatief groter is bij het prototype, waardoor de belasting toeneemt. De oorzaak hiervan ligt in de schaling van de ‘armour layer’ elementen en niet aan de rekenmethode. Een ander keuze voor de schaling zou leiden tot een volledige overeenkomst tussen het prototype en het schaalmodel met betrekking tot de verhouding sterkte/belasting. Conclusies over verschillen in de stabiliteit tegen het ‘oplichten’ tussen het schaalmodel en het prototype kunnen dan ook aan de hand van deze resultaten niet worden getrokken.

### 6.2.3 Inklemming van een kubus

Een kubus zal opgelicht worden als de opwaartse kracht groter wordt dan het eigen gewicht van de kubus. Als de opwaartse druk op een beperkt oppervlak werkt en de kubus een schuifkracht en een moment ondervindt van de naastliggende elementen kan een grotere opwaartse kracht worden weerstaan. Dit treedt op als er sprake is van inklemming. De kracht op de elementen, die risico lopen opgelicht te worden, moet gereduceerd worden door de optredende schuifkracht. De schuifkracht als gevolg van inklemming moet worden berekend op het punt van maximale golfterugloop. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de methode zoals omschreven bij rekenmethode A. In figuur 6.17 en figuur 6.18 is de verhouding sterkte/belasting uitgezet tegen  $H_s/(\Delta D_n)$  voor de berekening zonder inklemming uit paragraaf 6.2.2. Ook wordt in deze figuur de situatie waarin wel rekening is gehouden met inklemming afgebeeld. De belasting stelt de opwaartse kracht voor en de sterkte stelt het eigen gewicht van de kubus plus de traagheidskracht voor (eventueel plus de schuifkracht). De situatie zonder inklemming komt overeen met een schuifkracht van  $F_{s,min}$ . In figuur 6.17 is gerekend met  $F_{s,gem}$  en in figuur 6.18 is gerekend met  $F_{s,max}$ . De berekening is ook uitgevoerd voor de hypothetische golfbreker uit paragraaf 6.2.2. In bijlage XII zijn de berekeningen weergegeven.



Figuur 6.17: Vergelijking experimenten met hypothetische golfbreker met betrekking tot oplichten in combinatie met inklemming bij  $F_{s,gem}$



Figuur 6.18: Vergelijking experimenten met hypothetische golfbreker met betrekking tot oplichten in combinatie met inklemming bij  $F_{s,max}$

Als gevolg van de schuifkracht opgewekt door de inklemming neemt de stabiliteit enorm toe. De stabiliteit neemt zelfs op zodanige wijze toe dat bezwijken helemaal niet meer aan de orde lijkt te zijn. Gezien het feit dat dit wel is waargenomen kan worden aangenomen dat de berekening niet helemaal correct is uitgevoerd voor de

toegepaste plaatsingsdichtheden. Waarschijnlijk voldoet de 'armour layer' nog niet voldoende aan de eigenschappen van een zetsteenbekleding om in aanmerking te komen voor deze berekening.

De sterkte neemt bij deze berekening evenveel toe voor verschillende plaatsingsdichtheden. Aannemelijk is dat de mate van inklemming afneemt bij afname van de plaatsingsdichtheid, omdat de elementen dan verder uit elkaar staan. De schuifkracht zal meer in de buurt liggen van de gemiddelde schuifkracht dan de maximale schuifkracht, omdat er geen sprake is van een echte zetsteenbekleding.

#### 6.2.4 Afschuiven van een kubus

Tijdens de experimenten is waargenomen dat de kubussen bij verhoging van de plaatsingsdichtheid door afname van de ruwheid meer kans hebben om af te schuiven. Voor de bepaling van de stabiliteit tegen afschuiven is door Wolsink-Banach een methode ontwikkeld (Bezuijen e.a. 1990). De krachten in de 'armour layer' worden afgedragen aan de teen. Deze teen moet voldoende sterk zijn om deze krachten op te nemen en een afschuiving te voorkomen. De resulterende kracht evenwijdig aan het talud is gelijk aan een kracht ten gevolge van het eigen gewicht min de wrijvingskracht.

$$F_w = (W_a \cos \alpha - (\Delta\phi + d_a \cos \alpha)\rho) \tan \Phi \quad (6.9)$$

$\Delta\phi$ = verschil in stijghoogte over de kubus [m]

$F_w$ = wrijvingskracht [N]

$W_a$ = kracht ten gevolge van het eigen gewicht van een 'armour layer' element (boven water) [N]

$\Phi$ = wrijvingshoek tussen blokken en filterlaag [°]

Het deel  $(\Delta\phi + d_a \cos \alpha)\rho$  wordt veroorzaakt door het verschil in waterdruk over de 'armour layer'. Dit deel verlaagt de wrijvingskracht en is in paragraaf 6.2.2 berekend. De resultaten zijn getoond in bijlage XI. De aandrijvende kracht ten gevolge van het gewicht van de kubus is gelijk aan:

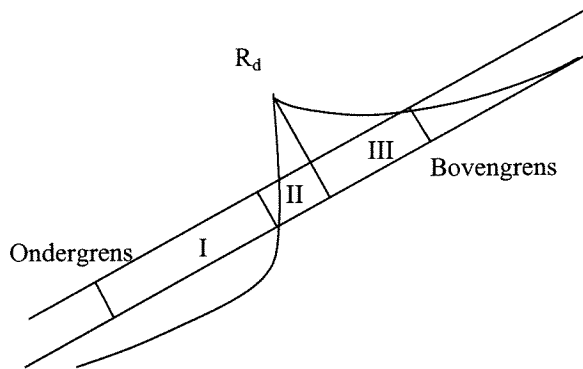
$$F_a = W_a \sin \alpha \quad (6.10)$$

Zowel  $F_w$  als  $F_a$  is bepaald voor één element. De kracht die op de teen werkt is gelijk aan de som van de krachten van alle elementen min de som van de wrijvingskrachten werkende op deze elementen:

$$F = \sum F_a - \sum F_w \quad (6.11)$$

Een probleem dat optreedt is de waarde voor  $\Delta\phi$ . Deze is in paragraaf 6.2.2 berekend met behulp van enkele aannamen voor het punt van maximale golfterugloop. Hier treedt het maximale verschil in stijghoogte op. Het verschil in stijghoogte varieert echter over het talud. In figuur 6.19 is het theoretische verloop van het stijghoogteverschil over de 'armour layer' weergegeven.



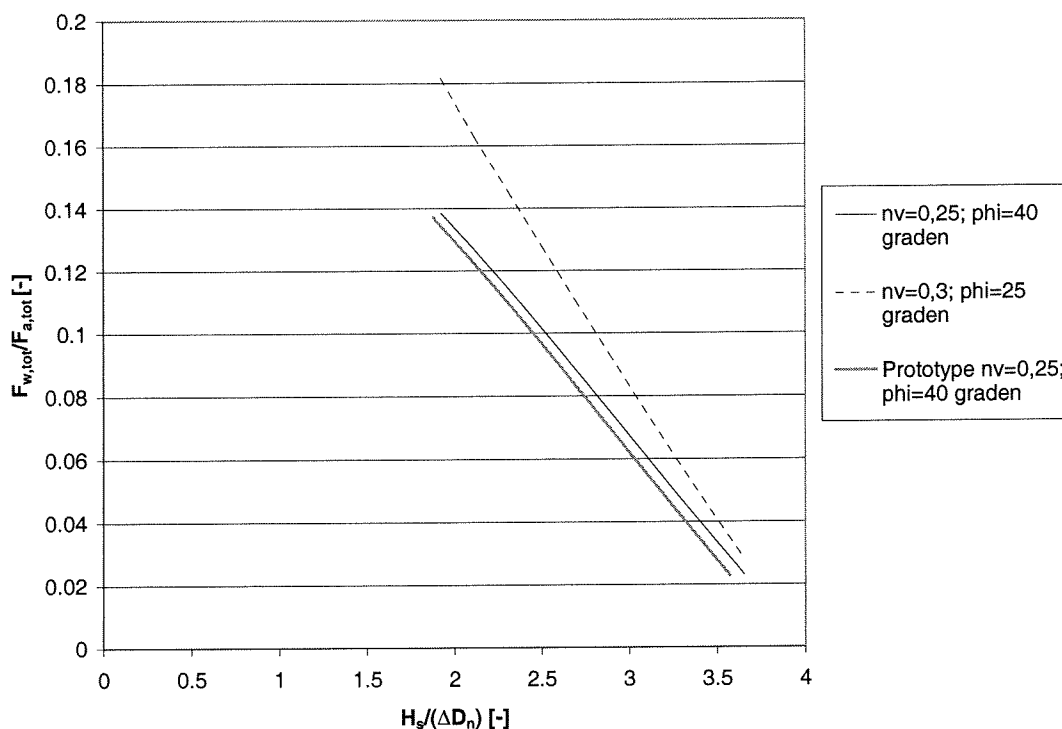


Figuur 6.19: Verloop van het stijghoogteverschil over de 'armour layer'

In deze figuur is  $R_d$  het punt van maximale golfterugloop. Er zijn geen gegevens beschikbaar over dit verloop van de stijghoogte met betrekking tot de experimenten. Om kwalitatief de invloed van de plaatsingsdichtheid op dit faalmechanisme te geven zijn er gemiddelde waarden genomen voor het stijghoogteverschil per gebied. Deze waarden zijn in bijlage XIII opgenomen, waar het resultaat van de volledige berekening is weergegeven. Het nulpunt voor de z-as is gelijk gesteld aan de stilwaterlijn. Met behulp van deze schattingen kan de totale kracht berekend worden. Als gevolg van de opwaartse kracht wordt de wrijvingskracht in gebied II en III gelijk aan 0. Dit betekent dat de kubus opgelicht wordt.

Bij een  $n_v$  van 0,3 neemt de hoek van inwendige wrijving toe door een toename van de ruwheid. Het drukverschil over de 'armour layer' neemt af bij een lagere plaatsingsdichtheid. De kracht ten gevolge van het eigen gewicht blijft constant. De resulterende kracht op de teen neemt bij verhoging van de plaatsingsdichtheid toe.

Dezelfde berekening is uitgevoerd voor de hypothetische golfbreker uit paragraaf 6.2.2 met een  $n_v$  van 0,25. In figuur 6.20 zijn ter vergelijking de verhoudingen sterkte/belasting en  $H_s/(\Delta D_n)$  tegen elkaar uitgezet. De sterkte is uitgedrukt in de wrijvingskracht en de belasting in de aandrijvende kracht als gevolg van het eigen gewicht.



Figuur 6.20: Vergelijking experimenten met hypothetische golfbreker met betrekking tot afschuiven

Uit de figuur blijkt dat bij een verhoging van de plaatsingsdichtheid de stabiliteit afneemt bij dit faalmechanisme. De lijn voor de hypothetische golfbreker komt overeen met de lijn voor dezelfde plaatsingsdichtheid in het schaalmodel. De kleine verschillen zijn waarschijnlijk te wijten aan afrondingsfouten.

### 6.2.5 Stabiliteit tegen rotatie van een tetrapode

Er is vastgesteld dat er een rotatie nodig is om een tetrapode van zijn plaats te verwijderen. Bij rekenmethode B is een methode weergegeven om de stabiliteit van een tetrapode te bepalen. Deze methode is ontwikkeld door Hattori e.a. (2000). Om gebruik te maken van deze methode zijn echter een groot aantal parameters nodig, die niet zijn gemeten gedurende het onderzoek. Daarom is voor deze parameters een aantal waarden aangenomen die gebaseerd zijn op de literatuur. Zodoende kunnen er geen stabiliteitsrelaties opgesteld worden, maar kunnen er wel trends worden waargenomen. Verschillende plaatsingsdichtheden kunnen kwalitatief met elkaar worden vergeleken. In tabel 6.8 zijn de gebruikte waarden weergegeven.

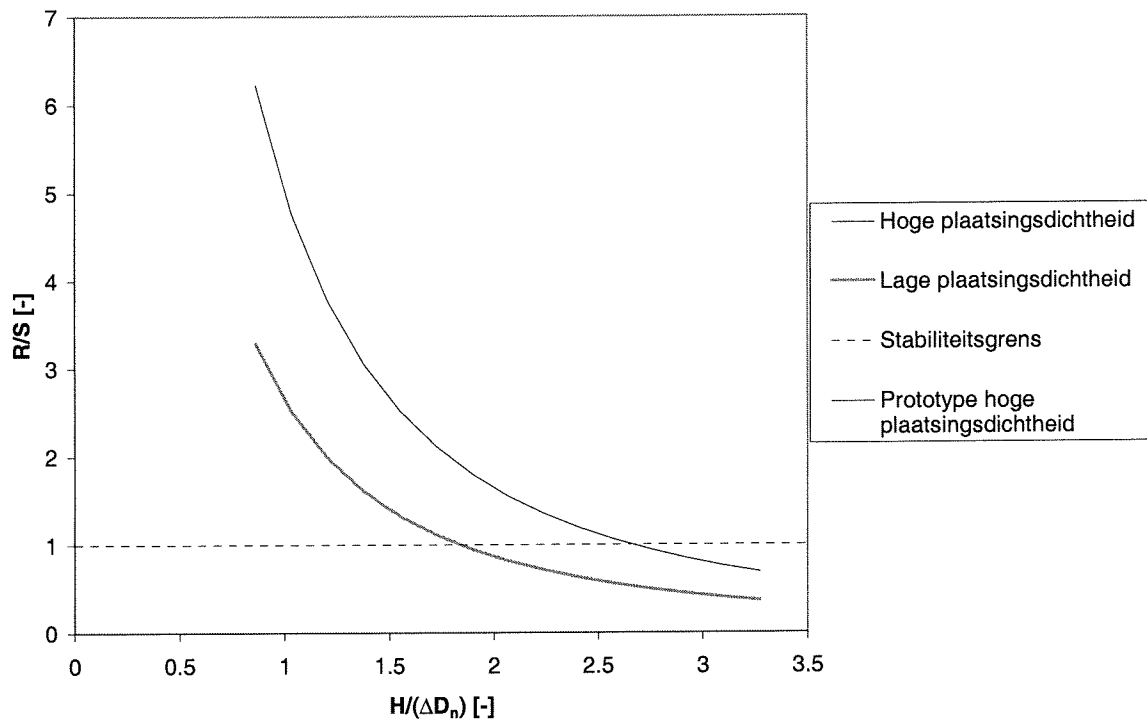
Tabel 6.8: Gebruikte parameters voor stabiliteitsberekening

Parameter	Waarde
$C_1$ [-]	0,66
$C_2$ [-]	0,75
$C_3$ [-]	0,91
$C_D$ [-]	0,5
$C_L$ [-]	1
$e_1$ [m] (hoge plaatsingsdichtheid)	0,013
$e_1$ [m] (lage plaatsingsdichtheid)	0,014
$e_2$ [m] (hoge plaatsingsdichtheid)	0,011
$e_2$ [m] (lage plaatsingsdichtheid)	0,010
$l$ [m]	0,01

- $C_1$ = volumecoëfficiënt van een element [-]  
 $C_2$ = oppervlaktecoëfficiënt voor het slepen van een element [-]  
 $C_3$ = oppervlaktecoëfficiënt voor het oplichten van een element [-]  
 $C_D$ = drag-coëfficiënt [-]  
 $C_L$ = lift-coëfficiënt [-]  
 $l$ = parallelle component van de afstand van het gewichtscentrum G tot de bovenkant van de 'armour layer' (laagdikte) bij contactpunt A [m]  
 $e_1$ = normale component van de afstand van het gewichtscentrum G tot de bovenkant van de 'armour layer' (laagdikte) bij contactpunt A [m]  
 $e_2$ = normale component van de afstand tussen het contactpunt A en de bovenkant van de 'armour layer' (laagdikte) [m]

Voor de coëfficiënten zijn de waarden gebruikt, die door Hattori, Yauchi en Kasahara zijn toegepast. Voor  $e_1 = 0.014$  m, bij een vaste waarde voor  $l$ , geldt dat de minimale stabiliteit wordt bereikt voor neerwaartse rotatie. Indien de plaatsingsdichtheid wordt vergroot moet de waarde voor  $e_1$  afnemen. Omdat de elementen dichter op elkaar zitten, moet het contactpunt tussen twee elementen lager liggen. De waarde voor  $l$  moet dan wel hetzelfde blijven, omdat anders de plaatsingsdichtheid niet zou veranderen. De positie van het element zou dan alleen anders worden.

Na invoering van deze waarden, bij toenemende golfhoogte levert dit een waarde voor de belasting op uitgedrukt in  $N_S$  en voor de sterkte uitgedrukt in  $N_L$  vermenigvuldigd met de rotatiebeweging. De verhouding tussen de sterkte en de belasting kan uitgezet worden tegen de golfhoogte. Wanneer deze verhouding kleiner dan 1 wordt, wordt het element instabiel. Voor een lage en een hogere plaatsingsdichtheid zijn berekeningen gedaan. Ook voor de hypothetische golfbreker zijn deze berekeningen gedaan en de resultaten zijn uitgezet in figuur 6.21. De resultaten van de berekening zelf zijn weergegeven in bijlage XIV.

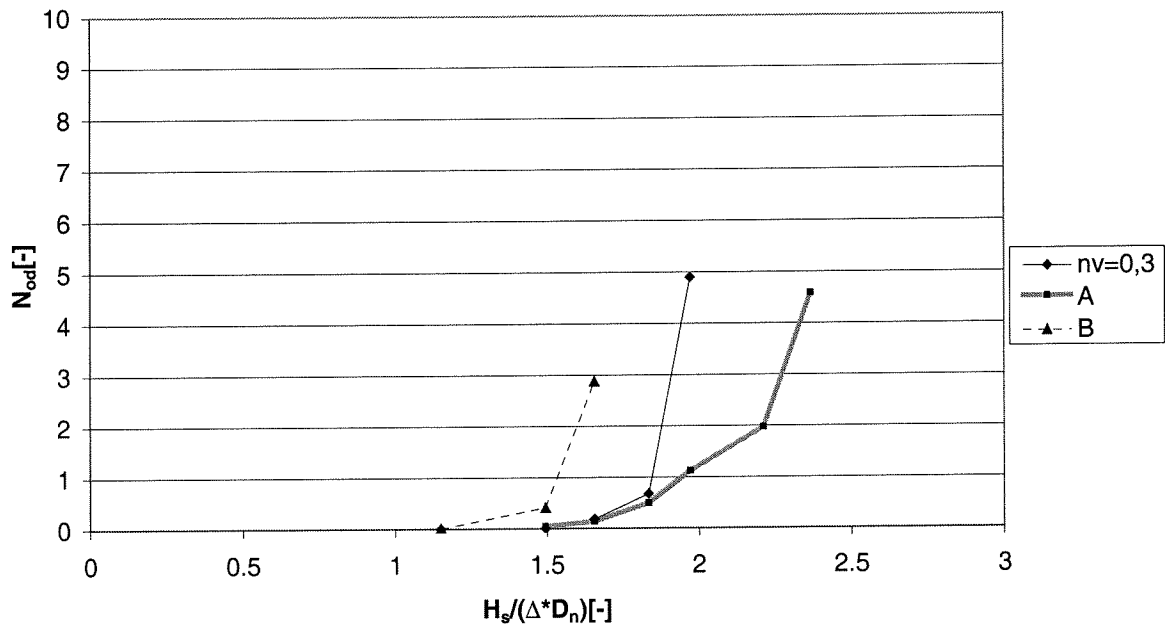


Figuur 6.21: Verhouding sterkte/belasting uitgezet tegen  $H_s/(\Delta D_n)$

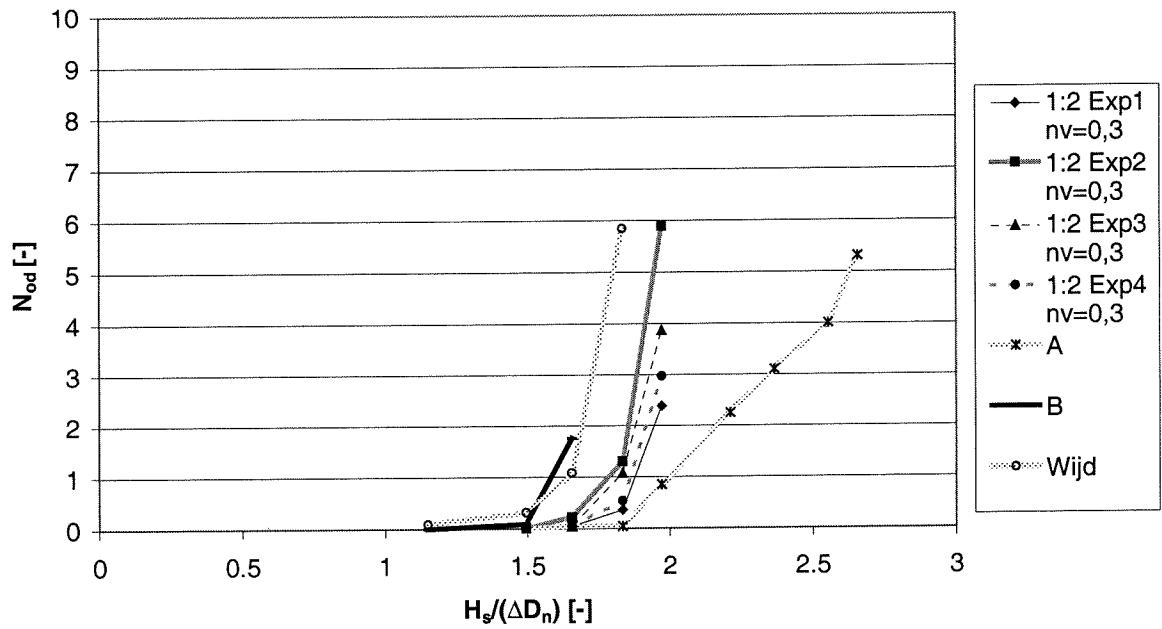
De precieze vorm en locatie van de lijnen voor verschillende plaatsingsdichtheden kunnen niet als feiten worden beschouwd. Wat deze grafiek aantoont is de verschuiving van de lijn bij een verhoging van de plaatsingsdichtheid. Zoals waargenomen bij de experimenten bij een plaatsingsdichtheid van 0,4 verliest een element zijn stabiliteit rond een golfhoogte van 0,11 meter en bij een hogere plaatsingsdichtheid treedt dit op rond een golfhoogte van 0,15 meter. Toename van de stabiliteit tegen dit faalmechanisme bij een verhoging van de plaatsingsdichtheid kan met deze berekening worden aangetoond. De waarden voor het prototype vallen precies samen met de waarden voor het schaalmodel. Het lijkt erop dat dit faalmechanisme in het schaalmodel vergelijkbaar is met de situatie in de werkelijkheid.

### 6.2.6 Analyse breuksteen 'armour layer'

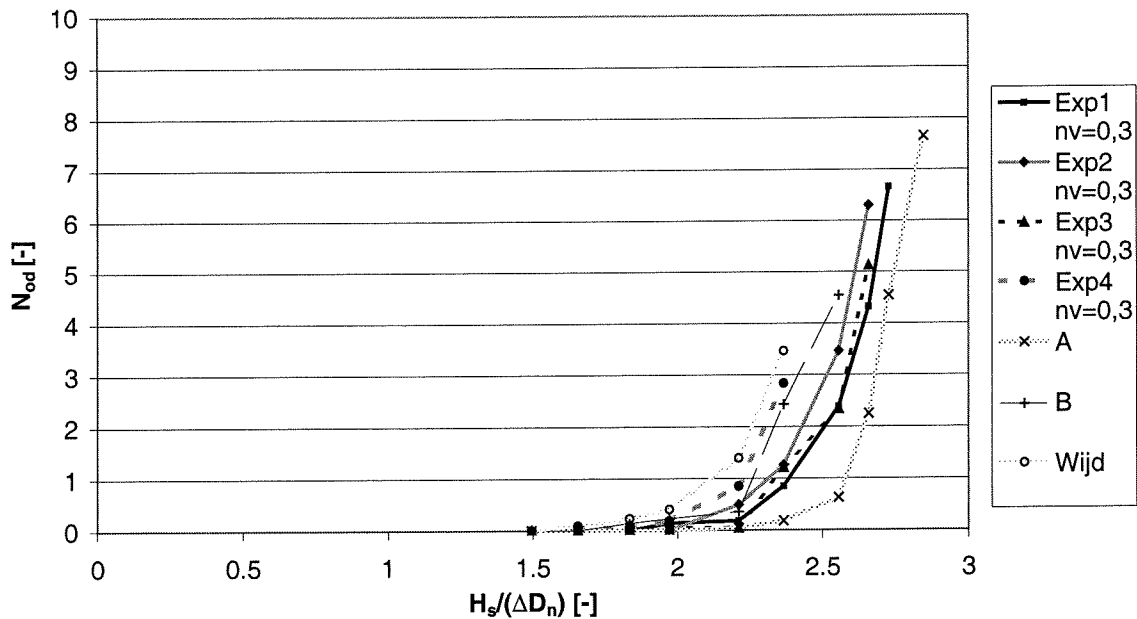
De plaatsingsdichtheid is bij breuksteen op een andere manier gewijzigd dan bij tetrapoden en kubussen. Bij breuksteen is de laagdikte veranderd door het toepassen van andere plaatsingsmethoden. Methode A hield recht op staande elementen in en kenmerkte zich door een groot zelfherstellend vermogen, waardoor de constructie pas later het bezwijkstadium bereikte. Methode B hield plat liggende elementen in en vertoonde totaal geen zelfherstellend vermogen. In paragraaf 6.1.5 zijn per talud en per plaatsingsmethode de schadeverlopen weergegeven. Zoals verwacht bleek dat een verflauwing van de helling de stabiliteit verbeterde. In figuur 6.22, figuur 6.23 en figuur 6.24 zijn per talud de verschillende plaatsingsmethoden met elkaar vergeleken.



Figuur 6.22: Vergelijking schadeontwikkeling verschillende plaatsingsmethoden bij talud 1:1,5



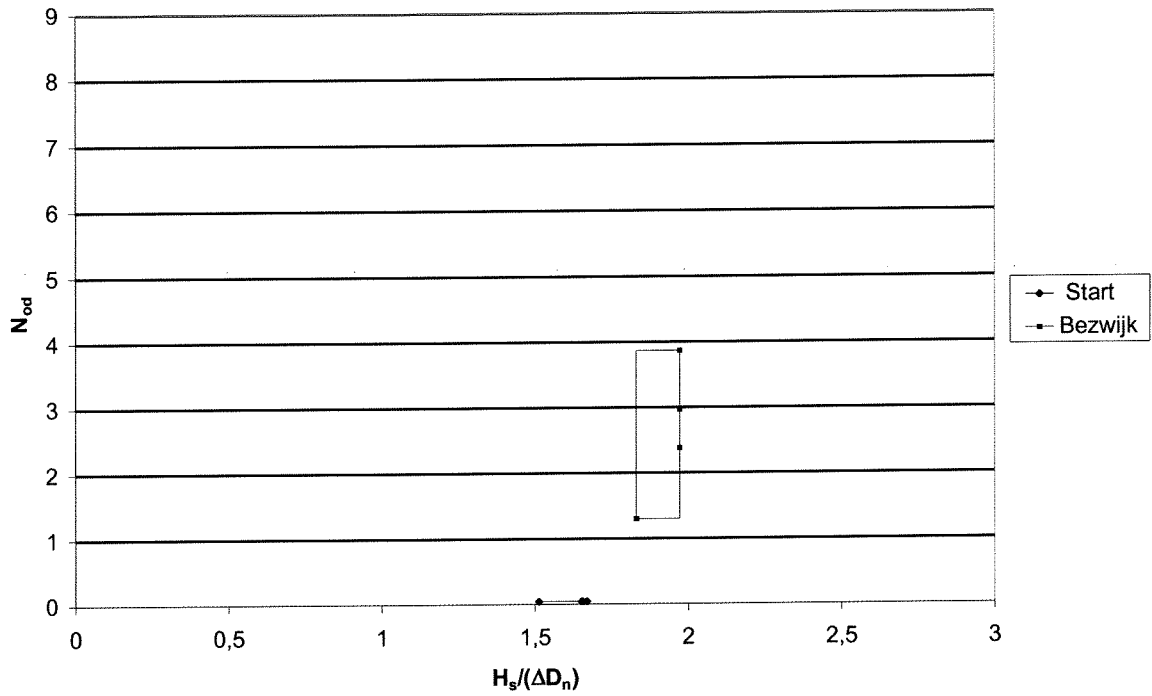
Figuur 6.23: Vergelijking schadeontwikkeling verschillende plaatsingsmethoden bij talud 1:2



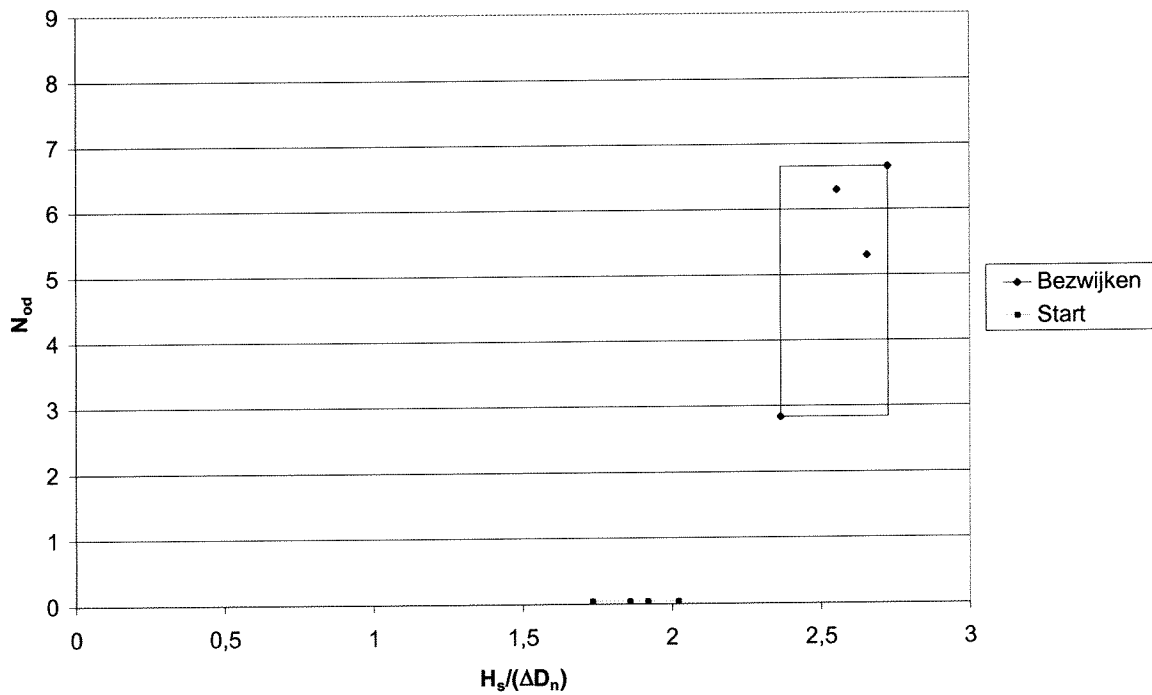
Figuur 6.24: Vergelijking schadeontwikkeling verschillende plaatsingsmethoden bij talud 1:3

Bij alle taluds is duidelijk zichtbaar dat methode A de meest stabiele constructie oplevert. De 'armour layer' van wijd gegradeerde breuksteen en methode B leveren de minst stabiele constructie op. De invloed wordt echter minder bij flauwere taluds. De normale plaatsingsmethode bevindt zich qua stabiliteit hiertussenin. Dat methode B in de meeste gevallen het minst stabiel is, is te verklaren door het gebrek aan zelfherstellend vermogen. De normale plaatsingsmethode heeft dit wel en methode A zelfs erg veel. Wat betreft het schadeverloop van de wijd gegradeerde breuksteen kan het volgende gezegd worden. Deze 'armour layer' is opgebouwd met grote breuksteen elementen, en de ruimte hiertussen is opgevuld met kleine breuksteen elementen. Deze kleine elementen spoelen eenvoudig weg. Wanneer deze eenmaal zijn weggespoeld ontstaat er veel ruimte voor de grotere elementen om te bewegen en uiteindelijk om weggespoeld te worden. Het snel verdwijnen van de kleine elementen staat ook veel herschikking toe en zodoende het verschuiven van elementen naar andere kleurenbanden.

Net als bij kubussen en tetrapoden zal voor breuksteen getracht worden 'gebieden' aan te geven voor 'start-van-schade' en bezwijken. In figuur 6.25 en 6.26 zijn deze gebieden aangegeven voor de taluds 1:2 en 1:3 bij normale plaatsing. Wederom geldt dat daar waar slechts één experiment is uitgevoerd ook slechts één punt genoemd kan worden.



Figuur 6.25: 'Start-van-schade' en bezwijken enkele 'armor layer' breuksteen bij talud 1:2 (normale plaatsing)



Figuur 6.26: 'Start-van-schade' en bezwijken enkele 'armor layer' breuksteen bij talud 1:3 (normale plaatsing)

Tabel 6.9: Indicatie 'start-van-schade' en bezwijken voor 'armour layer' breuksteen

Type plaatsing	Talud	'Start-van-schade'		Bezwijken	
		$H_s/(\Delta D_n)[-]$	$N_{od}[-]$	$H_s/(\Delta D_n)[-]$	$N_{od}[-]$
Normaal	1:1,5	1,57	0,045	1,97	4,91
A	1:1,5	1,47	0,045	2,54	4,59
B	1:1,5	1,33	0,045	1,66	2,88
Normaal	1:2	1,51-1,67	0,045	1,83-1,97	1,31-3,87
A	1:2	1,64	0,045	2,66	5,31
B	1:2	1,46	0,045	1,66	1,76
Wijde gradering	1:2	1,10	0,045	1,84	5,85
Normaal	1:3	1,73-2,02	0,045	2,37-2,73	2,84-6,66
A	1:3	2,24	0,045	2,85	7,65
B	1:3	1,75	0,045	2,37	2,43
Wijde gradering	1:3	1,56	0,045	2,37	3,47

De trend van een zwakke 'armour layer' in het geval van wijde gradering en methode B blijkt ook duidelijk uit tabel 6.9, idem de sterke 'armour layer' bij methode A.

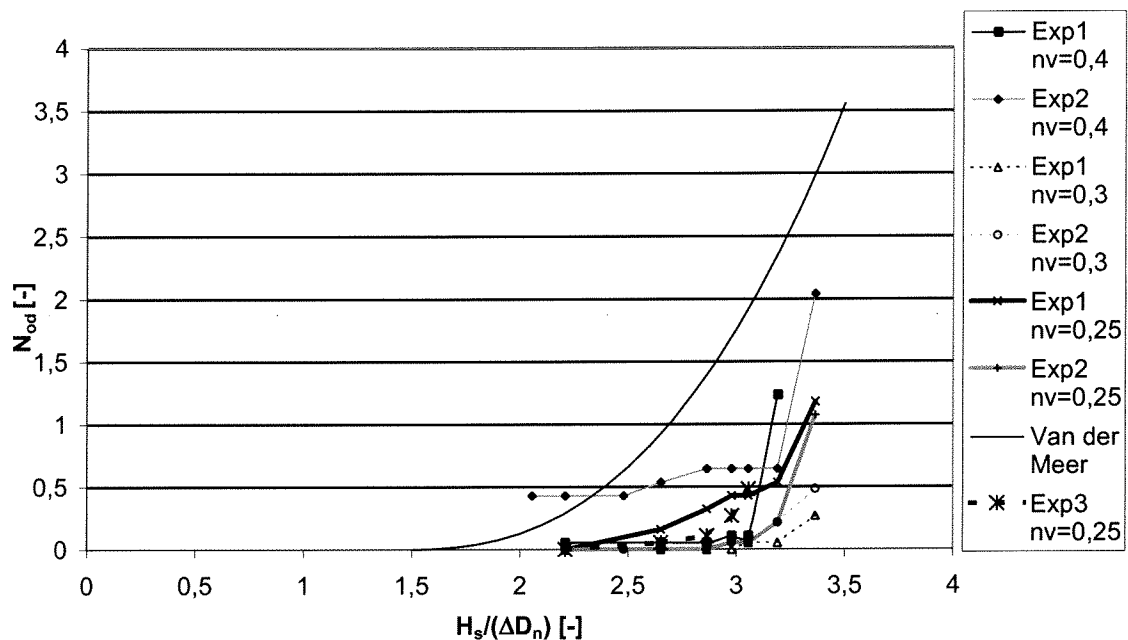
### 6.3 Vergelijking met voorgaande onderzoeken

#### 6.3.1 Kubussen

In het huidige onderzoek zijn twee verschillende opstellingen onderzocht met betrekking tot kubussen. Als eerste zijn experimenten uitgevoerd zonder een verstevigde teen en vervolgens zijn deze experimenten tweemaal herhaald met een verstevigde teen. De eerste serie experimenten kan als illustratief worden beschouwd voor het vaststellen van een specifiek faalmechanisme, namelijk afschuiven. Om de schadecurven te vergelijken met die van voorgaand onderzoek zijn ze echter niet geschikt. Bij andere onderzoeken was er immers geen sprake van bezwijken als gevolg van een te zwakke teen. De tweede serie experimenten kan worden vergeleken met de formules van Van der Meer. De proefopstellingen zijn goed met elkaar te vergelijken. De verschillende opstellingen zijn weergegeven in bijlage I en II. Voor vergelijking van de schaalmodellen kan gebruik worden gemaakt van het dimensieloze kental  $h_0/h_c$ , waarbij  $h_0$  gelijk is aan de diepwaterhoogte en  $h_c$  gelijk is aan de waterdiepte bij de teen van de constructie. In het schaalmodel van Van der Meer is dit kental gelijk aan 2,25 en in het huidige onderzoek is dit gelijk aan 2,7. Aangezien een oneindig lang talud is gesimuleerd in het huidige onderzoek, omdat schade aan de kruin en het achtertalud niet werd onderzocht, is een vergelijking met de kruinhoogte als parameter niet relevant.

De grafieken waarin de schadeverlopen worden vergeleken zijn ook opgenomen in bijlage X.





Figuur 6.27: Vergelijking experimenten met de theorie van Van der Meer

In figuur 6.27 zijn de resultaten van de experimenten vergeleken met de theorie van Van der Meer (1988). De experimenten zijn vergelijkbaar met de theorie, omdat er sprake is van een gelijksoortige proefopstelling en een dubbele ‘armour layer’. Van der Meer past een  $n_v$  van de ‘armour layer’ toe van 0,33. Om deze te bepalen maakt Van der Meer gebruik van een profielmeting. Hiermee kan de laagdikte veel nauwkeuriger worden bepaald dan in het voorliggende onderzoek en is de hieruit berekende  $n_v$  niet vergelijkbaar met de in het huidige onderzoek gebruikte  $n_v$ . In het geval dat dezelfde methode zou worden gebruikt, zou in het onderzoek van Van der Meer een  $n_v$  van rond de 0,5 gevonden worden. De geteste golfbrekers hebben een lagere  $n_v$  en zijn stabielier dan de grafiek volgens Van der Meer. Dit is eenvoudig te verklaren met het feit dat de theorie van Van der Meer geen rekening houdt met de plaatsingsdichtheid. Een hogere plaatsingsdichtheid levert naar verwachting een betere stabiliteit op. De proefopstelling van Van der Meer benadert niet de zetsteenbekledingachtige vorm. Hier treden dan ook niet de faalmechanismen op die typerend zijn voor een zetsteenbekleding. Een ander verschil is het toegepaste golfspectrum. Daar waar Van der Meer gebruik maakt van een Pierson Moskowitz spectrum, wordt in het huidige onderzoek een JONSWAP-spectrum toegepast. Bovendien maakt Van der Meer gebruik van 3000 golven en past hij tussentijds herstel toe. In tabel 6.10 zijn de ‘start-van-schade’- en bezwijkcriteria volgens de theorie van Van der Meer gegeven.

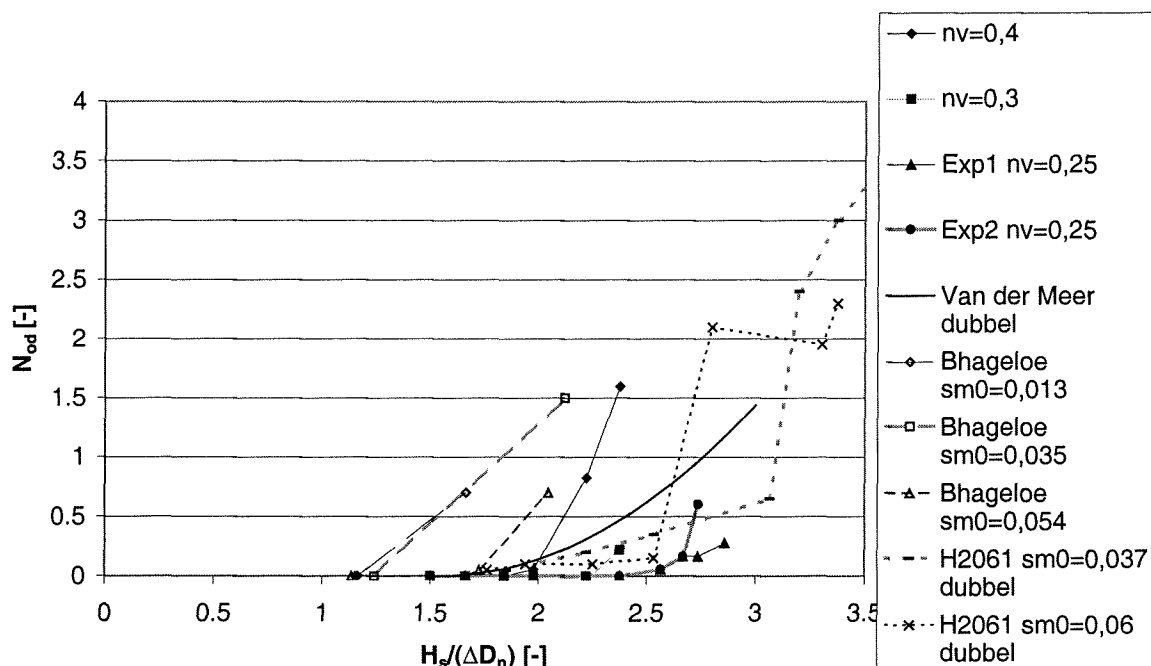
Tabel 6.10: Vergelijking ‘start-van-schade’- en bezwijkcriteria volgens Van der Meer met het huidige onderzoek

Onderzoek	$n_v$ [-]	‘Start-van-schade’		Bezwijken	
		$H_s/(\Delta D_n)$ [-]	$N_{od}$ [-]	$H_s/(\Delta D_n)$ [-]	$N_{od}$ [-]
Van der Meer	0,5	1,8	0,055	2,8	2
Huidig	0,4	2,47	0,055	-	-
Huidig	0,3	2,98-3,07	0,055	-	-
Huidig	0,25	2,32-3,05	0,055	-	-

$N_{od} = 2$  is door Van der Meer bezwijken genoemd. Deze waarde wordt slechts in één geval bereikt bij een  $n_v$  van 0,4 bij een waarde van  $H_s/\Delta D_n$  van 3,3. 'Start-van-schade' begint bij Van der Meer bij een waarde van  $H_s/(\Delta D_n)$  van 1,8. In het huidige onderzoek liggen deze waarden boven de 2,3. Concluderend kan worden gezegd dat de vergelijking met Van der Meer voldoet aan de verwachtingen. Een hogere plaatsingsdichtheid zal leiden tot een betere stabiliteit behalve in geval van te hoge plaatsingsdichtheden.

### 6.3.2 Tetrapoden

Tetrapoden zijn in het huidige onderzoek toegepast in één enkele laag. Deze situatie kan worden vergeleken met die in het onderzoek van Bhageloe (1998), die ook een enkele laag toepaste. Bhageloe maakte gebruik van een proefopstelling gelijk aan die van Van der Meer met een  $h_0/h_c$  van 2,25. Bhageloe maakte net als Van der Meer gebruik van een Pierson-Moskowitz spectrum, maar pastte telkens slechts 1000 golven toe en deed geen tussentijds herstel. Ter vergelijking met de traditionele golfbrekers met dubbele 'armour layers' zijn de theorie van Van der Meer en de resultaten van het golfbrekeronderzoek H2061 (De Jong 1996) gebruikt. De resultaten van deze vergelijking zijn opgenomen in figuur 6.28. Bij H2061 is onderzoek gedaan naar de invloed van de kruinhoogte en de schadeontwikkeling op het voorttalud, het achtertalud en de kruin. In het huidige onderzoek is alleen gekeken naar schade op het voorttalud. Het talud is zodanig gemaakt dat er sprake is van een 'oneindig' talud. Bij enkele experimenten van H2061 is gebruik gemaakt van een zodanig hoge kruinhoogte dat er geen schade meer optrad op het achtertalud en de kruin. Deze situatie is vergelijkbaar met de opstelling in het huidige onderzoek en de data hiervan zullen gebruikt worden ter vergelijking. Bij de experimenten van H2061 is gebruik gemaakt van een JONSWAP spectrum en 1000 golven.



Figuur 6.28: Vergelijking experimenten met Bhageloe, H2061 en de theorie van Van der Meer

Bhageloe onderzocht verschillende golfsteilheden in zijn onderzoek. De golfsteilheid  $s_{m0}$  van 0,054 komt overeen met de golfsteilheid in het huidige onderzoek. De  $n_v$  in het onderzoek van Bhageloe was ongeveer 0,62. Dit is beduidend hoger dan de waarden van  $n_v$  toegepast in het huidige onderzoek. De resultaten gevonden door Bhageloe leveren dan ook een minder stabiele ‘armour layer’ op. Het resultaat van Bhageloe bevestigt echter wel de waargenomen trend van een verbetering van de stabiliteit in het geval van toename van de plaatsingsdichtheid. Bhageloe stelt vast dat er sprake is van progressief bezwijkgedrag. Dit is niet meer het geval bij de in het huidige onderzoek toegepaste hogere plaatsingsdichtheden. De in het huidige onderzoek gevonden waarden voor ‘start-van-schade’ zijn alle hoger dan de waarden gevonden in voorgaande onderzoeken. Dit geldt ook voor de waarden van het schadegetal voor bezwijken in het geval van een vergelijking met Bhageloe. De  $N_{od}$ -waarden in het huidige onderzoek zijn beduidend lager. Dit komt waarschijnlijk door het gebruik van een andere definitie voor het bezwijken. De dubbele ‘armour layers’ zijn stabielier dan de onderzochte configuraties, al benadert de ‘armour layer’ met een  $n_v$  van 0,25 het schadegetal gevonden door Van der Meer behoorlijk. Zowel bij H2061 als bij Bhageloe wordt de golfsteilheid gevarieerd. De  $s_{om}$  van 0,054 benadert de in het huidige onderzoek gebruikte golfsteilheid het meest. Dit blijkt bij Bhageloe ook de meest stabiele constructie op te leveren. De  $s_{om}$  gebruikt bij H2061 verschilt van de  $s_{om}$  gebruikt in het huidige onderzoek. Uit het onderzoek van Van Gent (Van Gent e.a. 1998) blijkt echter dat  $s_{om}$  geen bijdrage levert aan de stabiliteit. In tabel 6.11 zijn de verschillende ‘start-van-schade’- en bezwijkcriteria van het voorgaande onderzoek weergegeven.

Tabel 6.11: Vergelijking ‘start-van-schade’- en bezwijkcriteria volgens voorgaande onderzoeken met het huidige onderzoek

Onderzoek	$n_v$ [-]	‘Start-van-schade’		Bezwijken	
		$H_v/(\Delta D_n)$ [-]	$N_{od}$ [-]	$H_v/(\Delta D_n)$ [-]	$N_{od}$ [-]
Van der Meer	0,5	1,8	0,055	3,0	1,5
Bhageloe	0,62	1,2	1,3-1,7	-	-
H2061	0,5	1,8	0,055	3,0	1,5
Huidig	0,4	2,00	0,055	-	-
Huidig	0,3	2,26	0,055	2,4	0,22
Huidig	0,25	2,57	0,055	2,74-2,86	0,28-0,61

### 6.3.3 Breuksteen

Het huidige onderzoek zal vergeleken worden met het onderzoek van Bhageloe, die ook één enkele ‘armour layer’ van breuksteen heeft toegepast. Wederom geldt dat Bhageloe een Pierson-Moskowitz spectrum heeft gebruikt en een  $n_v$  van 0,33. Bovendien is alleen een talud van 1:1,5 gebruikt. Een progressief schadeverloop bleek op te treden. Om een vergelijking mogelijk te maken met de traditionele dubbellaags ‘armour layers’ is de theorie van Van der Meer gebruikt. Van der Meer maakt echter gebruik van  $S$  om de schade bij breuksteen aan te geven.

$$S = \frac{A}{D_{n50}^2} \quad (6.12)$$

Bij de experimenten is telkens  $N_{od}$  gebruikt. Om een goede vergelijking mogelijk te maken moet  $S$  in de vergelijking van Van der Meer omgerekend worden naar  $N_{od}$ .  $S$  houdt rekening met de porositeit. Zodoende zou  $N_{od}$  bij een  $n_v$  van 0,33 gelijk moeten zijn aan:

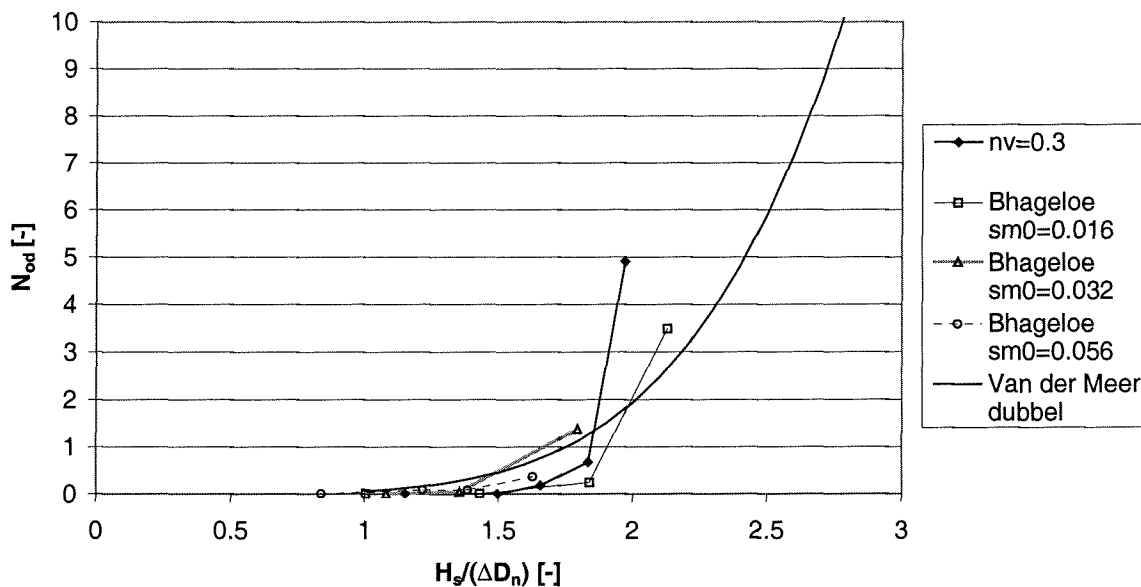
$$S = 1,33N_{od} \quad (6.13)$$

Dit is niet helemaal waar, omdat  $N_{od}$  alleen rekening houdt met elementen die uit hun kleurenband zijn verplaatst, terwijl  $S$  met iedere verplaatsing rekening houdt. De coëfficiënt 1,33 zou iets groter moeten zijn. Bovendien zal zetting en herschikking van de elementen al enige schade  $S$  opleveren zonder dat er een element is verplaatst. De relatie met  $N_{od}$  moet van de vorm zijn:

$$S = AN_{od} + B \quad (6.14)$$

Gesteld kan worden dat  $S$  over het algemeen twee maal zo groot is als  $N_{od}$ . Voor de vergelijkingen zal hiermee gewerkt worden.

In figuur 6.29, 6.30 en 6.31 zijn voor de verschillende taluds de resultaten vergeleken met voorgaande onderzoeken.



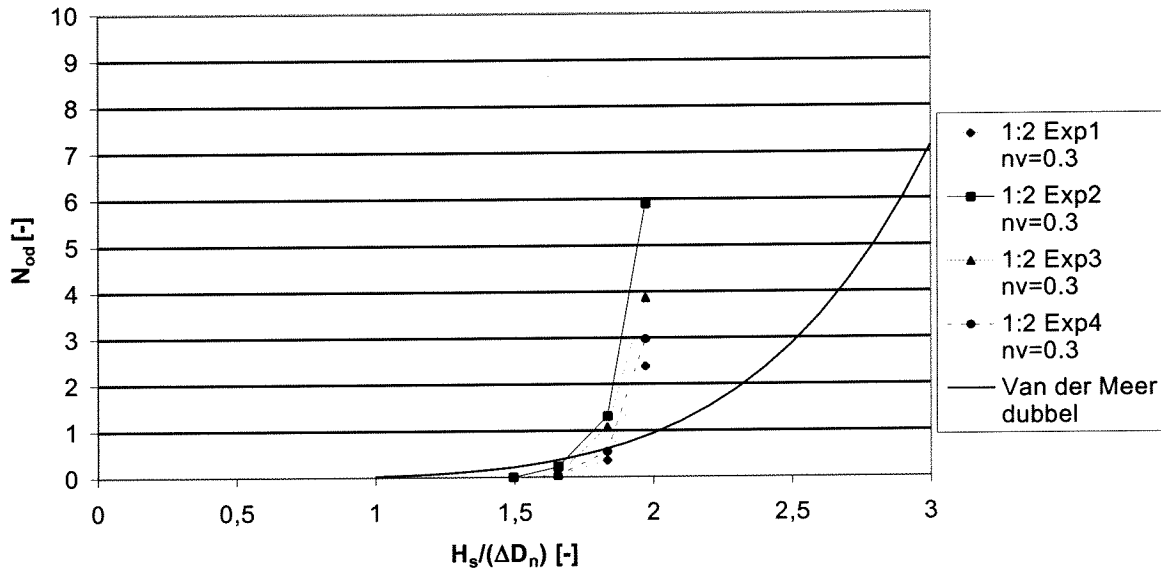
Figuur 6.29: Vergelijking experimenten talud 1:1,5 met Bhageloe en de theorie van Van der Meer

De 'start-van-schade'- en bezwijkcriteria gevonden in de voorgaande onderzoeken zijn opgenomen in tabel 6.12.

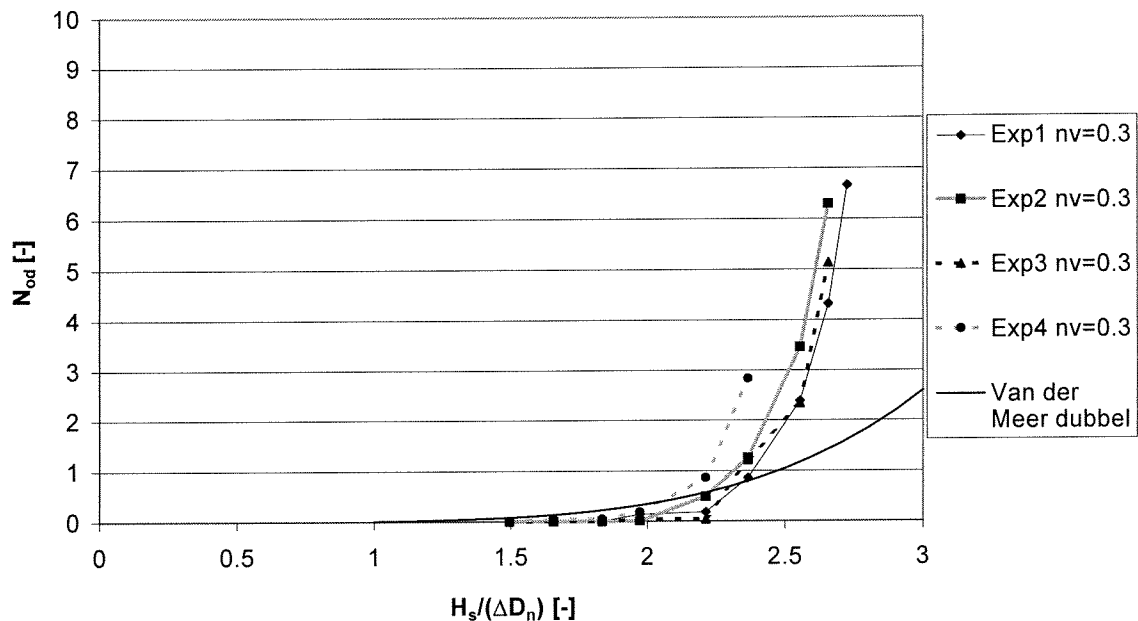
Tabel 6.12: Vergelijking 'start-van-schade'- en bezwijkcriteria volgens voorgaande onderzoeken met het huidige onderzoek

Onderzoek	$n_v$ [-]	'Start-van-schade'		Bezwijken	
		$H_s/(\Delta D_n)$ [-]	$N_{od}$ [-]	$H_s/(\Delta D_n)$ [-]	$N_{od}$ [-]
Van der Meer	0,33	1,0	0,045	2	4
Bhageloe	0,33	1,2	0	1,5	0,2
Huidig	0,3	1,57	0,045	1,97	4,91

Uit figuur 6.29 volgt dat de resultaten van de huidige experimenten een even stabiele 'armour layer' tonen als de resultaten van Bhageloe. Enige verschillen kunnen worden geweten aan het verschillende golfspectrum en het gebrek aan herhalingsproeven. Er zijn te weinig herhalingen gedaan om een eenduidig schadeverloop aan te geven. De theorie van Van der Meer geeft voor een dubbele 'armour layer' een vergelijkbare stabiliteit. De waarden voor 'start-van-schade' van de voorgaande onderzoeken komen overeen met die uit het huidige onderzoek. Het bezwijken treedt bij het huidige onderzoek op rond hetzelfde punt als werd vastgesteld door Bhageloe en Van der Meer. De waarde van  $N_{od}$  is bij het huidige onderzoek alleen veel groter. Dit kan worden verklaard door het feit dat er sprake is van progressief bezwijken. In zeer korte tijd tredt er heel veel schade op. Bhageloe bevond zich in zijn onderzoek waarschijnlijk aan het begin van deze fase, terwijl er in het huidige onderzoek sprake was van een later stadium.



Figuur 6.30: Vergelijking experimenten talud 1:2 met de theorie van Van der Meer



Figuur 6.31: Vergelijking experimenten talud 1:3 met de theorie van Van der Meer

Bij een talud van 1:2 en 1:3 kan duidelijker een verloop van de schadecurve worden gegeven aangezien er hier meer herhalingsproeven zijn toegepast. De theorie van Van der Meer geeft hier duidelijk een veel stabielere golfbreker in het geval van een dubbele ‘armour layer’.

In tabel 6.13 zijn voor de taluds 1:2 en 1:3 de resultaten van de voorgaande onderzoeken gegeven voor de ‘start-van-schade’- en bezwijkcriteria.

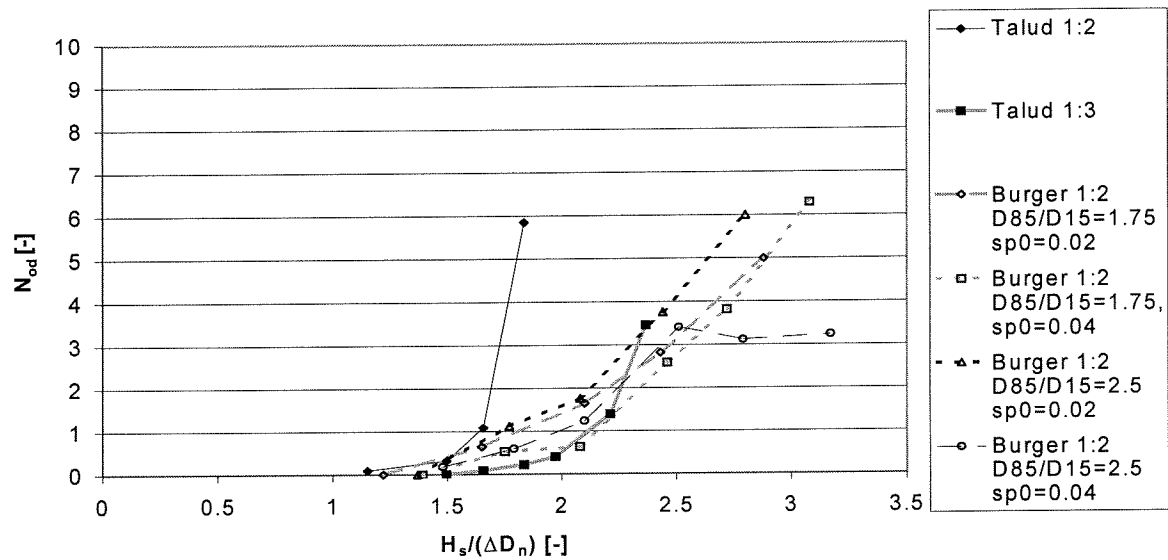
Tabel 6.13: Vergelijking ‘start-van-schade’- en bezwijkcriteria volgens voorgaande onderzoeken met het huidige onderzoek

Onderzoek	Talud	$n_v$ [-]	‘Start-van-schade’		Bezwijken	
			$H_s/(\Delta D_n)$ [-]	$N_{od}$ [-]	$H_s/(\Delta D_n)$ [-]	$N_{od}$ [-]
Van der Meer	1:2	0,33	1,1	0,045	2,7	4
	1:3	0,33	1,4	0,045	3,5	6
Huidig	1:2	0,3	1,51-1,67	0,045	1,83-1,97	1,31-3,87
Huidig	1:3	0,3	1,73-2,02	0,045	2,37-2,73	2,84-6,66

De ‘start-van-schade’ waarden gevonden in het huidige onderzoek liggen hoger dan de waarden gevonden in de voorgaande onderzoeken. Het bezwijken treedt echter veel eerder op, wat begrijpelijk is, aangezien er hier sprake is van een enkele ‘armour layer’. De waarden voor  $N_{od}$  waarbij bezwijken optreedt komen wel overeen.

Tot slot zijn de experimenten met een ‘armour layer’ van breuksteen met een wijde gradering vergeleken met de resultaten van de experimenten van Burger (Burger 1995). Burger paste voor een talud van 1:2 ook verschillende graderingen toe. Aangezien Burger golfbrekers met een lage kruin onderzocht, kan er geen directe vergelijking worden gedaan. Bovendien gebruikte Burger een dubbele ‘armour layer’. Wel kunnen de gegevens worden gebruikt om trends waar te nemen. In figuur 6.32

zijn de resultaten van het huidige onderzoek vergeleken met de resultaten van het onderzoek van Burger.



Figuur 6.32: Vergelijking experimenten met een wijde gradering met de experimenten van Burger

Burger paste twee verschillende golfsteilheden toe. De golfsteilheid van  $s_{mo} = 0,04$  kan het beste vergeleken worden met de huidige experimenten. Burger stelt vast dat een wijdere gradering een minder stabiele constructie oplevert. Deze trend werd ook in de huidige experimenten waargenomen. De golfbrekers onderzocht door Burger blijken veel stabielere. Dit kan verklaard worden door het feit dat Burger een lage kruin toepaste. Hierdoor zal er minder schade optreden aan het voortalud. Burger paste ook twee golfsteilheden toe, beide verschillend van de golfsteilheid die in het huidige onderzoek werd gebruikt. De golfsteilheid van 4% komt het beste overeen met de golfsteilheid gebruikt in het huidige onderzoek. Deze golfsteilheid levert stabielere constructies op.

## 7. Schadecriterium met plaatsingsdichtheid

### 7.1 Gebreken huidig schadecriterium

Het gebruik van  $N_{od}$  is onduidelijk in geval van variërende plaatsingsdichtheden. Een hoge plaatsingsdichtheid betekent de aanwezigheid van veel ‘armour layer’ elementen op een bepaald oppervlakte. In het geval van een lage plaatsingsdichtheid zijn er juist weinig ‘armour layer’ elementen op hetzelfde oppervlak aanwezig. De verdwijning van bijvoorbeeld vijf ‘armour layer’ elementen is in het geval van de lage plaatsingsdichtheid veel schadelijker dan in het geval van de hoge plaatsingsdichtheid. De  $N_{od}$ -waarde van Van der Meer houdt hier geen rekening mee.

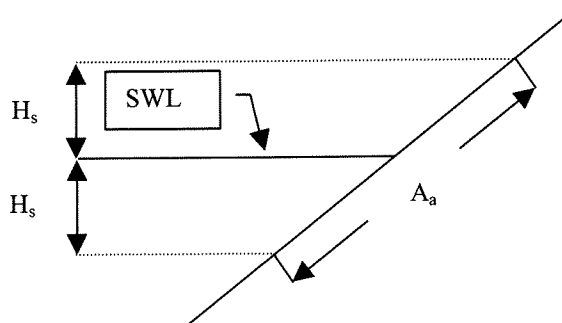
Een andere aanmerking, die gemaakt kan worden over de bestaande schadecriteria is dat er niet gewerkt wordt met een aangevallen oppervlak van de ‘armour layer’. Het is eenvoudig voor te stellen dat onder bepaalde omstandigheden bepaalde delen van de golfbreker niet aangevallen worden. Dit kan gebeuren in het geval van niet al te hoge golven. De schade die op zou treden zou alleen het aangevallen gebied moeten worden aangerekend.

Van der Meer rekent in zijn schadecriterium alleen met verdwenen elementen en kijkt niet naar de manier waarop deze elementen zijn verdwenen. Uit de toegepaste experimenten in het huidige onderzoek blijkt dat de manier waarop schade optreedt de grootte van deze schade bepaald (zie paragraaf 7.4).

### 7.2 Bepaling aangevallen oppervlak

Het schadegebied moet anders gedefinieerd worden. Een mogelijkheid is om dit gebied te relateren aan de significante golfhoogte. Dit gebied zou dus toe moeten nemen in geval van een toename van de significante golfhoogte. Dit klinkt aannemelijk omdat bij een hogere golf schade kan plaatsvinden in een hoger gelegen gebied. In geval van een constante afmeting van het oppervlak zou deze schade dus worden toegerekend aan een gebied waar het weggeslagen element helemaal niet vandaan komt.

Voorgesteld wordt om als aangevallen gebied een gebied te nemen van één maal  $H_s$  onder de SWL tot één maal  $H_s$  boven de waterlijn, zoals weergegeven in figuur 7.1.



Figuur 7.1: Definitie aangevallen oppervlak ( $A_a$ ) in dwarsdoorsnede



$A_a$  is dus als volgt gedefinieerd.

$$A_a = B \frac{2H_s}{\sin \alpha} \quad (7.1)$$

$A_a$ = aangevallen oppervlak [ $m^2$ ]  
 $B$ = beschouwde breedte [m]

Verder onderzoek zal uit moeten wijzen of dit gebied het meest geschikt is als definitie voor het aangevallen oppervlak of dat er misschien beter een gebied genomen kan worden met andere afmetingen. Gedacht kan worden aan een factor waarmee het aangevallen gebied nog mee vermenigvuldigd moet worden.

### 7.3 Plaatsingsdichtheid in het schadecriterium

De plaatsingsdichtheid kan, gebruikmakend van vergelijking 7.2, in het schadecriterium verwerkt worden.

$$N_a = \frac{(1 - n_v)}{D_n^2} \quad (7.2)$$

$N_a$ = aantal elementen per eenheid van oppervlakte [ $m^{-2}$ ]

Het aantal elementen  $N$  in het aangevallen oppervlak  $A_a$  is dan gelijk aan:

$$N = A_a N_a \quad (7.3)$$

Het nieuwe schadegetal  $N_{on}$  kan nu gedefinieerd worden als zijnde:

$$N_{on} = \frac{N_o}{N} = \frac{N_o D_n^2 \sin \alpha}{2H_s B (1 - n_v)} \quad (7.4)$$

$N_o$ = aantal verplaatste elementen [-]

Dit nieuwe schadegetal is gerelateerd aan de significante golfhoogte en de plaatsingsdichtheid van de 'armour layer'. Bij toename van de plaatsingsdichtheid neemt  $N_{on}$  af. Dit betekent dat dezelfde schade een lager schadegetal geeft in het geval van een hoge plaatsingsdichtheid. Voor de hoge plaatsingsdichtheid is deze schade veel minder belangrijk dan dezelfde schade voor een lage plaatsingsdichtheid, omdat er in het laatste geval veel minder elementen in totaal zijn.

## 7.4 Schadevormen

Om het schadegetal te bepalen maakt Van der Meer gebruik van  $N_{od}$ , eventueel in combinatie met  $N_{or}$ . Deze twee getalwaarden worden niet gebruikt in het geval van breuksteen. Bij breuksteen wordt met de parameter  $S$  gewerkt. Dit zijn de enige twee vormen van schade die Van der Meer onderscheid en beiden hebben hetzelfde gewicht. Uit de huidige experimenten blijkt dat er 3 verschillende vormen van schade kunnen worden onderscheiden.

- $N_{od}$  = weggespoelde elementen
- $N_{or}$  = 'rockende' elementen
- $N_{os}$  = verschoven elementen

Deze schadevormen hebben bovendien niet allemaal hetzelfde gewicht. De verschillende schadevormen leveren niet dezelfde bijdrage aan de totale schade. Elke afzonderlijke schadevorm moet met een bepaalde coëfficiënt worden vermenigvuldigd, die maximaal gelijk is aan 1.  $N_{od}$  is de zwaarste vorm van schade. Het wegslaan van een element levert een gat op in de 'armour layer'. Dit kan natuurlijk later opgevuld worden door andere elementen, maar in principe resulteert dit in een gat van de afmeting van de steen.  $N_{od}$  moet met een bepaalde coëfficiënt vermenigvuldigd worden.

$$N_{od1} = aN_{od} \quad (7.5)$$

$a$  = coëfficiënt voor weggespoelde elementen [-]

$N_{od1}$  = 'N<sub>od</sub>-waarde' die gebruikt kan worden om het schadegetal te bepalen [-]

Aangezien dit de zwaarste vorm van schade is, is het aannemelijk om  $a$  de waarde van 1 te geven.

$N_{os}$  telt minder zwaar dan  $N_{od}$ . Weggeschoven elementen laten namelijk niet per se een gat achter van dezelfde afmetingen. Als gevolg van herschikking van de achtergelegen elementen ontstaan er spleten en gaten van veel kleinere afmetingen. Zodoende bezit deze coëfficiënt een lagere waarde. De waarde die hieraan toegewezen dient te worden moet nog onderzocht worden.

$$N_{os1} = bN_{os} \quad (7.6)$$

$b$  = coëfficiënt voor weggeschoven elementen [-]

$N_{os1}$  = 'N<sub>os</sub>-waarde' die gebruikt kan worden om het schadegetal te bepalen [-]

Onder schuiven wordt verstaan het geleidelijk wegzakken van een element in een band van een andere kleur. Als dit element tot over de helft van de anders gekleurde band is gezakt, wordt het niet meer tot  $N_{os}$  gerekend, maar tot  $N_{od}$ .

Als laatste is er nog  $N_{or}$  voor de 'rockende' elementen. Wederom wordt hier een coëfficiënt aan toegevoegd:

$$N_{or1} = cN_{or} \quad (7.7)$$

$c$  = coëfficiënt voor 'rockende' elementen (in verband met breken) [-]  
 $N_{or1}$  = 'N<sub>or</sub>-waarde' die gebruikt kan worden om het schadegetal te bepalen [-]

Het idee achter deze variabele is dat in geval van betonnen elementen het 'rocken' van de elementen kan leiden tot schade als gevolg van breken. Denk hierbij aan het afbreken van een poot van een tetrapode. Dit impliceert dat deze  $N_{or}$  veel belangrijker is bij slanke elementen dan in het geval van kubussen of breuksteen. De coëfficiënt  $c$  is hier dus afhankelijk van het gebruikte element.

Daarnaast impliceert het fenomeen 'rocken' niet alleen maar schade, omdat het tot breken kan leiden. Er kunnen twee vormen van 'rocken' worden onderscheiden:

- Het element herschikt en stabiliseert.
- Het element 'rockt' zich los en wordt uiteindelijk weggeslagen.

'Rocken' kan dus ook tot bezwijken leiden als gevolg van wegspoelen. Het kan een beginfase van bezwijken zijn.  $N_{or}$  is dus voor breuksteen ook van belang:

$$N_{or1} = dN_{or} \quad (7.8)$$

$d$  = coëfficiënt voor 'rockende' elementen (in verband met verlies stabiliteit) [-]  
 $N_{or1}$  = 'N<sub>or</sub>-waarde' die gebruikt kan worden om het schadegetal te bepalen [-]

Een 'armour layer' met veel rockende elementen kan in sommige gevallen als bezweken worden beschouwd. Met behulp van deze  $N_{or}$  kan hier een bepaalde waarde aan gegeven worden.

In geval van betonnen elementen dient de coëfficiënt  $c$  gebruikt te worden en in geval van breuksteen de coëfficiënt  $d$ .

In de formule voor het schadegetal  $N_{on}$  kan  $N_{o1}$  worden ingevoerd:

$$N_{o1} = N_{od1} + N_{os1} + N_{or1} \quad (7.9)$$

$N_{o1}$  neemt de plaats in van de parameter  $N_o$ . Volledig ingevuld in de schadegetalformule levert dit in het geval van betonnen elementen op:

$$N_{on} = \frac{(aN_{od} + bN_{os} + cN_{or})D_n^2 \sin \alpha}{2H_s B(1 - n_v)} \quad (7.10)$$

Indien er sprake is van breuksteen dient natuurlijk de coëfficiënt  $d$  gebruikt te worden.

## 7.5 Bepaling van de coëfficiënten

De coëfficiënten  $b$ ,  $c$  en  $d$  uit het schadecriterium dienen gekwantificeerd te worden. Aangezien  $a$  de maximale schade voorstelt was deze coëfficiënt al gelijk aan 1 gesteld. Voor de vaststelling van de overige coëfficiënten dienen herhalingsproeven te worden uitgevoerd. Na het toepassen van vele herhalingsproeven kunnen er

gemiddelde waarden opgesteld worden voor de verschillende schadevormen. Ook kunnen er dan eenduidige criteria opgesteld worden voor 'start-van-schade' en bezwijken. Met deze waarden kunnen de bijdragen van de verschillende schadevormen aan het totale schadeverloop bepaald worden. De waarde van coëfficiënt  $c$  hangt af van de structurele sterkte van het element. Om deze coëfficiënt te bepalen moeten experimenten uitgevoerd worden, waarop een element op zijn structurele sterkte wordt belast. Coëfficiënt  $b$  kan op de volgende wijze bepaald worden. In het geval van bezwijken zal een bepaalde oppervlak van de golfbreker onbeschermd zijn. Als hier het oppervlak veroorzaakt door de weggespoelde elementen van wordt afgetrokken blijft de bijdrage van de verschoven elementen over. Hieruit moet coëfficiënt  $b$  volgen. Zoals vermeld moeten hiervoor wel de gemiddelde waarden bepaald worden en dit is alleen mogelijk door het uitvoeren van vele experimenten.

Aangezien in het huidige onderzoek onvoldoende herhalingsproeven zijn gedaan kunnen de coëfficiënten niet met de aanwezige data worden bepaald. Wel kan een voorspelling worden gedaan hoeveel herhalingsproeven er benodigd zullen zijn om een betrouwbare waarde vast te stellen. Een betrouwbare waarde komt overeen met de waarde waarbij in het geval van 95% van de experimenten een fout optreedt die kleiner is dan een bepaalde gewenste afwijking van de gemiddelde waarde.

Om deze voorspelling te doen wordt gebruik gemaakt van de experimenten met een normaal geplaatste 'armour layer' van breuksteen bij een talud van 1:2 en 1:3. Er is gekozen voor deze experimenten, omdat hierbij de meeste herhalingsproeven zijn gedaan. Voor de bepaling van de coëfficiënten wordt gekeken naar de bezwijktoestand. Om de betrouwbaarheid van de metingen te bepalen wordt gebruik gemaakt van de standaarddeviatie en het gemiddelde.

$$sd = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{gem})^2} \quad (7.11)$$

$$x_{gem} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7.12)$$

sd= standaarddeviatie

n= aantal experimenten

$x_{gem}$ = gemiddelde waarde van  $x_i$

De waarde  $x_i$  is bij dit onderzoek gelijk aan de waarde voor het stabiliteitsgetal  $H_s/(\Delta D_n)$ . Nu kan een betrouwbaarheidsinterval worden geconstrueerd. De halve lengte van een 95% betrouwbaarheidsinterval wordt gelijk aan:

$$\delta x = t_v \frac{sd}{\sqrt{n}} \quad (7.13)$$

$\delta x$ = halve lengte betrouwbaarheidsinterval

$t_v$ = factor uit de student t-verdeling

Er wordt uitgegaan van een normale verdeling van de meetuitkomsten. In tabel 7.1 is de student t-verdeling gegeven.

Tabel 7.1: Waarden van  $t_v$  bij 95% betrouwbaarheid

$n-1$ [-]	$t_v$ [-]	$n-1$ [-]	$t_v$ [-]
1	12,7	11	2,20
2	4,3	12	2,18
3	3,18	13	2,16
4	2,78	14	2,15
5	2,57	15	2,13
6	2,45	16	2,12
7	2,37	17	2,11
8	2,31	18	2,10
9	2,26	19	2,09
10	2,23	20	2,09
		:	1,96

Met gebruik van de genoemde vergelijkingen worden de gegevens bepaald voor de breuksteen 'armour layers' (weergegeven in tabel 7.2). De waarde van  $\delta x$  weergegeven in de laatste kolom is de halve lengte van het betrouwbaarheidsinterval voor de vier uitgevoerde experimenten. Dit betekent dat bij de experimenten met een talud van 1:2 95% van de experimenten een fout heeft die kleiner is dan 5,5%. In het geval van een talud van 1:3 heeft 95% van de experimenten een fout kleiner dan 9,5%. Deze fout is genomen ten opzichte van de gemiddelde waarde

Tabel 7.2: Resultaten berekening betrouwbaarheidsinterval voor 'armour layer' van breuksteen bij normale plaatsing

Talud	n	$x_{gem}$	sd	$\delta x$
1:2	4	1,58	0,055	0,09
1:3	4	2,10	0,126	0,20

Om de coëfficiënten met een bepaalde betrouwbaarheid vast te kunnen stellen zal deze fout gereduceerd moeten worden. Aangenomen wordt dat de standaarddeviatie en het gemiddelde hetzelfde blijven. Om de fout te reduceren tot 1% moeten bij benadering 100 experimenten uitgevoerd worden. Nu kan met grote nauwkeurigheid waarden voor  $N_{od}$ ,  $N_{os}$  en  $N_{or}$  vastgesteld worden.

## 8. Conclusies en aanbevelingen

### 8.1 Kubussen in dubbele 'armour layer'

#### 8.1.1 Conclusies

Verhoging van de plaatsingsdichtheid blijkt bij kubussen tot een stabiele constructie te leiden. In tabel 8.1 zijn de resultaten van de experimenten met verstevigde teen weergegeven. Voor 'start-van-schade' en bezwijken kunnen de volgende indicaties worden gegeven per plaatsingsdichtheid. Deze 'start-van-schade' waarden liggen veel hoger dan bij Van der Meer.

Tabel 8.1: Indicatie 'start-van-schade' en bezwijken kubussen bij versterkte teen

$n_v$	'Start-van-schade'		Bezwijken	
	$H_s/(\Delta D_n)$ [-]	$N_{od}$ [-]	$H_s/(\Delta D_n)$ [-]	$N_{od}$ [-]
0,4	2,47	0,055	3,3	2
0,3	2,98-3,07	0,055	-	-
0,25	2,32-3,05	0,055	-	-

Er kan een trend worden vastgesteld dat verhoging van de plaatsingsdichtheid leidt tot een meer stabiele constructie. Alle configuraties leveren stabielere constructies op dan gevonden bij de voorgaande onderzoeken. Opgemerkt dient te worden het met de gebruikte golfmachine niet mogelijk was om de constructies te laten bezwijken. Opvallend is dat de allerhoogste plaatsingsdichtheid ( $n_v = 0,25$ ) leidt tot een minder stabiele constructie. Het blijkt dat de 'armour layer' zich gaat gedragen als een zetsteenbekleding. Toch is de stabiliteit van deze constructie hoger dan de gebruikelijk in de praktijk toegepaste plaatsingsdichtheid. Hierbij gaat het om de stabiliteit van een prototype. Kenmerkend faalmechanisme voor 'normale' plaatsingsdichtheden is 'rocking' van een element met als uiteindelijk resultaat het wegspoelen hiervan. Dit faalmechanisme treedt op rond de waterlijn. Bij hoge plaatsingsdichtheden ( $n_v=0,3$  en  $n_v=0,25$ ) beginnen faalmechanismen op te treden die typerend zijn voor zetsteenbekledingen, namelijk afschuiven en oplichten van een element. De afname van de stabiliteit bij een te grote verhoging van de plaatsingsdichtheid is te verklaren door de toename van de leklengte. Als gevolg hiervan neemt het maximale stijghoogteverschil toe. 'Start-van-schade' treedt bij hoge plaatsingsdichtheden altijd op door het oplichten van een element. Dit treedt op rond het punt van maximale golfterugloop. Berekeningen met de methode van Wolsink-Banach lijken aan te tonen dat in het geval van een hypothetische golfbreker de stabiliteit minder is. Dit is echter te wijten aan de keuze voor de schaling van de 'armour layer' elementen. 'Harde' conclusies kunnen hier niet aan worden verbonden. Het fenomeen inklemming zal de stabiliteit ten goede kunnen komen. Uit een berekening blijkt dat dit inderdaad het geval is. De geschiktheid van de gebruikte rekenmethode voor de toegepaste plaatsingsdichtheden wordt echter in twijfel getrokken.

Wat afschuiven betreft blijkt dat dit een steeds grotere rol gaat spelen bij hoge plaatsingsdichtheden door afname van de ruwheid. Hoge plaatsingsdichtheden laten de 'armour layer' meer lijken op een zetsteenbekleding. Hierdoor neemt de ruwheid tussen de 'armour layers' af. Bij een verhoging van de plaatsingsdichtheid neemt de

stabiliteit af tegen dit faalmechanisme. Uit de berekening voor de hypothetische golfbrekers volgt dat dit faalmechanisme in de werkelijkheid vergelijkbaar is.

### 8.1.2 Aanbevelingen

Om duidelijkere criteria vast te kunnen stellen voor 'start-van-schade', bezwijken en het schadeverloop in het algemeen moeten voor alle configuraties meerdere herhalingsproeven worden gedaan. Belangrijk is om een zodanig geschaald model te gebruiken, dat de constructie wel tot bezwijken toe kan worden belast.

Wat betreft de opgetreden faalmechanismen zijn er bij de berekeningen aannamen gedaan, omdat deze gegevens in het onderzoek niet gemeten waren. Aanbevolen wordt om bij verder onderzoek deze parameters wel te meten. In het geval van het oplichten van een element zijn de volgende parameters aangenomen:

- het verhang over de 'armour layer',  $i_a$ , en dat over de filterlaag,  $i_f$
- de doorlatendheid van het filter en de 'armour layer'
- de wrijvingscoëfficiënt tussen de kubussen  $f_b$
- de hoeveelheid toegestane blokverplaatsing gedeeld door de blokdikte  $\varepsilon$ .
- de tijdsduur  $t_0$  dat het stijghoogteverschil over de 'armour layer' hoger is dan het eigen gewicht plus wrijving (allen uitgedrukt in meters waterkolom). Deze parameter is overgenomen uit de rekenmethode van Bezuijen, Burger en Klein Breteler (Bezuijen e.a. 1990).
- de bewegingsduur van een 'armour layer' element  $t_u$
- niveau van de freatische lijn in het filter  $z_1$

Voor het verhang zou het meest extreme verhang moeten worden gekozen. Dit kan met behulp van waarnemingen gebeuren. Hierbij moet wel een zodanig schaalmodel worden gekozen dat er geen sprake is van capillaire werking. Het verschil in stroming tussen het prototype en het schaalmodel speelt ook een rol (turbulent vs. overgangsstroming). Een schaalmodel waarin dit faalmechanisme onderzocht wordt zou Reynolds geschaald moeten worden. De doorlatendheid kan gemeten worden met behulp van doorlatendheidsexperimenten. Deze zouden ook Reynolds geschaald moeten zijn. De wrijvingscoëfficiënt kan aan de hand van afschuifproeven worden bepaald. De parameters  $\varepsilon$ ,  $t_0$  en  $t_u$  zijn in het huidige onderzoek overgenomen uit de literatuur (Bezuijen e.a. 1990). De factor  $\varepsilon$  kan uit waarnemingen worden bepaald. Voor de bepaling van  $t_0$  zouden er experimenten uitgevoerd kunnen worden, waarbij kunstmatig een stijghoogteverschil aangebracht wordt voor een bepaalde periode. Deze periode zou afhankelijk moeten zijn van de golfperiode. Op een soortgelijke wijze zou  $t_u$  bepaald kunnen worden. De bewegingsduur kan dan gemeten worden aan de hand van waarnemingen. Het niveau van de freatische lijn is in dit onderzoek gelijk gesteld aan de golfhoogte. Dit zal in de werkelijkheid veel lager liggen. De freatische lijn kan eenvoudig gemeten worden met behulp van waarnemingen. Het beste kunnen hierbij regelmatige golven gebruikt worden om per golfhoogte een bepaald freatisch niveau vast te kunnen stellen.

Bij inklemming zijn de volgende aannamen gemaakt:

- de wrijvingshoek  $\delta$
- geen normaalkrachten in horizontale richting

De wrijvingshoek kan bepaald worden met schuifproeven. Wat opvalt bij de berekening is dat de toename van de sterkte als gevolg van de schuifkracht bij verschillende plaatsingsdichtheden gelijk blijft. Het lijkt aannemelijk dat de mate van inklemming moet afnemen bij afname van de plaatsingsdichtheid. Dit zou verder onderzocht moeten worden. Verder is bij de gebruikte rekenmethode onderscheid gemaakt tussen een minimale, gemiddelde en maximale schuifkracht. Het is niet duidelijk welke van deze krachten gebruikt moet worden voor de berekening.

Bij het faalmechanisme afschuiving is de hoek van inwendige wrijving aangenomen. Het blijkt dat de ruwheid tussen verschillende lagen erg belangrijk wordt bij hoge plaatsingsdichtheden. Een ander probleem is dat het verloop van het stijghoogteverschil over de 'armour layer' niet bekend is. Dit zou bepaald kunnen worden door gebruik te maken van regelmatige golven en op een aantal punten van het talud met peilbuizen de stijghoogte te bepalen. Wederom moet er hier met een Reynolds geschaald model gewerkt worden.

## 8.2 Tetrapoden in een enkele 'armour layer'

### 8.2.1 Conclusies

Tetrapoden leveren bij verhoging van de plaatsingsdichtheid steeds stabielere constructies op. Als gevolg van hun grote ruwheid en hun vorm leveren hoge plaatsingsdichtheden nooit zetsteenbekledingsachtige vormen op. Ter indicatie van 'start-van-schade' en bezwijken zijn in tabel 8.2 de gevonden waarden opgenomen. Bhageloe blijkt met zijn lagere plaatsingsdichtheid goed aan te sluiten op de waargenomen trend in het huidige onderzoek, dat verhoging van de plaatsingsdichtheid de stabiliteit ten goede komt.

Tabel 8.2: Indicatie 'start-van-schade' en bezwijken tetrapoden

$n_v$	'Start-van-schade'		Bezwijken	
	$H_s/(\Delta D_n)$ [-]	$N_{od}$ [-]	$H_s/(\Delta D_n)$ [-]	$N_{od}$ [-]
0,4	2,00	0,054	-	-
0,3	2,26	0,054	2,4	0,22
0,25	2,57	0,054	2,74-2,86	0,28-0,61

De gevonden waarden voor 'start-van-schade' zijn beduidend hoger dan de waarden gevonden in voorgaande onderzoeken, zelfs voor dubbellaags 'armour layers'. De verklaring hiervan is de hoge plaatsingsdichtheid. Lage plaatsingsdichtheden kenmerken zich door progressief bezwijkgedrag. Hierdoor kan er in deze gevallen beter niet gesproken worden over een bezwijkcriterium en dient er alleen gewerkt te worden met het 'start-van-schade' criterium. De gevonden waarden voor  $N_{od}$  voor het bezwijken zijn lager dan de waarden gevonden in voorgaande onderzoeken. Dit kan liggen aan verschillende definities van bezwijken.



De kenmerkende faalmechanismen bij tetrapoden, waren het 'rocken' van een element dat uiteindelijk leidde tot wegspoelen, alsmede herschikking en ondermijning van de 'armour layer'. Bij tetrapoden bleek er zoveel ruimte aanwezig tussen de elementen dat vrij snel aantasting van het filter plaats kon vinden. Slechts een geringe herschikking van de elementen was voldoende om de golven vrij spel te geven. Dit trad met name op rond de waterlijn. Resultaat van dit verschijnsel was het ontstaan van een holle ruimte onder de 'armour layer', wat weer ondermijnend werkte. Hierdoor lijken tetrapoden geen geschikte elementen om toegepast te worden als enkele 'armour layer'.

Haakweerstand lijkt het belangrijkste stabiliteitsmechanisme in geval van tetrapoden. Als gevolg hiervan is een rotatie vereist om een tetrapode te verwijderen. Met behulp van een rekenmethode (Hattori e.a. 2000) is, teneinde bepaalde trends vast te kunnen stellen, een berekening uitgevoerd voor het schaalmodel en een hypothetische golfbreker. Het blijkt dat verhoging van de plaatsingsdichtheid een grotere stabiliteit oplevert. Verder blijkt uit de gebruikte rekenmethode dat de stabiliteit in het prototype identiek is aan die in het schaalmodel.

### 8.2.2 Aanbevelingen

Wederom wordt het toepassen van meerdere herhalingsproeven aanbevolen om zodoende het schadeverloop beter weer te kunnen geven.

Wat betreft de gebruikte rekenmethode zijn er enkele aannamen gedaan, die onderzocht zouden moeten worden om de berekening betrouwbaarder te maken. De gebruikte aannamen betreffen:

- volume-, oppervlakte-, drag-, lift- en traagheidscoëfficiënt ( $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_D$ ,  $C_L$ ,  $C_M$ )
- snelheid van het 'armour layer' element  $u_a$
- stroomsnelheid  $u$  langs de 'armour layer'

De verschillende coëfficiënten zijn uit de literatuur (Hattori e.a. 2000) verkregen. Deze coëfficiënten zouden in een Reynolds geschaald model bepaald kunnen worden bij een onderzoek naar begin van bewegen. De afzonderlijke krachten op een element zouden hierbij gemeten moeten worden met bijvoorbeeld drukmeters. In zo'n model zou de stroomsnelheid  $u$  ingevoerd moeten worden. Aangezien dan verder alle andere parameters bekend zouden zijn, kunnen de coëfficiënten hieruit bepaald worden. In een soortgelijk model zou de stroomsnelheid bepaald kunnen worden afhankelijk van een ingevoerde golfhoogte. Er zou hierbij het beste gebruik kunnen worden gemaakt van regelmatige golven. De snelheid van het 'armour layer' element is nul gesteld in het huidige onderzoek, maar zou in hetzelfde model kunnen worden gemeten. Wat betreft de gebruikte normale en parallelle componenten in deze rekenmethode ( $l$ ,  $e_1$  en  $e_2$ ) kan gezegd worden dat deze alleen worden gebruikt om de minst stabiele situatie te vinden. Ze kunnen dus altijd zo gekozen worden dat de minst stabiele situatie wordt gevonden. Hoe deze precies verandert als de plaatsingsdichtheid toeneemt is onduidelijk. In een 'armour layer' met een bepaalde plaatsingsdichtheid zouden deze componenten in principe kunnen worden gemeten en hieruit zou een gemiddelde waarde kunnen worden gekozen.

### 8.3 Breuksteen in een enkele 'armour layer'

#### 8.3.1 Conclusies

Bij breuksteen is de plaatsingsdichtheid gewijzigd door het toepassen van verschillende laagdiktes. Dit werd bereikt door het gebruiken van drie verschillende plaatsingsmethoden: normaal (willekeurig geplaatst), methode A (rechttop geplaatst), methode B (plat geplaatst). Een toename van de plaatsingsdichtheid bleek een verbetering van de stabiliteit in te houden. Dit kwam met name door het zelfherstellend vermogen van de elementen. Hieronder wordt verstaan dat de ruimte die vrijkomt door verdwenen elementen weer wordt opgevuld door andere elementen. Bij methode A is dit zelfherstel groot, omdat de rechttopstaande elementen bij het verdwijnen van enkele elementen plat gaan liggen en zo de filterlaag beschermen. Schade trad vooral op rond de waterlijn.

Kenmerkend bij breuksteen was de opstuwning van de lager gelegen kleurenbanden als gevolg van de golfklap van een 'collapsing' golf. Dit leidde tot een ruimere pakking bij de hoger gelegen kleurenbanden (rond de waterlijn), die vervolgens gemakkelijker weggespoeld konden worden. Het zelfherstellend vermogen werd hier erg belangrijk. Door het omvallen van rechttopstaande elementen kon deze ruimere pakking plaatsvinden zonder dat de filterlaag bloot kwam te liggen. Bij een flauwer talud bleken 'collapsing' golven minder vaak op te treden, en namen 'plunging' golven toe. Dit vergrootte de stabiliteit. Methode B en de normale plaatsing vertoonden progressief bezwijkgedrag bij de steilste taluds. Verder bleek een wijde gradering sneller instabiel te worden dan een normale gradering. De kleine elementen tussen de grotere elementen in deze 'armour layer' spoelden snel weg. Hierdoor ontstond veel ruimte voor de grotere elementen om te bewegen.

Tabel 8.3: Indicatie 'start-van-schade' en bezwijken breuksteen

Type plaatsing	Talud	'Start-van-schade'		Bezwijken	
		$H_s/(\Delta D_n)[-]$	$N_{od}[-]$	$H_s/(\Delta D_n)[-]$	$N_{od}[-]$
Normaal	1:1,5	1,57	0,045	1,97	4,91
A	1:1,5	1,47	0,045	2,54	4,59
B	1:1,5	1,33	0,045	1,66	2,88
Normaal	1:2	1,51-1,67	0,045	1,83-1,97	1,31-3,87
A	1:2	1,64	0,045	2,66	5,31
B	1:2	1,46	0,045	1,66	1,76
Wijde gradering	1:2	1,10	0,045	1,84	5,85
Normaal	1:3	1,73-2,02	0,045	2,37-2,73	2,84-6,66
A	1:3	2,24	0,045	2,85	7,65
B	1:3	1,75	0,045	2,37	2,43
Wijde gradering	1:3	1,56	0,045	2,37	3,47

Wat betreft de normale plaatsing blijken de 'start-van-schade' waarden van het huidige onderzoek hoger te zijn dan waargenomen bij voorgaand onderzoek.

Kenmerkend faalmechanisme bij breuksteen blijkt het 'rocken' van een element, dat uiteindelijk leidt tot het wegspoelen hiervan. Dit blijkt bij iedere configuratie het geval te zijn, al geschiedt het bij methode A minder gemakkelijk als gevolg van onderlinge inklemming.

Breuksteen blijkt minder stabiel dan kubussen en tetrapoden. In geval van een talud van 1:1.5 lijkt het ongeschikt voor gebruik, zelfs in het geval van plaatsing volgens methode A. Bij flauwere taluds levert breuksteen wel voldoende stabiele constructies. Plaatsing volgens methode B blijkt in alle gevallen ongeschikt. Deze resultaten komen niet overeen met de resultaten van het onderzoek van Hald, Tørum en Holm-Karlsen (Hald e.a. 1998).

### 8.3.2 Aanbevelingen

Het uitvoeren van meerdere herhalingsproeven is ook bij breuksteen essentieel om het schadeverloop correct weer te kunnen geven.

## 8.4 Algemene conclusies en aanbevelingen

Omdat de bestaande schadecriteria niet voldoende rekening houden met de onderzochte plaatsingsdichtheid is getracht een nieuw schadecriterium te ontwikkelen. Dit schadecriterium houdt rekening met een aangevallen gebied dat varieert met de golfhoogte. Het houdt rekening met de plaatsingsdichtheid en bovendien introduceert het verschillende faalmechanismen. Verder onderzoek is vereist om de benodigde coëfficiënten voor dit schadecriterium vast te stellen.

In dit onderzoek zijn verschillende plaatsingsdichtheden onderzocht. De vraag is echter of deze plaatsingsdichtheden met het bestaande materieel en onder realistische werkomstandigheden (plaatsing onder water, golven) wel gehaald kunnen worden. Er dient onderzoek verricht te worden naar de uitvoerbaarheid van de verschillende plaatsingsdichtheden, alsmede naar de uitvoerbaarheid van de plaatsingsmethoden gebruikt bij breuksteen.

Uit de experimenten is het belang van een stevige teen duidelijk naar voren gekomen. Bij de eerste experimenten met kubussen leidde dit tot grootschalige afschuiving van de bovenste 'armour layer'. Hieruit blijkt dat het belang van de teen nooit onderschat moet worden.

## 9. Literatuur

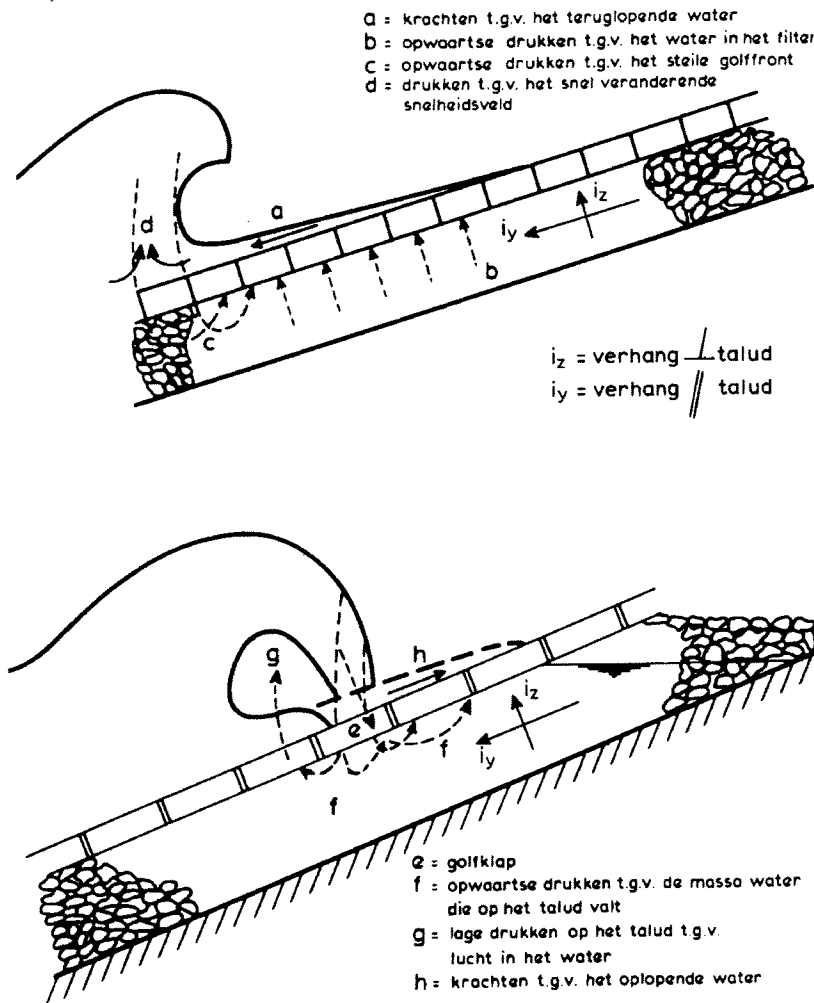
1. Alan Price, W. (1979) *Static stability of rubble mound breakwaters*. The Dock & Harbour Authority, Volume 60, No. 702, p. 2-7.
2. Angremond, K. d', F.C. van Roode (2000) *Breakwaters and closure dams. Bed, bank and shore protection 2*. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft, The Netherlands.
3. Angremond, K. d', E. Berendsen, G.S. Bhageloe, M.R.A. van Gent, J.W. van der Meer, (1999) *Breakwaters with a single armour layer*. Fifth International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, p. 1441-1449, Council for Scientific and Industrial Research, Capetown, South Africa.
4. Bezuijen, A., e.a. (1990) *Taludbekleding van gezette steen; samenvatting van onderzoeksresultaten 1980-1988*. Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat, Delft, Nederland.
5. Bhageloe, G.S. (1998) *Golfbrekers met een enkele toplaag*. Afstudeerverslag, Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Delft, Nederland.
6. Bregman, (1998) *Porositeit in geplaatste steenlagen, onderzoek naar de factoren die de hoeveelheid geplaatste steenmaterialen beïnvloeden*. Afstudeerverslag, Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Delft, Nederland.
7. Burger, G. (1995) *Stabiliteit golfbrekers met lage kruin*. Master's thesis, Afstudeerverslag, Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Delft, Nederland.
8. Coastal Engineering Research Centre, (1984) *Shore protection manual*. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, USA.
9. CUR (Centre for Civil Engineering Research and Codes), (juni 1995) *Manual on the use of rock in hydraulic engineering, CUR report 169*. CUR, Gouda, The Netherlands.
10. Gauss, G.A., J.P. Latham (1995) *Measurement of layer thickness and estimation of as-bulk density and void porosity in a rock armour revetment at Beesands, South Devon*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water, Maritime and Energy, Volume 112, No. 4, p. 326-335.
11. Gent, M.R.A. van, G.B.H. Spaan (1998) *Golfbrekers met een enkele toplaag van kubussen H3387*. Delft Hydraulics, Delft, Nederland.
12. Gent, M.R.A. van, e.a. (1999) *Single layer rubble mound breakwaters*. Proceedings of the International Conference on Coastal Structures, p. 231-239, Santander, Spain.
13. Gent, M.R.A. van, C. Kuiper (2000) *Single layer rubble mound breakwaters with high-density concrete cubes H3657*. Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.
14. Hald, T., A. Tørum, T. Holm-Karlsen, (1998) *Design of rock armoured single layer rubble mound breakwaters*. Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering, Sidney 1998, p 1800-1813.
15. Hall, K.R., J. Kao, M. Mulcahy (1991) *The influence of armour stone gradation on dynamically stable breakwaters*. Coastal Structures and Breakwaters. Proceedings of the conference organised by the ICE and held in London on 6-8 november 1991, p 149-155, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford 1992, London, United Kingdom.

16. Hasselman, K., e.a. (1973) *Measurements of wind-wave growth and swell during the Joint North Sea Wave Project(JONSWAP)*. Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg, Germany.
17. Hattori, Masatoro, Eiji Yauchi, Yasutaka Kasahara, (1999) *Hydraulic stability of armor units in single cover layer*. Proceedings of the International Conference Coastal Structures, pag. 241-248, Santander, Spain.
18. Horst, C. van der, e.a. (2000) *The structural analysis of the block revetment on the dutch dikes (concept)*. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
19. Jong, R.J. de, (Augustus 1996) *Wave transmission at low crested structures. Stability of tetrapods at front, crest and rear of a low-crested breakwater*. Master's thesis, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft, The Netherlands.
20. Koolwaaij, H.J., e.a. (2000) *Maak- en meetnauwkeurigheden bij de uitvoering van baggerwerken en steenbestortingen*. Gemeentewerken Rotterdam Ingenieursbureau, Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam, VBKO.
21. Meer, J.W. van der, (1993) *Conceptual design of rubble mound breakwaters*. Publication no. 483, Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.
22. Meer, J.W. van der, (1999) *Design of concrete armour layers*. Proceedings of the International Conference on Coastal Structures, p. 213- 221, Santander, Spain.
23. Meer, J.W. van der, W.H. Tutuarima, G. Burger (1996) *Influence of rock shape and grading on stability of low-crested structures*. Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering 1996, p 1957-1970.
24. Meer, J.W. van der, (1987<sup>a</sup>) *Stability of breakwater armour layers, deterministic and probabilistic design*. Publication no. 378, Delft Hydraulics 378, Delft, The Netherlands.
25. Meer, J.W. van der, (1988) *Stability of cubes, tetrapods and accropodes*. Design of Breakwaters, Proceedings of the Conference on Breakwaters '88 Eastbourne, p. 71-80, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford, London, United Kingdom.
26. Meer, J.W. van der, (1986<sup>a</sup>) *Stability of rubble mound breakwaters. Stability formula for breakwaters armoured with cubes S467*. Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.
27. Meer, J.W. van der, (1987<sup>b</sup>) *Stability of rubble mound breakwaters. Stability formula for breakwaters armoured with tetrapods*. Delft Hydraulics H462, Delft, The Netherlands.
28. Meer, J.W. van der, (1986<sup>b</sup>) *Stability of rubble mound revetments and breakwaters under random wave attack*. Developments in Breakwaters. Proceedings on the Conference on Breakwaters '85, London, p. 141-154, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford, London, United Kingdom.
29. Schiereck, G.J. (1998) *Introduction to bed, bank and shore protection*. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geo Sciences, Delft, Nederland.
30. Triemstra, R., (December 1999) *The use of high density concrete in the armourlayer of breakwaters. Flume Tests on high density concrete elements*. Master's thesis, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft, The Netherlands.
31. Vasco Costa, F, (1989), The Dock & Harbour Authority, volume 70, No. 810, p 73-74.
32. Vries, M. de, (1976) *Waterloopkundig onderzoek*. Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Delft, Nederland.

33. Wouter, J. (1993) *Stability of breakwater trunk, Kerith breakwater H1872*. Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.

## A Rekenmethoden zetsteenbekleding

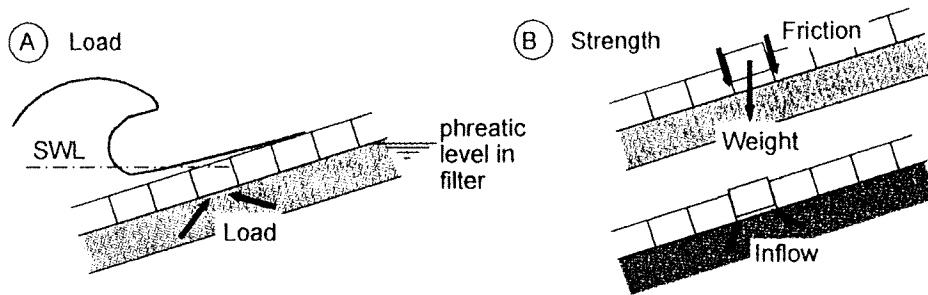
In het geval van een zetsteenbekleding spelen de fenomenen beschreven in figuur A.1 (Bezuijen, e.a. 1990) een rol.



Figuur A.1: Belastingmechanismen voor een zetsteenbekleding bij 'plunging' golven

Als belangrijkste mechanismen worden quasi-stationaire drukken als gevolg van 'wave set-up' en drukken als gevolg van het golffront genoemd. Voor de 'armour layer' kan gezegd worden dat de kritieke belastingscomponent het drukverschil over de bekleding is.

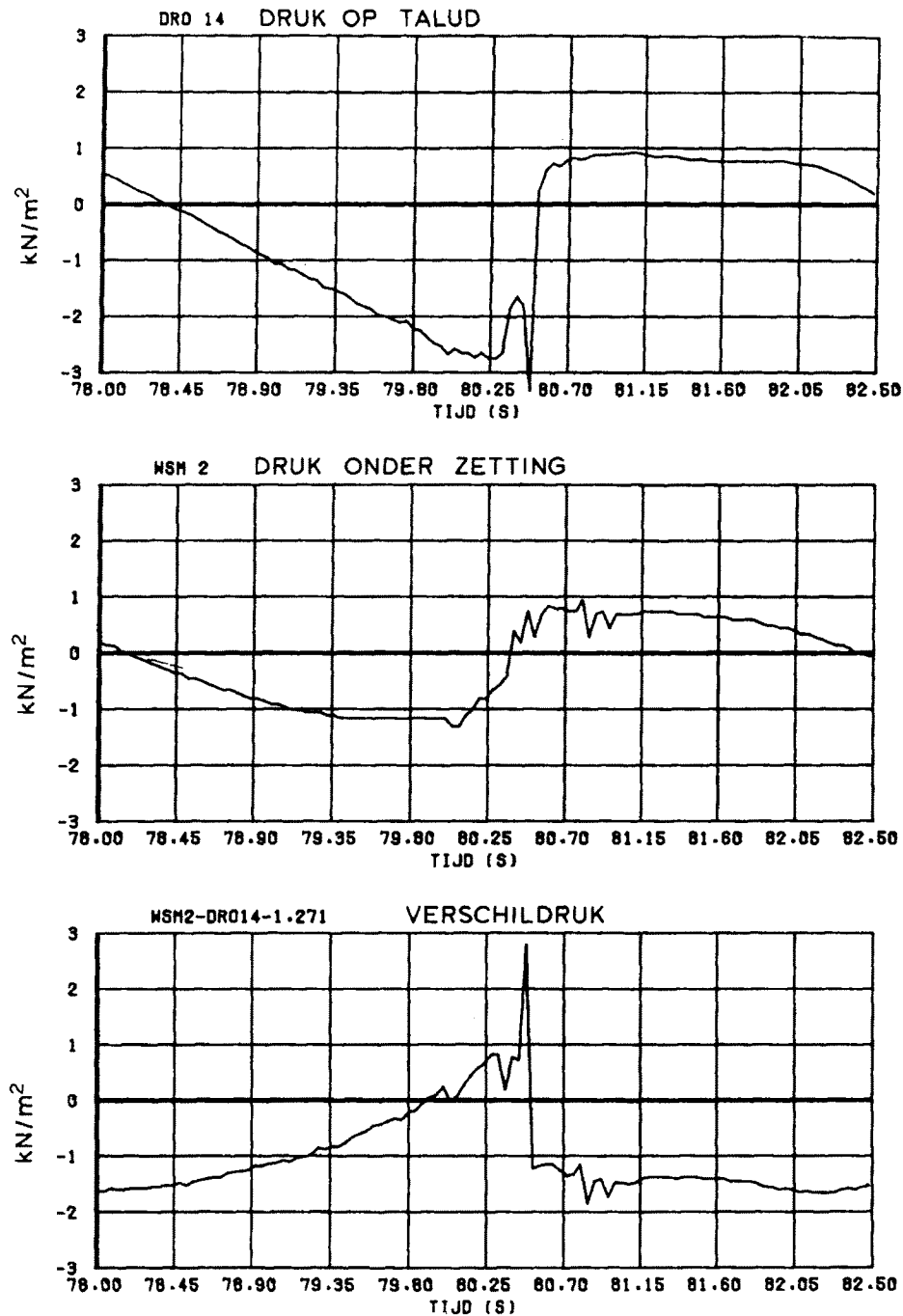
De waterdruk in de onderlagen leidt tot een opwaartse kracht op de 'armour layer'. Deze bereikt een maximum in het geval van maximale golfterugloop. Er is sprake van een lage druk boven op de kubussen en een hoge druk onder de kubussen, daar waar het terugtrekkend golffront voorbij is geweest. Deze hoge druk wordt veroorzaakt door de waterdruk in de filterlaag, welke weer wordt veroorzaakt door de voortgang van de golf en het relatief hoge freatische niveau in de golfbreker. Deze situatie is weergegeven in figuur A.2 (Schiereck 1998).



Figuur A.2: Krachten bij maximale golfterugloop

De opwaartse kracht in de filterlaag kan verklaard worden uit het feit dat de drukken op de bovenkant van de kubus afnemen tot aan het tijdstip van maximale golfterugloop. Daarentegen bereiken de drukken onder het blok veel eerder een soort evenwichtswaarde. De verschildruk, oftewel het verval, neemt dus toe. In figuur A.3 zijn ter illustratie hiervan de verschillende genoemde drukken weergegeven (Bezuijen e.a. 1990). In de bovenste grafiek (druk op talud) is zichtbaar hoe de druk op de elementen afneemt tot het moment van maximale golfterugloop. Dit vindt plaats rond het tijdstip 80,48 seconden. Vervolgens neemt de druk abrupt toe onder invloed van de volgende golf. Het proces herhaalt zich hierna weer. In de middelste grafiek (druk onder zetting) is te zien hoe de druk onder de elementen ook geleidelijk afneemt tijdens de golfterugloop. Deze terugloop stabiliseert al rond het tijdstip 79,35 seconden. Overigens zijn de drukken in deze grafiek tegengesteld gericht aan de drukken van de bovenste grafiek. In de bovenste grafiek werken de drukken van bovenaf loodrecht op de bekleding en in de middelste grafiek werken de drukken van onderaf loodrecht op de bekleding. In de middelste grafiek is na het moment van maximale golfterugloop weer een toename zichtbaar van de drukken als gevolg van de volgende golf. In de onderste grafiek is tenslotte de verschildruk weergegeven. Deze verschildruk geeft de druk weer, welke van onderaf loodrecht op de bekleding werkt. Te zien is dat de druk maximaal is op het punt van maximale golfterugloop. Onder invloed van deze opwaartse druk kan het oplichten van elementen plaatsvinden. De onderste grafiek is als bepaald door de bovenste grafiek van de middelste af te trekken. Vervolgens wordt van de gevonden waarden nog de waarde 1,271 afgetrokken.



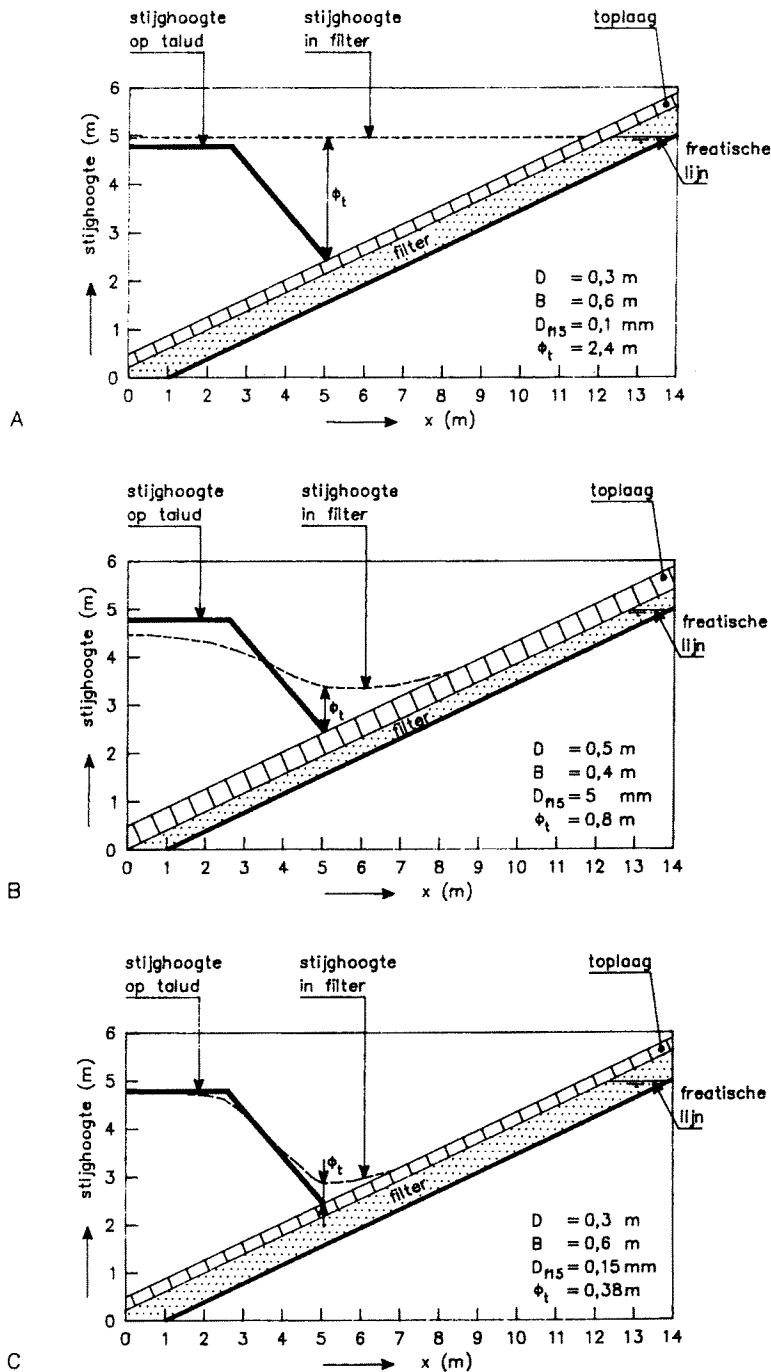


Figuur A.3: Belasting op 'armour layer' (resultaten van het grootschalige onderzoek voor de Oesterdam)

Aangenomen wordt dat de waterbeweging door het filter parallel aan het talud loopt en de waterbeweging door de 'armour layer' loodrecht op het talud staat. Wanneer de hoeveelheid water op het talud onder invloed van golfsterugloop snel afneemt, is het waterniveau in de filterlaag hoger dan aan het oppervlak. Dit komt doordat de fluctuaties van de waterbeweging en de golfdrukken in de filterlaag gedempt worden.

Het gevolg is het ontstaan van een stijghoogteverschil over de 'armour layer'. De grootte hiervan wordt bepaald door de verhouding tussen de stromingsweerstand in het filter en de stromingsweerstand door de 'armour layer'. Bij een ondoorlatende 'armour layer' en stilstaand water in het filter is het stijghoogteverschil over de 'armour layer' gelijk aan het verschil in waterstand tussen de binnenkant van de golfbreker en daarbuiten. Dit betekent dat de waterdruk in het filter gelijk is aan de hydrostatische waterdruk. Er vindt in dit geval geen stroming plaats door het filter. In het geval van een doorlatende laag zal tijdens golfterugloop het water door de filterlaag evenwijdig aan het talud omlaag en door de 'armour layer' loodrecht op het talud naar buiten stromen. De stromingsweerstand worden gekarakteriseerd in de lek lengte  $\Lambda$ .

De lek lengte kan worden gedefinieerd als de lengte van de bescherming waarin de stromingsweerstand door 'armour layer' en filterlaag hetzelfde is. Een grote lek lengte betekent een sterk impermeabele constructie. Voor een afleiding van de lek lengte wordt verwezen naar Bezuijen, Burger en Klein Breteler (Bezuijen e.a. 1990). Ter illustratie van het begrip lek lengte is figuur A.4 (Bezuijen e.a. 1990) afgebeeld. In de bovenste figuur (A) is een bijna ondoorlatende 'armour layer' afgebeeld. Dit betekent dat er sprake is van een grote lek lengte. De stijghoogte in het filter is hier constant en komt overeen met de hydrostatische stijghoogte. In de middelste figuur (B) is een gebruikelijke doorlatendheid met bijbehorende lek lengte weergegeven, zoals deze doorgaans wordt toegepast bij bekledingen. In de onderste figuur (C) is een kleinere lek lengte weergegeven. Te zien is dat de stijghoogte in de filterlaag steeds meer op de stijghoogte op het talud gaat lijken. In deze figuur staat het symbool  $\phi_t$  voor de stijghoogte in de filterlaag bij het golfteruglooppunt.  $D$  is de dikte van de 'armour layer' en  $B$  de dikte van de filterlaag.  $D_{f15}$  is de diameter van een element in de filterlaag, waarbij slechts 15% van de elementen een kleinere diameter heeft.



Figuur A.4: Stijg­hoogte op het talud en stijg­hoogte in het filter bij afnemende lek­len­gte

In formule­vorm kan de lek­len­gte op de vol­gende wijze worden be­schre­ven.

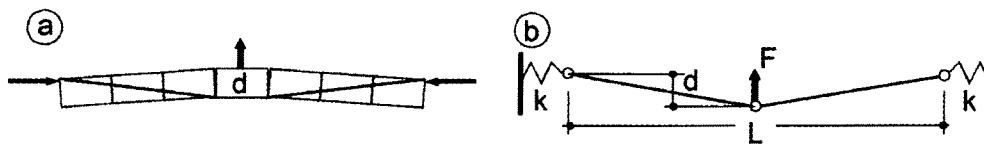
$$\Lambda = \sqrt{\frac{k_F d_F d_a}{k_a}} \quad (A.1)$$

- $k_F$ = permeabiliteit van de filterlaag [m/s]
- $k_a$ = permeabiliteit van de 'armour layer' [m/s]
- $d_F$ = laag­dikte filter [m]
- $d_a$ = laag­dikte 'armour layer' [m]

De lek lengte is onafhankelijk van de helling. Een kleine lek lengte betekent een relatief grote stromingsweerstand in het filter ten opzichte van die in de 'armour layer'. Er is een groot verhang in het filter nodig om stroming in stand te houden. Er zal een klein stijghoogteverschil over de 'armour layer' zijn door de relatief grote doorlatendheid ervan. Er zijn nauwelijks naar buiten gerichte stijghoogteverschillen te verwachten ten gevolge van het achterblijven van de freatische lijn tijdens golfterugloop (Bezuijen e.a. 1990). Een grote lek lengte leidt tot grotere verschildrukken over de kubussen door het achterblijven van de freatische lijn bij golfterugloop en doordat de golfdrukken meer worden gedempt in de filterlaag. Het is duidelijk dat naarmate de plaatsingsdichtheid toeneemt de lek lengte ook toeneemt. Naast de lek lengte wordt er ook vaak met de lek hoogte  $\lambda$  gewerkt.

$$\lambda = \sin \alpha \sqrt{\frac{k_f d_f d_a}{k_a}} \quad (A.2)$$

Als voordeel van een zetsteenbekleding is inklemming genoemd. Dit verschijnsel kan goed worden toegelicht met figuur A.5 (Schiereck 1998).



Figuur A.5: Inklemming

Wat duidelijk uit de figuur blijkt is dat een kubus, die uitgedrukt wordt andere elementen mee zou kunnen nemen als gevolg van wrijving. Dit leidt tot een toename van de normaalkrachten tussen de kubussen. Als gevolg hiervan zal het meer kracht kosten om een kubus uit te drukken. Dit is goed zichtbaar in de linkerfiguur (a) uit figuur A.5. Een en ander is geschematiseerd in de rechterfiguur, waarbij  $d$  een afstand symboliseert in plaats van de diameter.  $F$  staat voor de benodigde kracht en  $k$  stelt de veerconstante voor.

Naast de genoemde wrijving tussen de verschillende kubussen spelen ook twee andere factoren een rol. Als eerste kunnen traagheidseffecten worden genoemd. Er is een bepaalde tijd nodig om de kubus van zijn plek te krijgen als gevolg van de massa van het blok en het water rondom het blok dat in beweging moet worden gebracht. De oplichting vindt plaats vanwege het verticale drukverschil over de kubus. Als dit drukverschil gedurende een te korte tijd aanwezig is zal de kubus niet volledig worden uitgedrukt en kan hij bij een volgende golf weer worden teruggeduwd. De tweede factor die een rol speelt is de toestroming van water. Bij uitdrukking moet er water uit de filterlaag toestromen naar de holte onder de kubus. Voor deze toestroming is een deel van de verschildruk nodig, waardoor de verschildruk over de kubus afneemt.

Om de invloed van de inklemming te berekenen is een methode ontwikkeld (Van der Horst e.a. 2000). Afname van de druk door lekkage tussen de blokken van de 'armour layer' is verwaarloosd. Verder is verondersteld dat er geen voorspanning kan ontstaan

in horizontale richting (evenwijdig aan het talud in de breedte), maar alleen in verticale richting (evenwijdig aan het talud, maar nu langs het talud van boven naar beneden).

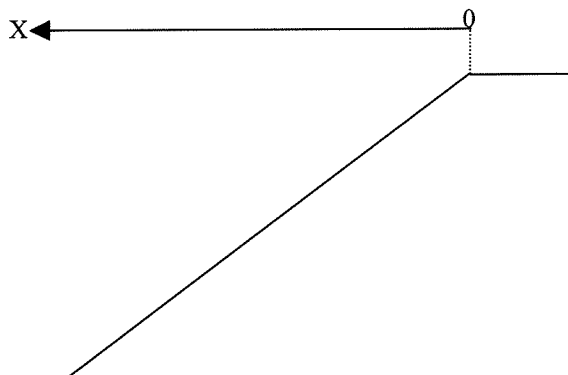
De schuifkracht die tijdens het oplichten werkt op een element kan op de volgende wijze worden uitgedrukt (Horst 2000):

$$F_s = \rho_b g D_n^3 \cos \alpha + 2 f_b N(x) D_n \quad (A.3)$$

$$0 \leq N(x) \leq \rho_b g D_n (\sin \alpha + \cos \alpha \tan \delta) x \quad (A.4)$$

- $F_s$  = schuifkracht [N]  
 $N(x)$  = normaalkracht [N/m]  
 $\delta$  = wrijvingshoek [°]  
 $\rho_b$  = soortelijke dichtheid beton [kg/m<sup>3</sup>]  
 $f_b$  = wrijvingscoëfficiënt [-]  
 $D_n$  = nominale diameter [m]

Indien de normaalkracht gelijk is aan 0, is de schuifkracht gelijk aan het eigen gewicht van het element. Als de uitdrukkracht excentrisch is zal het element draaien en de bovenliggende elementen omhoog drukken. In dit geval is de normaalkracht maximaal. De kubus moet de bovenliggende elementen namelijk in dit geval wegdrücken. Als de kubus niet draait is dit niet aan de orde. Hoe lager de elementen op het talud geplaatst zijn, hoe groter de normaalkracht zal zijn. Van der Horst, Hoof, Vrijling en Van Gelder hebben een bekleding geschematiseerd als een balk op een elastische fundering, die belast wordt door een gelijkmatig verdeelde belasting en door de opwaartse kracht (in het midden). De gelijkmatig verdeelde belasting stelt het eigen gewicht voor. Aan de hand hiervan kunnen de minimale en de maximale benodigde uittrekkkrachten worden bepaald als functie van de positie  $x$  waar de uittrekkkracht wordt toegepast. De  $x$ -as is gedefinieerd zoals weergegeven in figuur A.6.



Figuur A.6: Schematisatie voor berekening inklemming

$$F_{s,\min} = \rho_b g D_n^3 \cos \alpha \quad N(x) = 0 \quad (A.5)$$

$$F_{s,\text{gem}} = \sqrt{12kD_n^2 N(x)q} \quad N(x) = \rho_b g D_n \sin \alpha x \quad (A.6)$$

$$F_{s,\max} = \sqrt{12kD_n^2 N_p(x)q} \quad N_p(x) \leq \rho_b g D_n (\sin \alpha + \cos \alpha \tan \delta) x \quad (A.7)$$

$q$ = gelijkmatig verdeelde belasting [N/m]

$k$ = excentriciteit ( $0,45 < k < 0,475$ ) [-]

De minimale kracht wordt gedomineerd door het eigen gewicht. De gemiddelde kracht treedt op als de bekleding gedurende haar levensduur al is afgeschoven en de maximale kracht treedt op als het element de bovenliggende elementen omhoog drukt.

De stabiliteit van een kubus tegen oplichten kan gegeven worden met de volgende vergelijking, welke volgt uit de methode van Wolsink-Banach. Voor de afleiding wordt verwezen naar (Bezuijen e.a. 1990).

$$\phi_w = (\Gamma_{s1} + \Gamma_2 + \Gamma_3) \Delta d_a \cos \alpha \quad (A.8)$$

$\phi_w$  = maximaal stijghoogteverschil [m]

$\Gamma_{s1}$  = bijdrage van de wrijvingskracht [-]

$\Gamma_2$  =  $\Gamma_{s2} - 1$  [-]

$\Gamma_{s2}$  = verhouding tussen stijghoogteverschil over bewegend blok en stijghoogteverschil overeenkomend met eigen gewicht van het blok [-]

$\Gamma_3$  =  $(\Gamma_1 + \Gamma_2)(\Gamma_b - 1)$  [-]

$\Gamma_b$  = vermenigvuldigingsfactor [-]

Voor deze stabiliteitberekening wordt eerst de bijdrage van de wrijvingskracht tussen de blokken bepaald. De wrijving voor één blok tussen verder ingeklemde blokken wordt bepaald door de gewichtsc component langs het talud en de wrijvingscoëfficiënt tussen het beton:

$$\Gamma_{s1} = 1 + f_b \tan \alpha \quad (A.9)$$

$f_b$  = wrijvingscoëfficiënt = 0,5 [-] (Bezuijen e.a. 1990)

De bijdrage van de traagheidskracht aan de stabiliteit wordt bepaald door:

$$\Gamma_{s2} = 1 + 1,78 \frac{\varepsilon d_a (\Delta + 2)}{g \Delta t_0^2 \cos \alpha} \quad (A.10)$$

$\varepsilon$  = de hoeveelheid toegestane blokbeweging gedeeld door de blokdikte = 0,2 [-] (Bezuijen e.a. 1990)

$t_0$  = de tijdsduur dat het stijghoogteverschil hoger is dan het eigen gewicht plus wrijving = 0,4 s (Bezuijen e.a. 1990)

De drukverlaging door toestroming kan worden uitgedrukt in een factor die de belasting reduceert. De belasting wordt dan gelijk aan:

$$S = \phi_w / \Gamma_b \quad (A.11)$$

$S$  = belasting op het blok [m]

$$\Gamma_b = 1 + \frac{\varepsilon d_a D_n}{\pi k_a \Lambda t_u \Delta \Gamma_s \cos \alpha} \left[ 0,56 + 0,18 \ln \left( \frac{D_n}{\Lambda} \right) \right] \quad (A.12)$$

$t_u =$  bewegingsduur = 1,5  $t_0 = 0,6$  s (Bezuijen e.a. 1990)

$\Gamma_s =$   $\Gamma_{s1} + \Gamma_2$  [-]

Het maximale stijghoogteverschil volgt uit:

$$\phi_w = \left[ \frac{\lambda}{2 \tan \alpha \tan \beta} \left( 1 - e^{-\tan \alpha \tan \beta \frac{\phi_b}{\lambda}} + \frac{1}{2} \lambda \right) \right] \left[ 1 - e^{-\frac{2z_1}{\lambda}} \right] \quad (A.13)$$

$\beta =$  helling van het golffront ten opzichte van verticaal [ $^\circ$ ]

$$\tan \beta = \frac{0,17}{\sqrt{\frac{H}{L_o}}} \quad (A.14)$$

$z_1 =$  niveau van de freatische lijn in het filter [m]  $\approx$  golfhoogte

$\phi_b =$  niveau van het golffront ten opzichte van de stilwaterlijn [m]  $\approx$  golfhoogte

De sterkte en de belasting kunnen op de volgende wijze worden weergegeven.

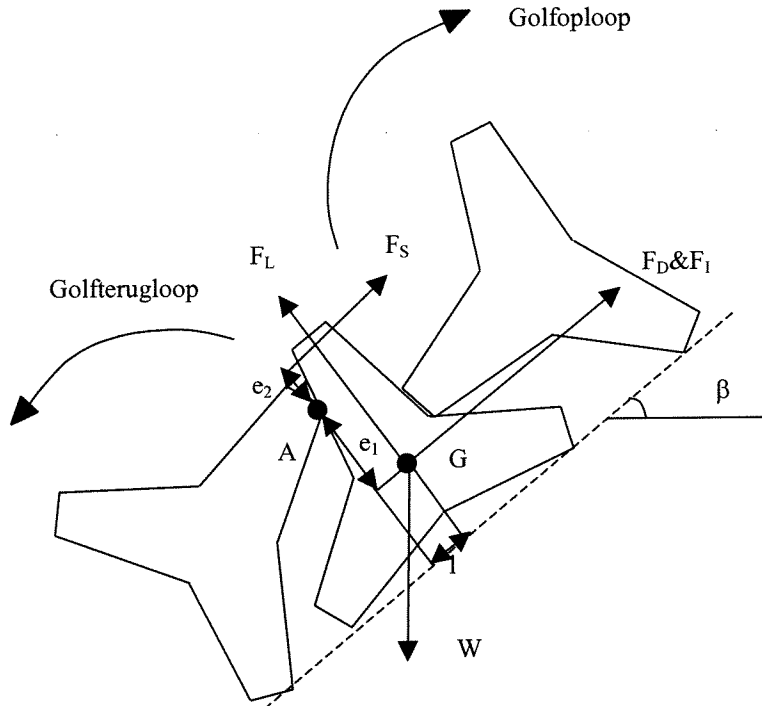
$$R = (\Gamma_{s1} + \Gamma_2) \Delta d_a \cos \alpha \quad (A.15)$$

$$S = \frac{\phi_w}{\Gamma_b} \quad (A.16)$$

Afschuiving is een ander typerend bezwijkmechanisme voor bekledingen. Ook dit kan worden veroorzaakt door de verschildrukken over de kubussen. Een kubus zal namelijk voordat hij volledig uitgelicht wordt een zodanig afname van zijn gronddruk hebben dat hij zal gaan afschuiven. De opwekkende kracht blijft gelijk, maar de wrijvingskracht tussen de kubus en de ondergrond neemt af. Een manier om dit probleem op te lossen is de constructie van een stevige teen. Deze bezwijkvorm werd duidelijk vastgesteld tijdens de experimenten die zonder versterkte teen werden uitgevoerd. Dat de elementen neigen tot afschuiven bij de experimenten met versterkte teen is ook waargenomen. Het aantal elementen dat uit zijn kleurenband is verplaatst door afschuiven is tijdens de experimenten met de grootste plaatsingsdichtheid groter.

## B Rekenmethode tetrapoden

Er is een rotatie vereist om een element te verwijderen, dat zijn sterkte ontleent aan haakweerstand. De krachten op een tetrapode op een talud kunnen op de wijze, zoals weergegeven in figuur B.1 worden beschreven (Hattori e.a. 2000).



Figuur B.1: Krachten op een 'armour layer' element op het talud van een golfbreker

Hattori, Yauchi en Kasahara onderscheiden een sleepkracht, een liftkracht, een traagheidskracht en een wrijvingsleepkracht.

Deze kunnen op de volgende wijze als vergelijking worden weergegeven:

- sleepkracht: 
$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w C_D C_2 D_n^2 |u - u_a| (u - u_a) \quad (B.1)$$

- liftkracht: 
$$F_L = \frac{1}{2} \rho_w C_L C_3 D_n^2 |u - u_a| (u - u_a) \quad (B.2)$$

- traagheidskracht: 
$$F_I = \rho_w C_1 D_n^3 \left( C_M \frac{du}{dt} - C_m \frac{du_a}{dt} \right) \quad (B.3)$$

- wrijvingsleepkracht: 
$$F_S = \frac{1}{2} \rho_w f_b C_2 D_n^2 |u - u_a| (u - u_a) \quad (B.4)$$

$C_1$  = volumecoëfficiënt van een element [-]

$C_2$  = oppervlaktecoëfficiënt voor het slepen van een element [-]

$C_3$  = oppervlaktecoëfficiënt voor het oplichten van een element [-]

$C_D$  = drag-coëfficiënt [-]

$C_L$  = lift-coëfficiënt [-]

$C_M$  =  $C_m + 1$  = traagheidscoëfficiënt [-]

$C_m$  = toegevoegde massa [-]

$u_a$  = snelheid van 'armour layer' element [m/s]



$u$ = stroomsnelheid langs 'armour layer' [m/s]

$D_n$ = nominale diameter [m]

Het eigen gewicht onder water van het element wordt als volgt weergegeven:

$$W = \rho_w g \Delta C_1 D_n^3 \quad (B.5)$$

Verder kan opgemerkt worden dat de invloed van de poriënstroming als verwaarloosbaar kan worden beschouwd vergeleken met de externe stroomkrachten (Schiereck 1998).

Als de situatie wordt beschouwd, zoals gedaan door Hattori, Yauchi en Kasahara (Hattori e.a. 2000) dan geldt de volgende stabiliteitsconditie voor de rotatie om punt A in het geval van  $u_a = 0$ .

$$[F_L \pm W \cos \alpha] + [F_D + F_I - W \sin \alpha] e_1 - F_S e_2 = 0 \quad (B.6)$$

$l$ = parallelle component van de afstand van het gewichtscentrum G tot de bovenkant van de 'armour layer' (laagdikte) bij contactpunt A [m]

$e_1$ = normale component van de afstand van het gewichtscentrum G tot de bovenkant van de 'armour layer' (laagdikte) bij contactpunt A [m]

$e_2$ = normale component van de afstand tussen het contactpunt A en de bovenkant van de 'armour layer' (laagdikte) [m]

De parameters  $l$ ,  $e_1$  en  $e_2$  zijn in figuur B.1 ter verduidelijking weergegeven. Het plusminus teken in het linkerlid van de vergelijking correspondeert met opwaartse en neerwaartse rotatie. Een opwaartse rotatie komt overeen met een rotatie opgewekt door golfoploop en een neerwaartse rotatie komt overeen met een rotatie opgewekt door golfterugloop.

Hattori, Yauchi en Kasahara maakten vervolgens gebruik van het stabiliteitgetal  $N_S$  en drukten de mate van stabiliteit tegen oplichten uit met het getal  $N_L$ .

$$N_S = \frac{H_i}{(\Delta C_1^{1/3} D_n)} \quad (B.7)$$

$$N_L(x,t) = \frac{2gH_i C_1^{2/3}}{C_L C_3 u^2} \cos \beta \quad (B.8)$$

Om het relatieve belang van de verschillende krachten (traagheidskracht, liftkracht en sleepkracht) vast te stellen wordt gebruik gemaakt van het Keulegan-Carpenter getal (K-C). Dit getal geeft het relatieve belang aan van sleep-, lift-, en traagheidskrachten die werken op een lichaam in oscillerende stroming. Voor verschillende waarden van het K-C getal geldt het volgende:

$K-C < 1$	belang traagheidskracht neemt toe.
$K-C > 15$	belang sleepkracht neemt toe.
$K-C > 5$	liftkracht is belangrijk.

Waarden voor K-C tussen 10 en 30 kunnen als realistisch worden beschouwd. Als gevolg hiervan kunnen de effecten van rotatie door de traagheidskracht en wrijving worden verwaarloosd. Het kritieke stabiliteitsgetal kan gedefinieerd worden als:

$$N_{CS} = \min[N_{SX} / x \geq 0] \quad (B.9)$$

$$N_{SX}(x) = \min \left[ N_L(x,t) \frac{1 \pm \frac{e_l \tan \alpha}{l}}{1 - \frac{C_D C_2 e_l}{C_L C_3 l}} \middle| 0 \leq t \leq T \right] \quad (B.10)$$

Voor de volledige afleiding van deze vergelijkingen wordt verwezen naar Hattori, Yauchi en Kasahara (Hattori e.a. 2000). Proefondervindelijk is vastgesteld dat de meeste schade optreedt rond de waterlijn, waar de golfoploopsnelheid het grootste is.

# Invloed van plaatsingsdichtheid op de stabiliteit van 'armour layers' van golfbrekers

## Bijlagen



A.F.M. van den Bosch  
9107168  
juni 2001

  
**Royal  
Boskalis Westminster nv**  
*International Dredging Contractors*

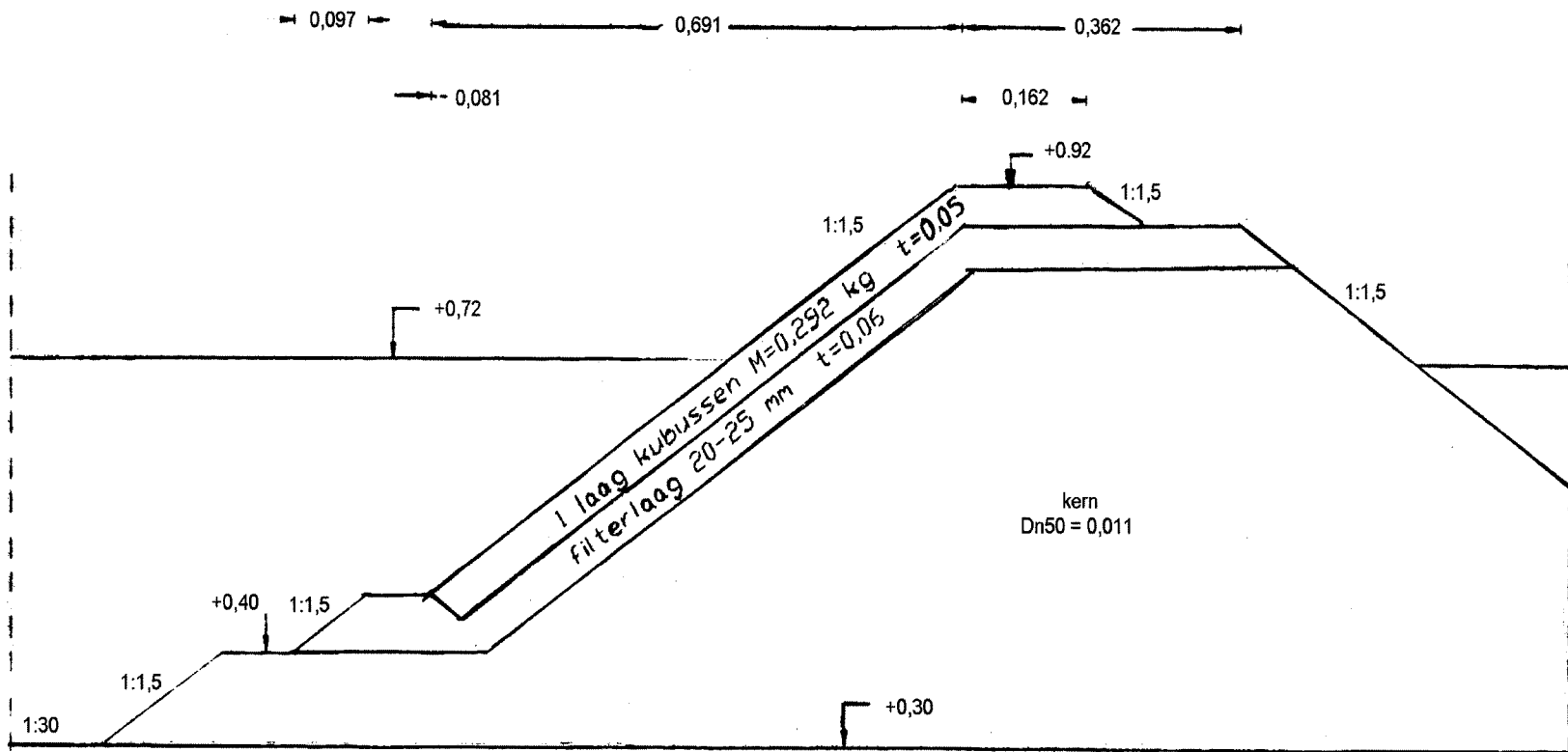
  
Delft University of Technology  
Faculteit Civiele Techniek en  
Geowetenschappen  
Afdeling Waterbouwkunde en Geotechniek  
Sectie Kustwaterbouwkunde en Offshore

## **Inhoud bijlagen**

- I Figuren voorgaande onderzoeken
- II Figuren huidig onderzoek
- III Foto's
- IV Gradering
- V Meting laagdikte
- VI Schaderapporten
- VII Resultaten experimenten
- VIII Schadeverloop
- IX Golfspectra
- X Vergelijking schadeverloop met voorgaande onderzoeken
- XI Berekening stabiliteit tegen oplichten element
- XII Berekening inklemming
- XIII Berekening stabiliteit tegen afschuiven
- XIV Berekening stabiliteit tegen roteren bij tetrapoden

## **BIJLAGE I**

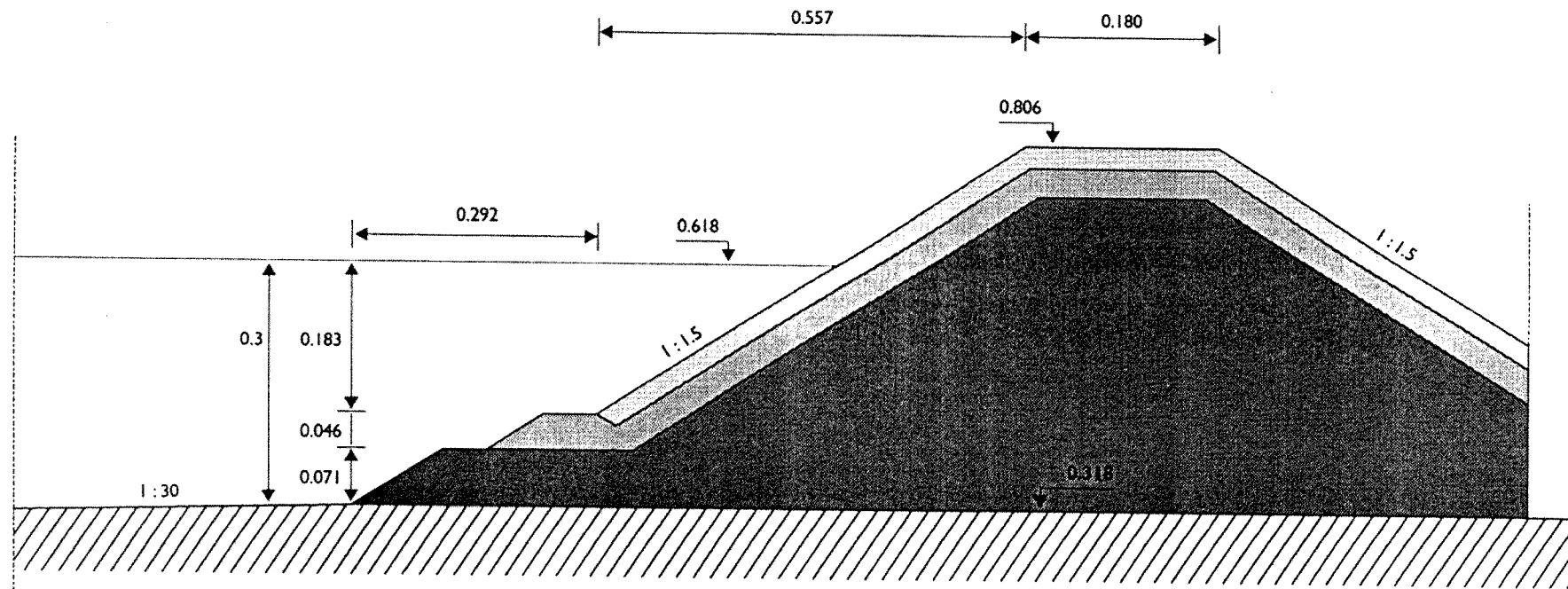
### **Figuren voorgaande onderzoeken**



Proefopstelling Bhageloe voor kubussen in een enkele toplaag

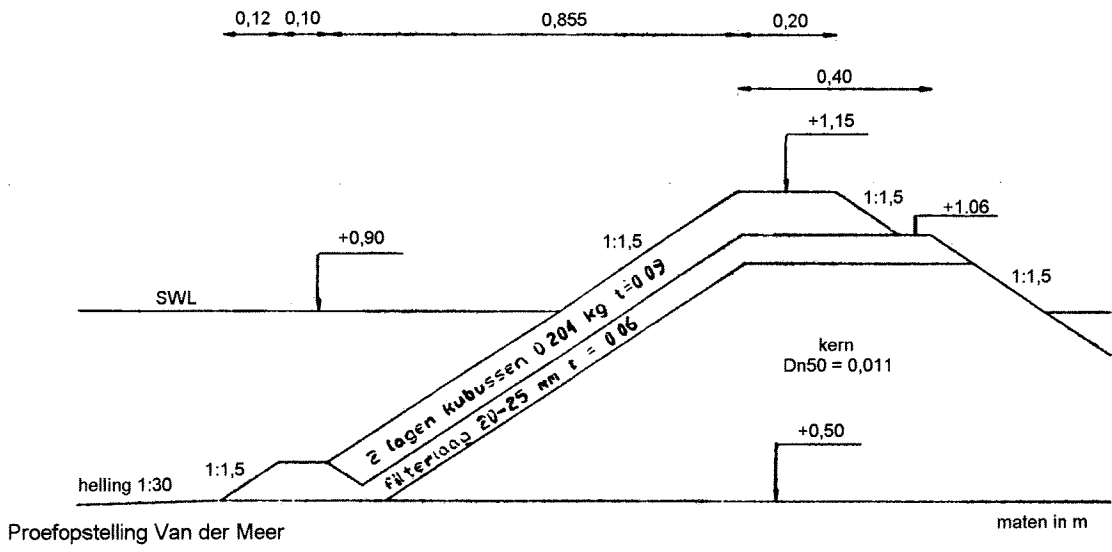
maten in m

serie A (basis)



- I laag kubussen  $M_{50} = 0.110 \text{ kg}$ ,  $t = 0.036$
- ▨ filterlaag 1/10 - 1/5 van  $M_{50}$ , toplaag,  $t = 0.04$
- kern  $D_{n50} = 0.01 \text{ m}$ ,  $D_{85}/D_{15} = 1.5$

Proefopstelling Van Gent en Spaan

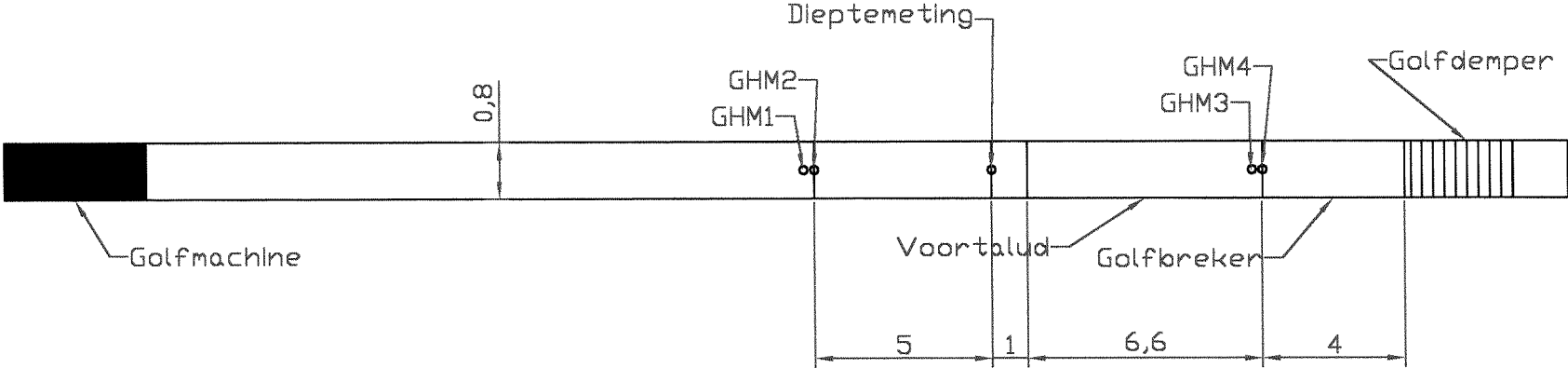




## **BIJLAGE II**

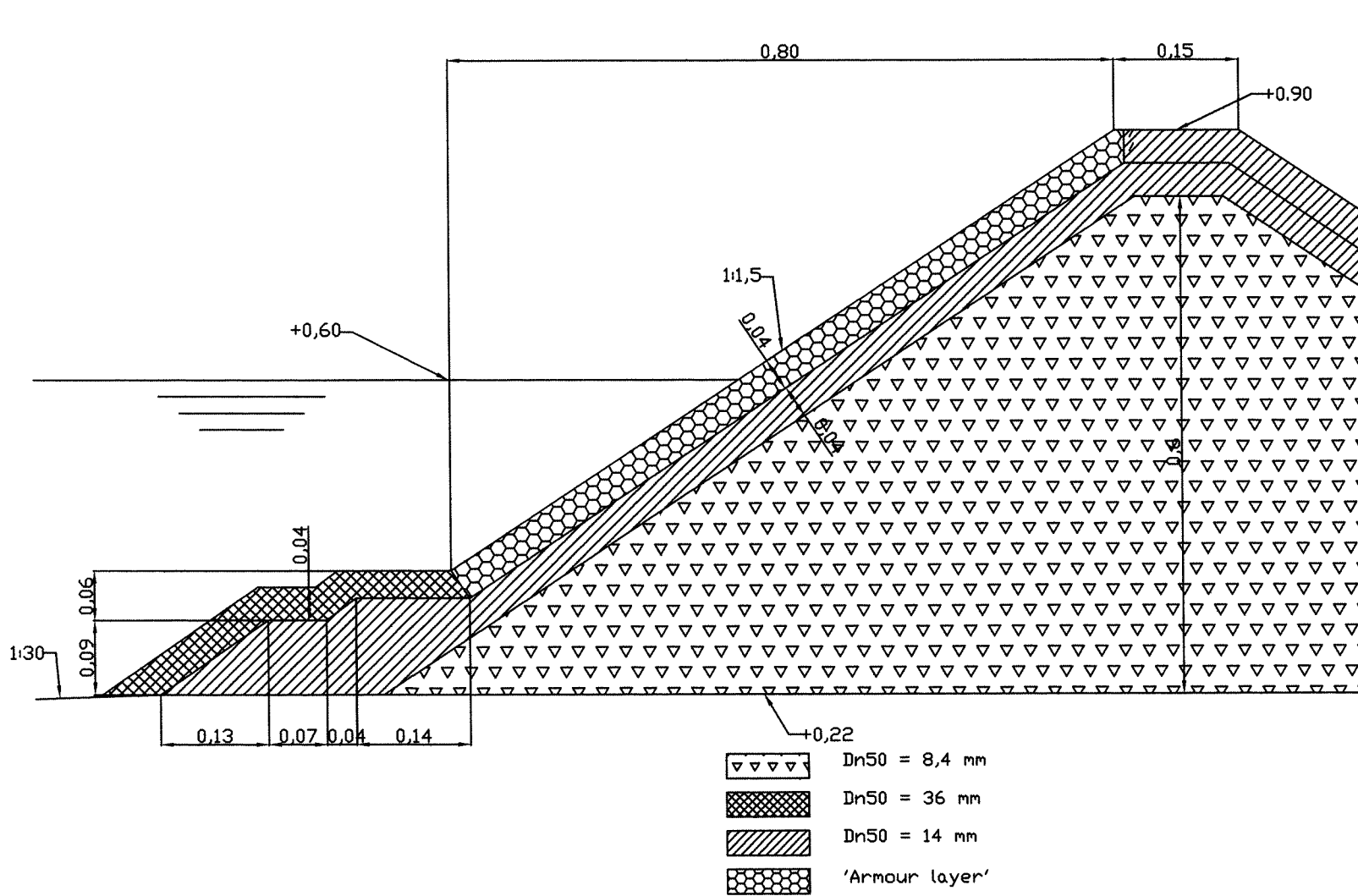
### **Figuren huidig onderzoek**

Bovenaanzicht golfgoot



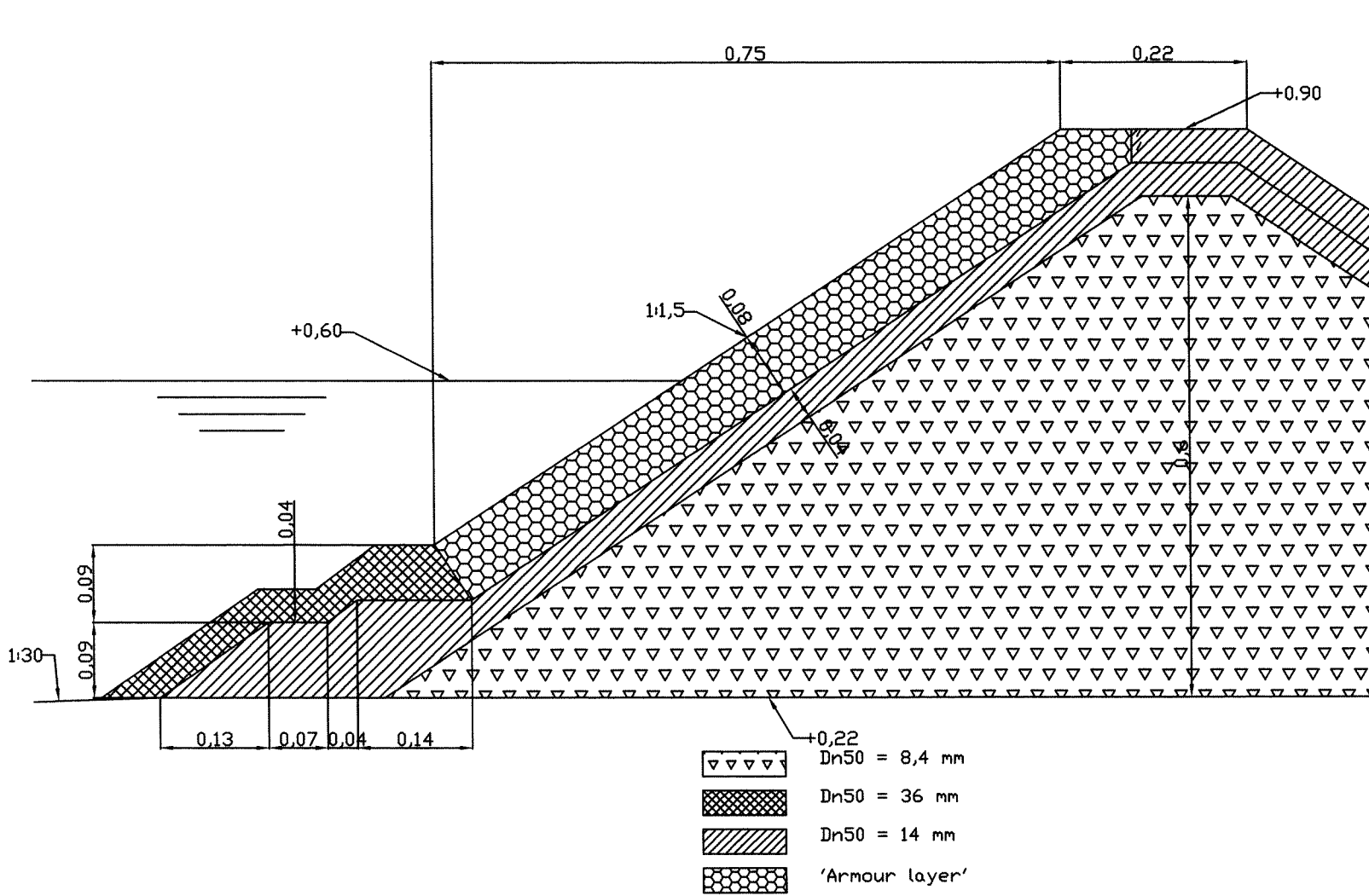
Alle afmetingen zijn in meters

# Model enkele toplaag bij talud 1:1,5



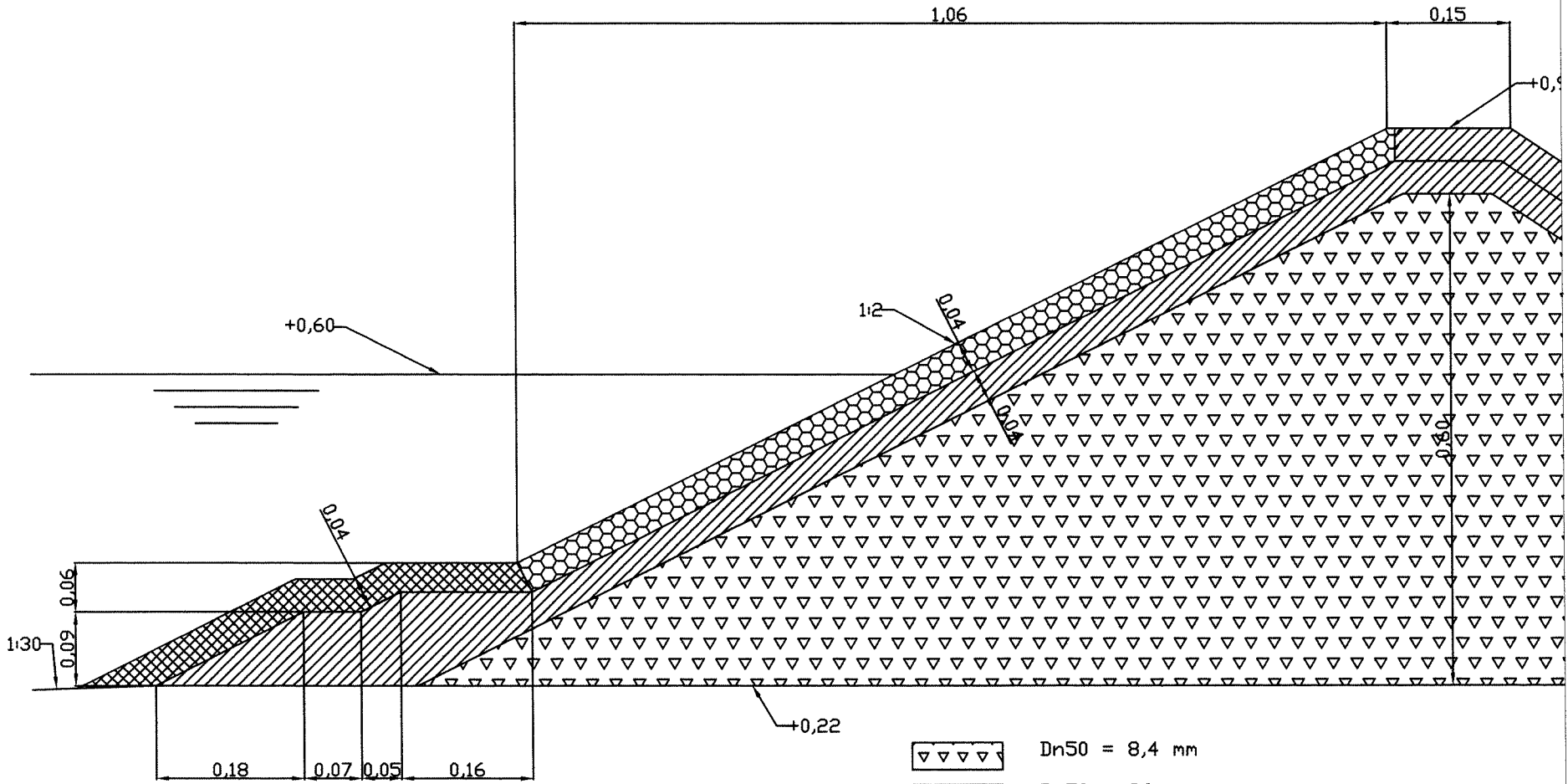
Alle afmetingen zijn in meters




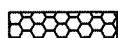
# Model dubbele top laag bij talud 1:1,5



Alle afmetingen zijn in meters

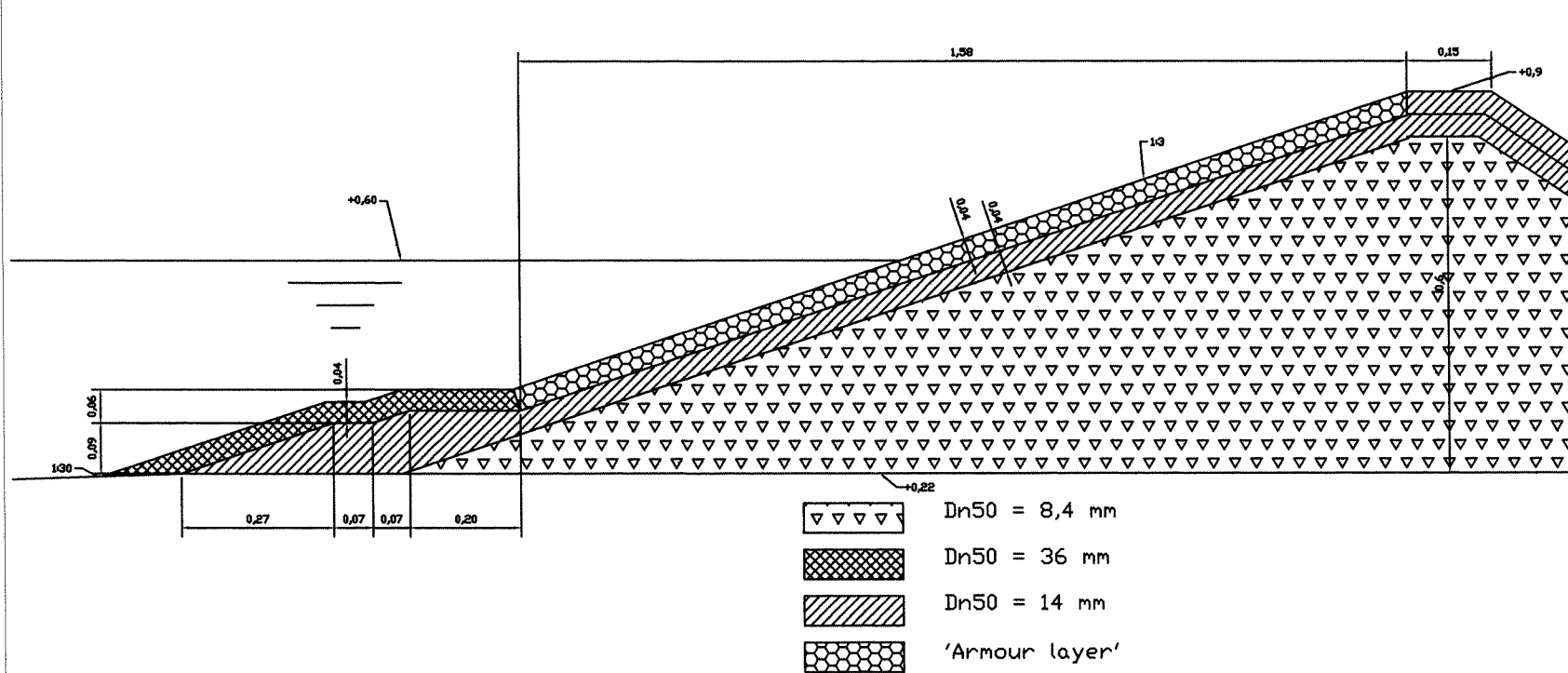
# Model enkele toplaag bij talud 1:2



-  Dn50 = 8,4 mm
-  Dn50 = 36 mm
-  Dn50 = 14 mm
-  'Armour layer'

Alle afmetingen zijn in meters

# Model enkele toplaag bij talud 1:3



Alle afmetingen zijn in meters

## **BIJLAGE III**

**Foto's**



Foto III.1: K0.4 voor golfaanval



Foto III.2: K0.4 na  $H_{si}=0,155m$  [1]





Foto III.3: K0.4 na  $H_{si}=0,155m$  [2]

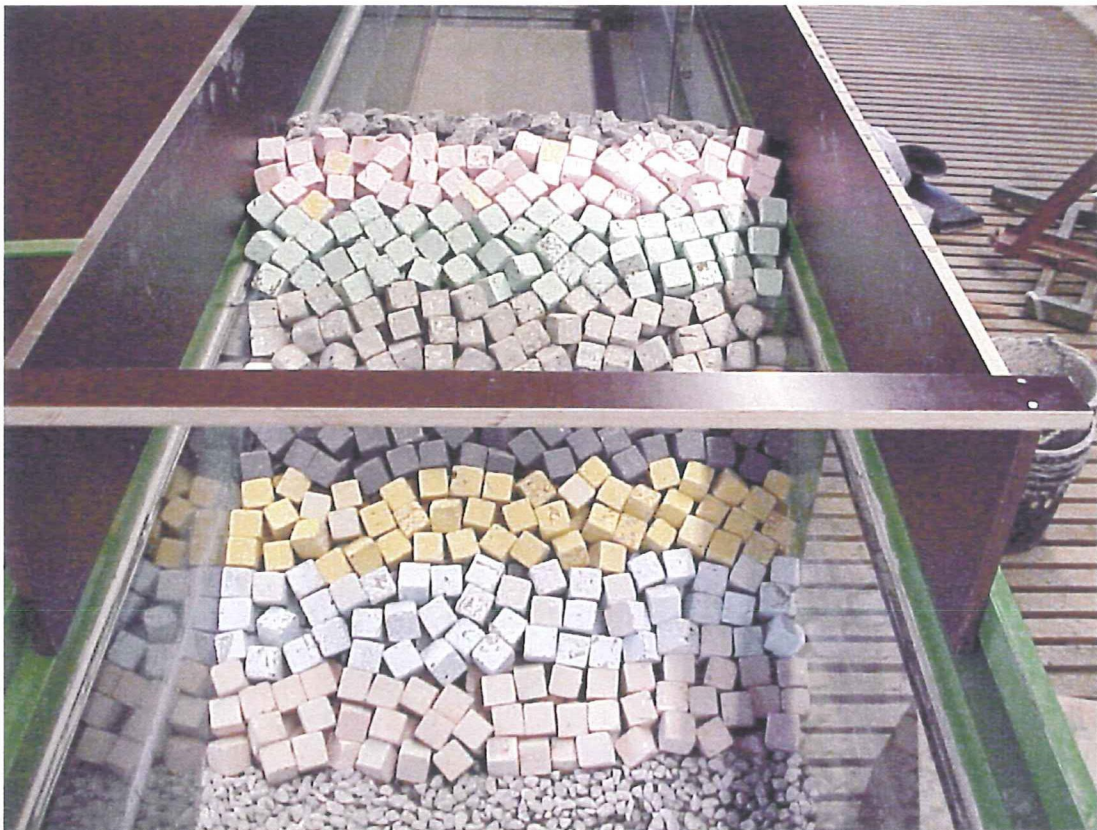


Foto III.4: K0.3 voor golfaanval





Foto III.5: K0.3 na  $H_{s1}=0,155\text{m}$  [1]



Foto III.6: K0.3 na  $H_{s1}=0,155\text{m}$  [2]



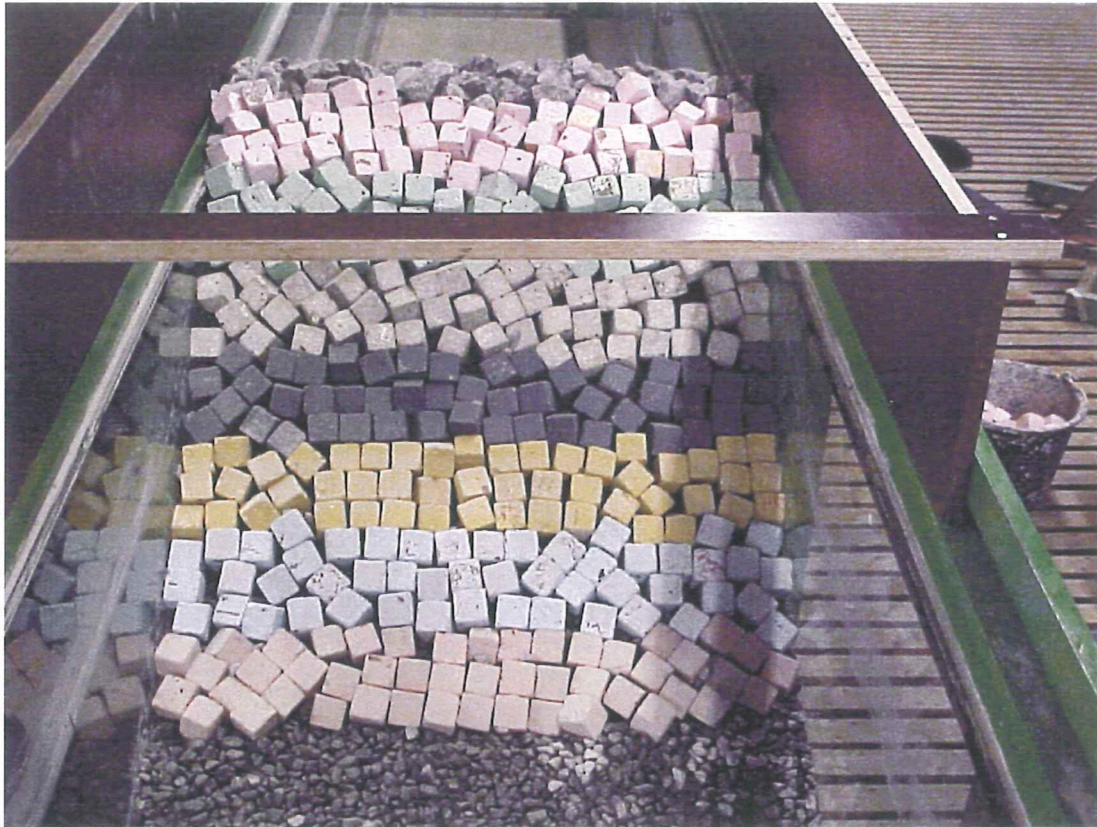


Foto III.7: K0.3 onderste toplaag na afloop



Foto III.8: K0.25 voor golfaanval





Foto III.9:  $K_{0.25} Na H_{si} = 0,159m$  [1]



Foto III.10:  $K_{0.25} Na H_{si} = 0,159m$  [2]





Foto III.11: K0.4t voor golfaanval



Foto III.12: K0.4t na  $H_{si}=0,166m$





Foto III.13: K0.3t voor golfaanval



Foto III.14: K0.3t na  $H_{si}=0,175m$





Foto III.15: K0.25t voor golfaanval



Foto III.16: K0.25t na  $H_{sj}=0,18m$





Foto III.17: HerK0.4t voor golfaanval



Foto III.18: HerK0.4t na  $H_{si}=0,175m$





Foto III.19: HerK0.3t voor golfaanval



Foto III.20: HerK0.3t na  $H_{si}=0,175$





Foto III.21: HerK0.25t voor golfaanval



Foto III.22: HerK0.25t na  $H_{si}=0,175m$





Foto III.23: T0.4t voor golfaanval



Foto III.24: T0.4t na  $H_{si}=0,138$  m



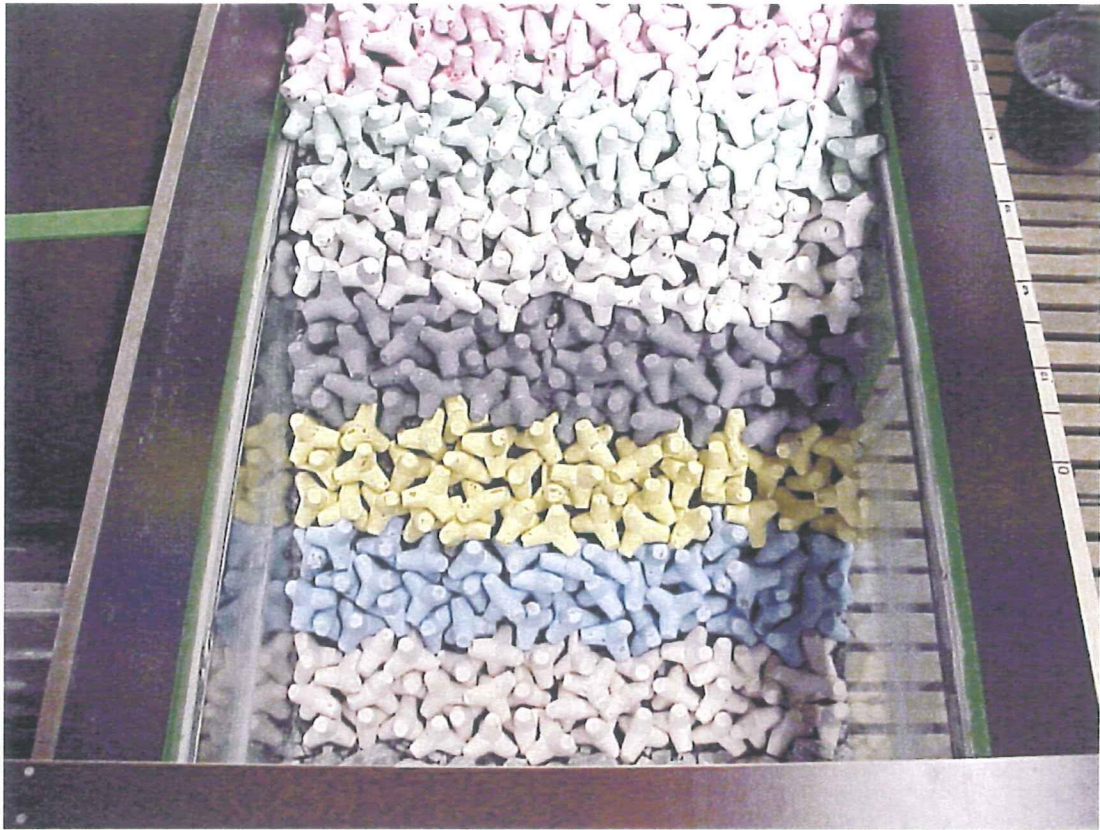


Foto III.25: T0.3t voor golfaanval



Foto III.26: T0.3t na  $H_{si}=0,138m$





Foto III.27: T0.25t voor golfaanval

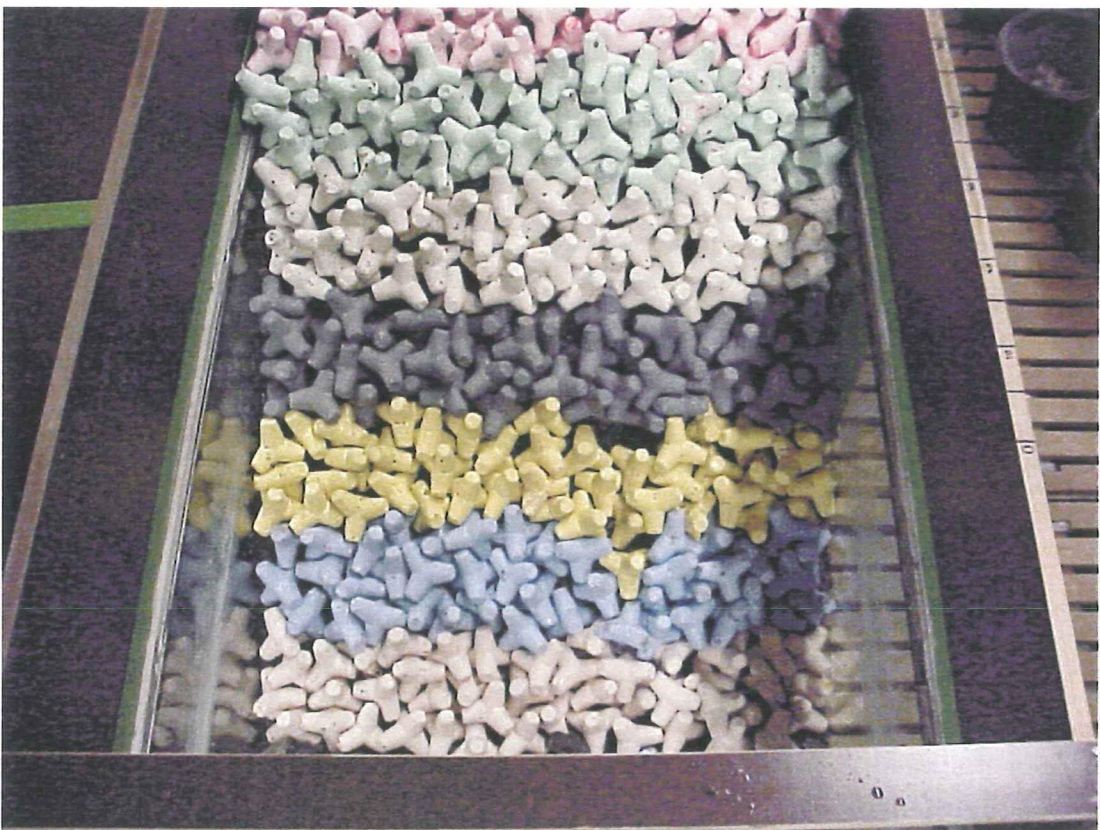


Foto III.28: T0.25t na  $H_{si}=0,166m$





Foto III.29: HerT0.25t voor golfaanval



Foto III.30: HerT0.25t na  $H_{si}=0,159m$





Foto III.31: B0.3t voor golfaanval



Foto III.32: B0.3t na  $H_{sj}=0,107m$





Foto III.33: B0.3t na  $H_{st}=0,115m$



Foto III.34: BA t voor golfaanval



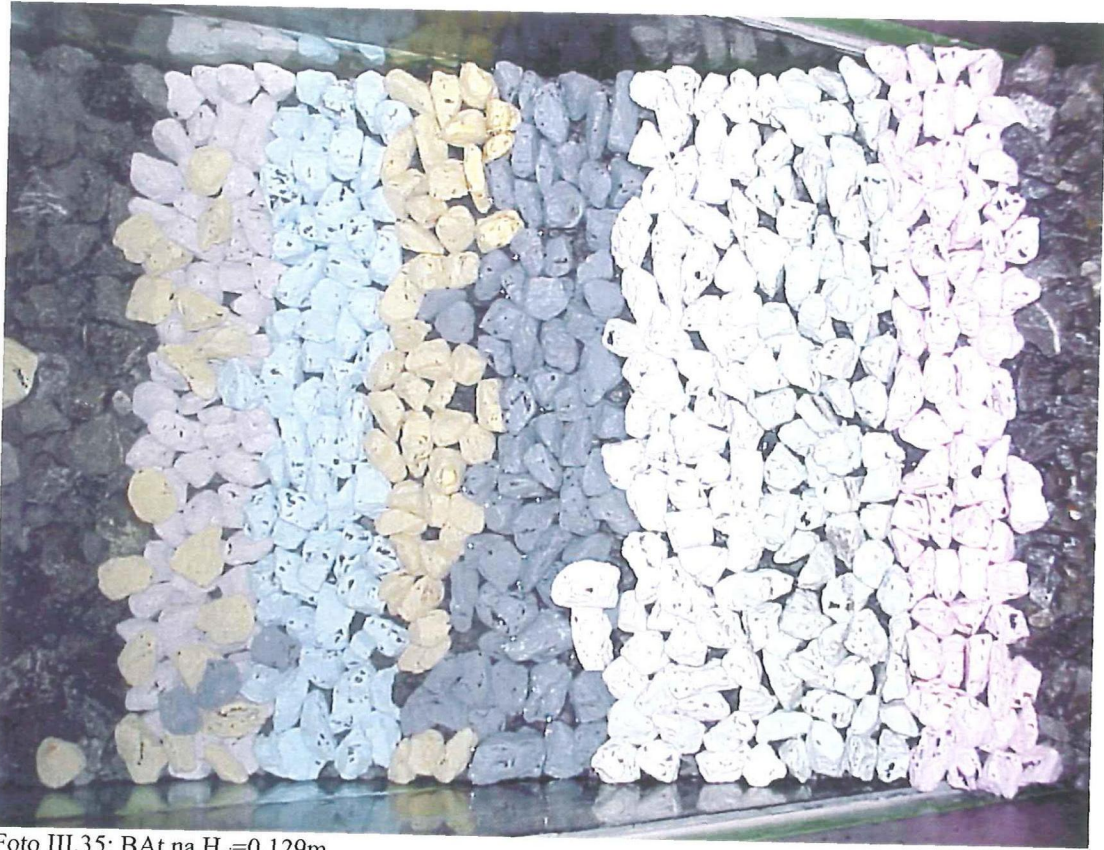


Foto III.35: BAt na  $H_{si}=0,129m$



Foto III.36: BAt na  $H_{si}=0,138m$





Foto III.37: BBt voor golfaanval



Foto III.38: BBt na  $H_{si}=0,097m$





Foto III.39: B0.3t12 voor golfaanval



Foto III.40: B0.3t12 na  $H_{s1}=0,115\text{m}$





Foto III.41: BAt12 voor golfaanval



Foto III.42: BAt12 na  $H_{si}=0,149m$





Foto III.43: BAt12 na  $H_{si}=0,155m$



Foto III.44: BBt12 voor golfaanval





Foto III.45: BBt12 na  $H_{si}=0,0966m$



Foto III.46: Her1B0.3t12 voor golfaanval



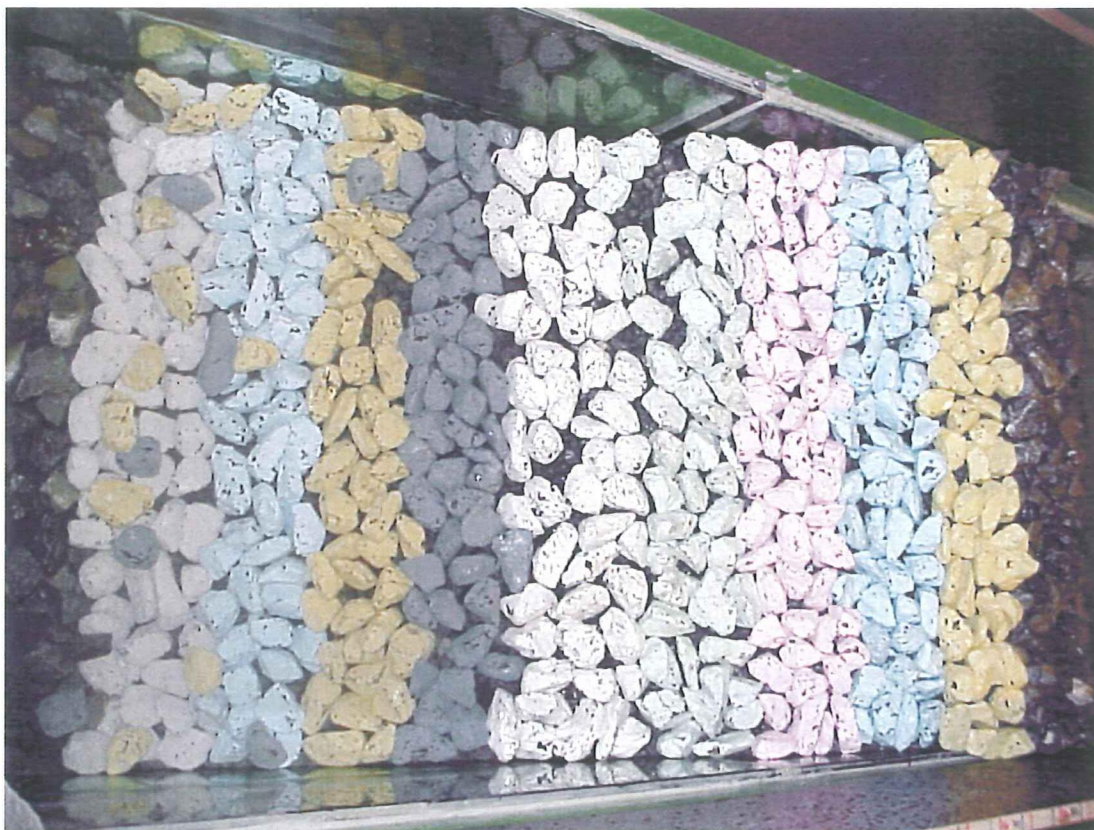


Foto III.47: Her1B0.3t12 na  $H_{si}=0,107m$



Foto III.48: Her1B0.3t12 na  $H_{si}=0,115m$





Foto III.49: Her2B0.3t12 voor golfaanval



Foto III.50: Her2B0.3t12 na  $H_{si}=0,115m$





Foto III.51: Her3B0.3t12 voor golfaanval



Foto III.52: Her3B0.3t12 na  $H_{s1}=0,115\text{m}$





Foto III.53: BW0.3t12 voor golfaanval

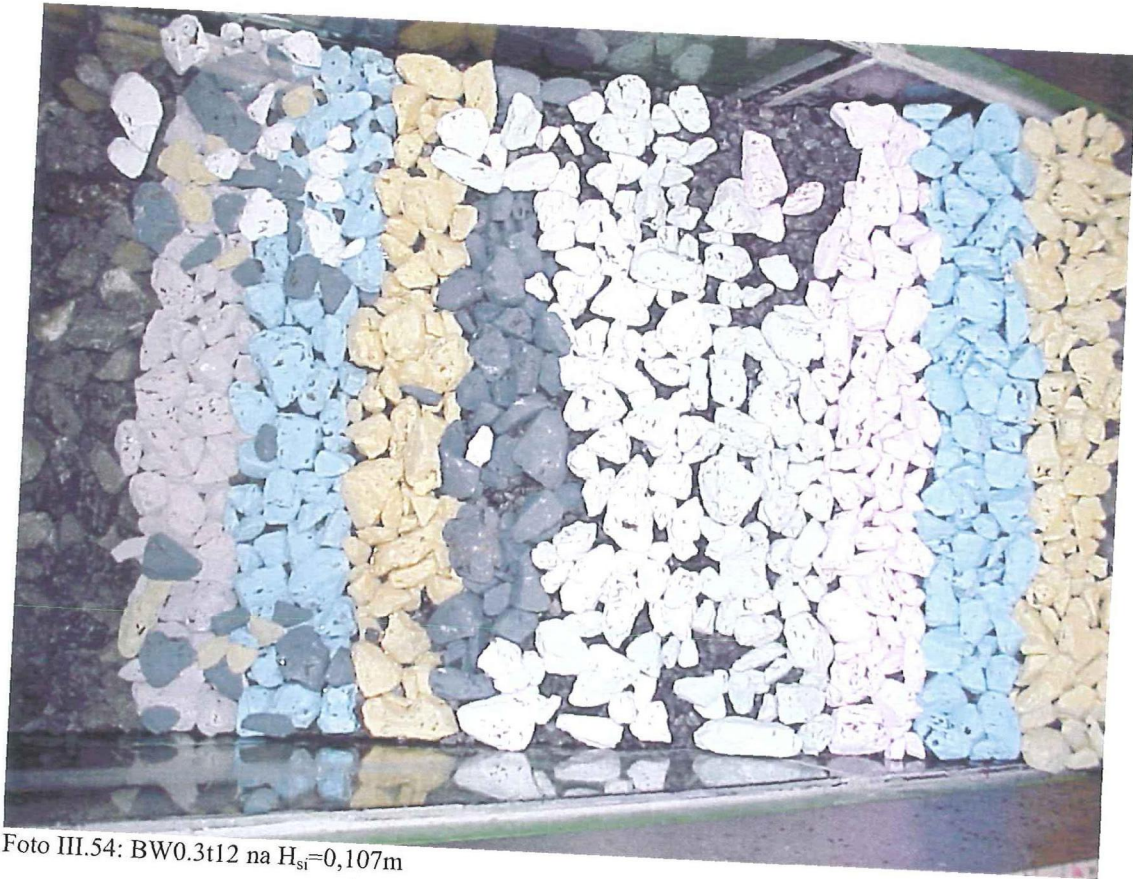


Foto III.54: BW0.3t12 na  $H_{si}=0,107m$





Foto III.55: B0.3t13 voor golfaanval



Foto III.56: B0.3t13 na  $H_{sj}=0,155m$





Foto III.57: B0.3t13 na  $H_{st}=0,159m$



Foto III.58: BAt13 voor golfaanval





Foto III.59: BA13 na  $H_{st}=0,166m$



Foto III.60: BB13 voor golfaanval





Foto III.61: BBt13 na  $H_{si}=0,138\text{m}$



Foto III.62: BBt13 na  $H_{si}=0,149\text{m}$





Foto III.63: Her1B0.3t13 voor golfaanval



Foto III.64: Her1B0.3t13 na  $H_{si}=0,149m$





Foto III.65: Her1B0.3t13 na  $H_{si}=0,155\text{m}$



Foto III.66: Her2B0.3t13 voor golfaanval





Foto III.67: Her2B0.3t13 na  $H_{si}=0,155m$

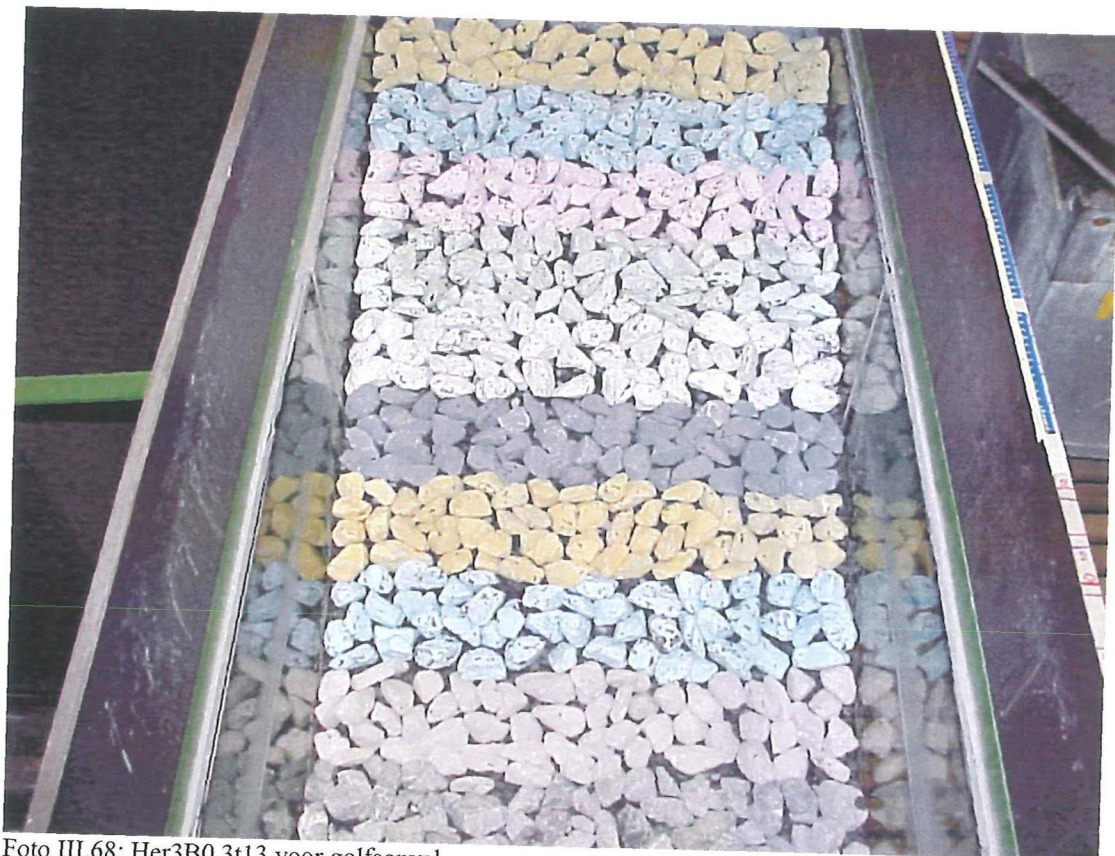


Foto III.68: Her3B0.3t13 voor golfaanval





Foto III.69: Her3B0.3t13 na  $H_{si}=0,138m$

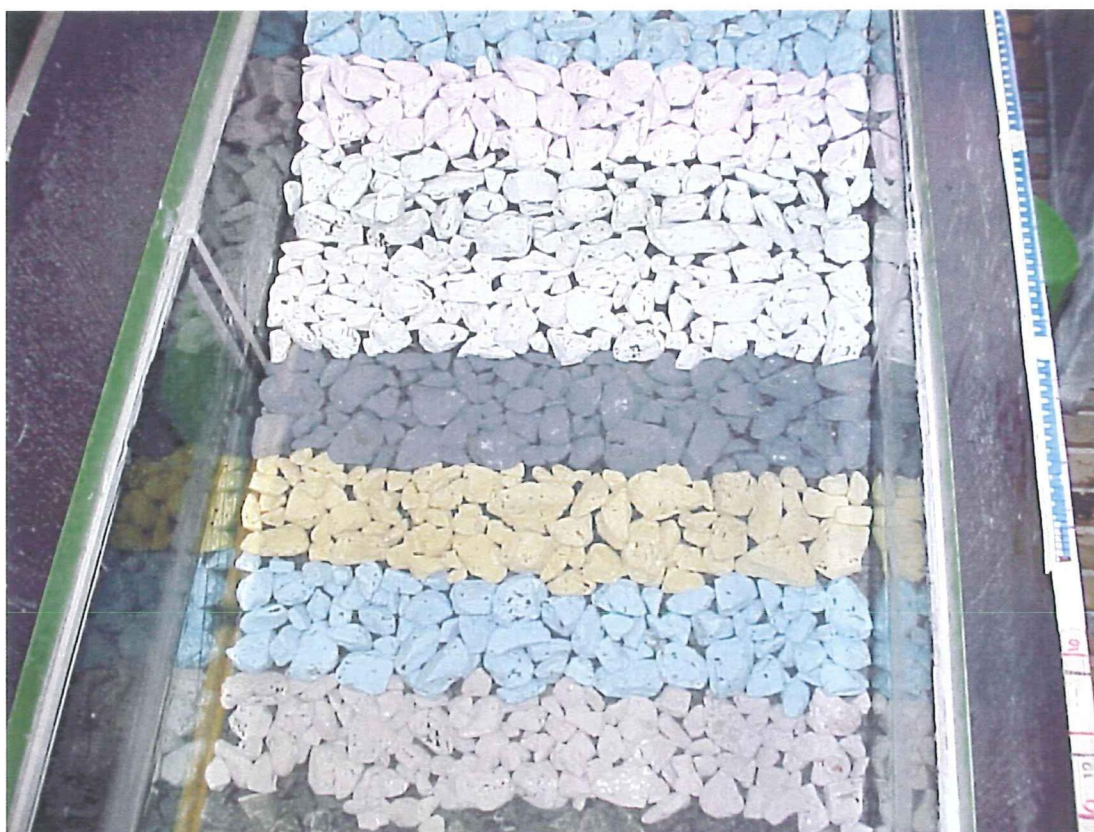


Foto III.70: BW0.3t13 voor golfaanval



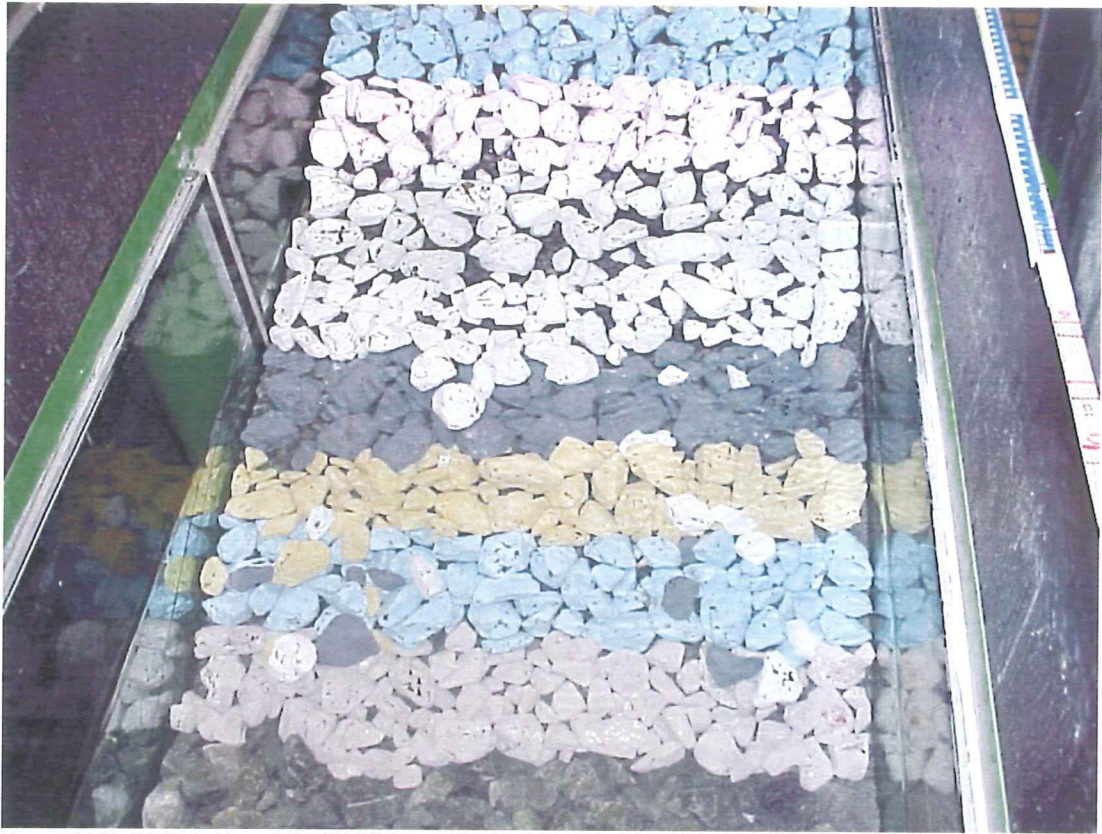


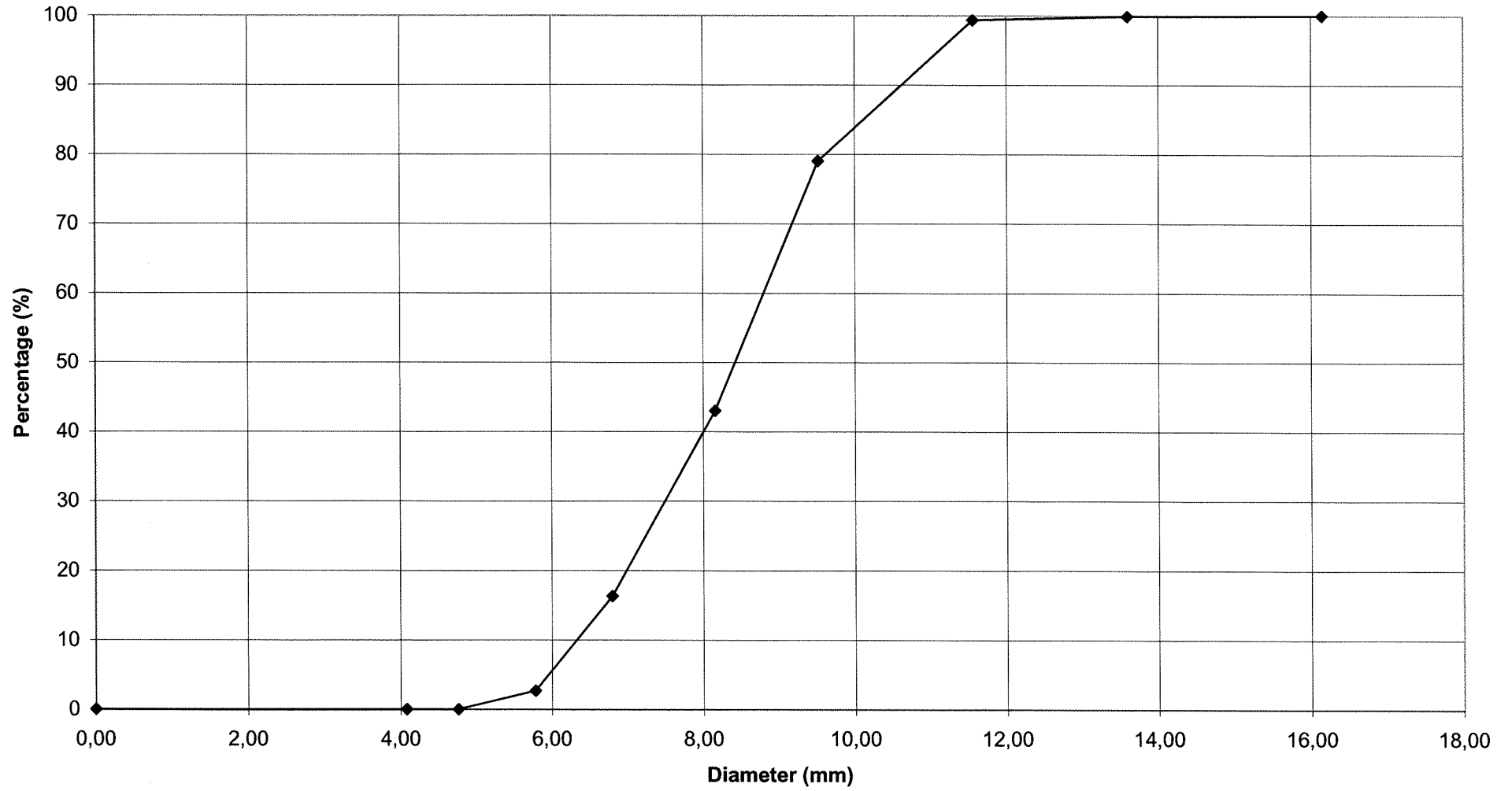
Foto III.71: BW0.3t13 na  $H_{si}=0,138\text{m}$

## **BIJLAGE IV**

### **Gradering**

# Zeefkromme Kern

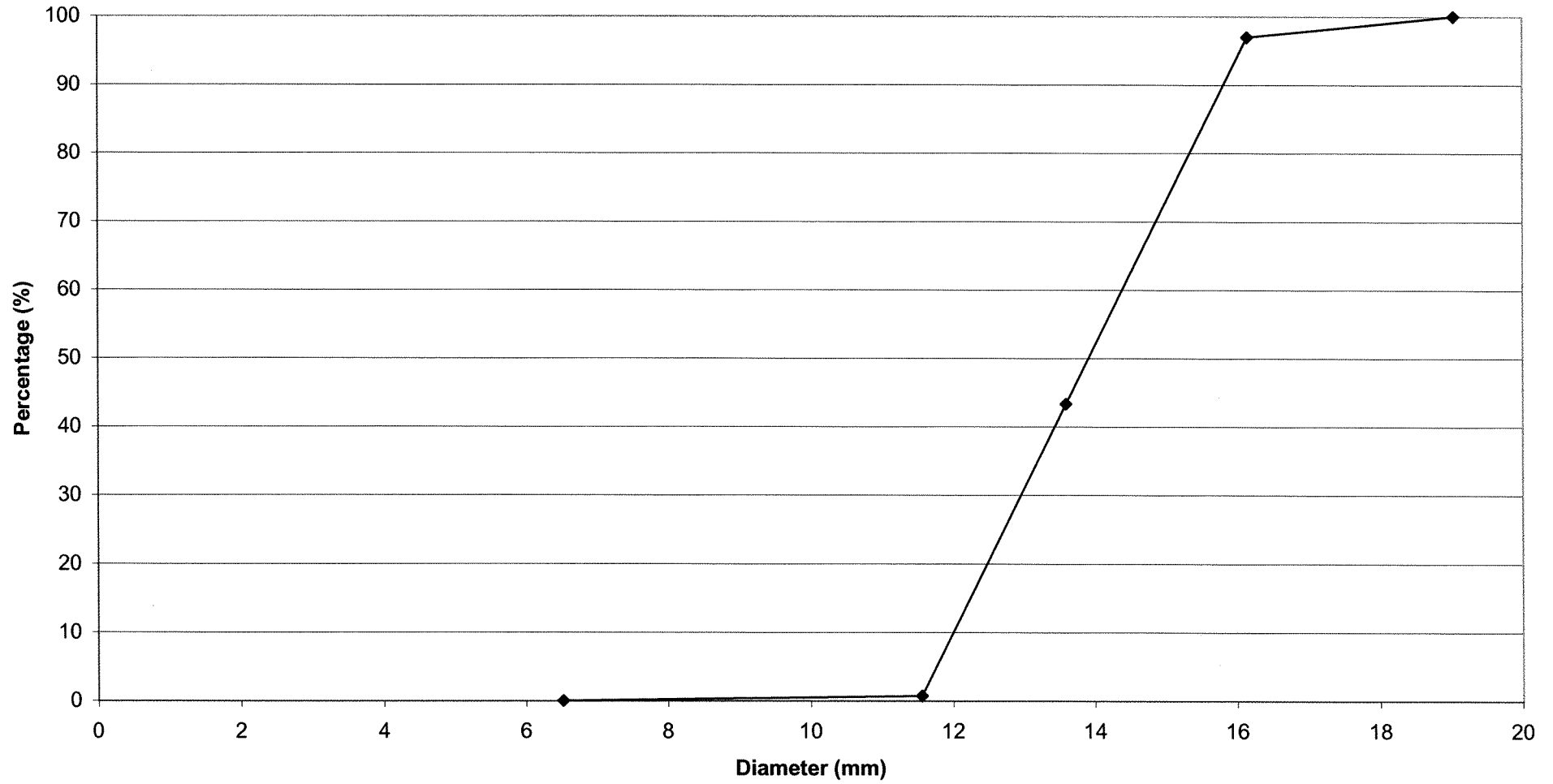
D15 = 6,7 mm; D50 = 8,4 mm; D85 = 10,1 mm





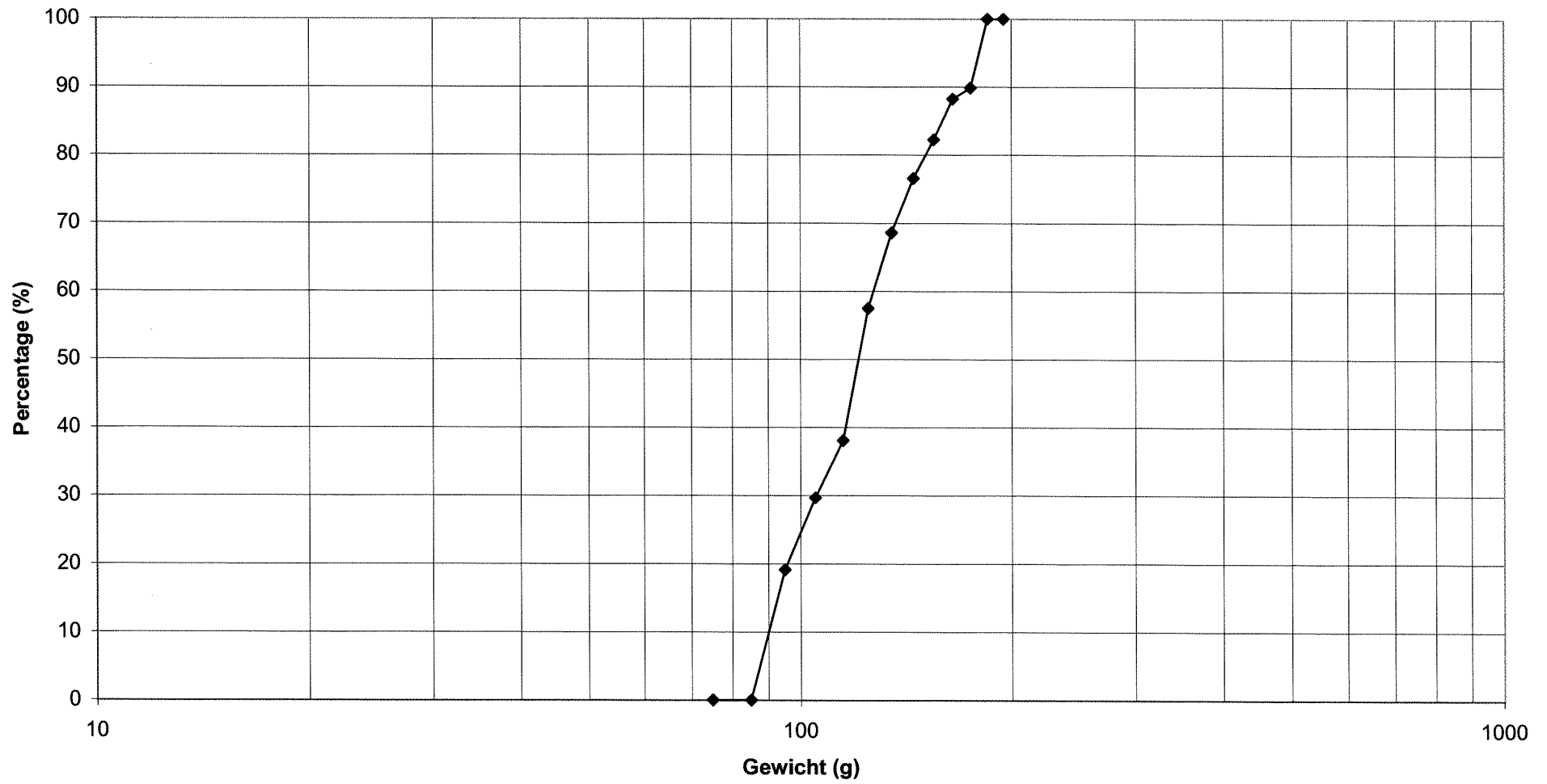
# Zeefkromme filter en teen

D15 = 12,2 mm; D50 = 13,9 mm; D85 = 15,6 mm



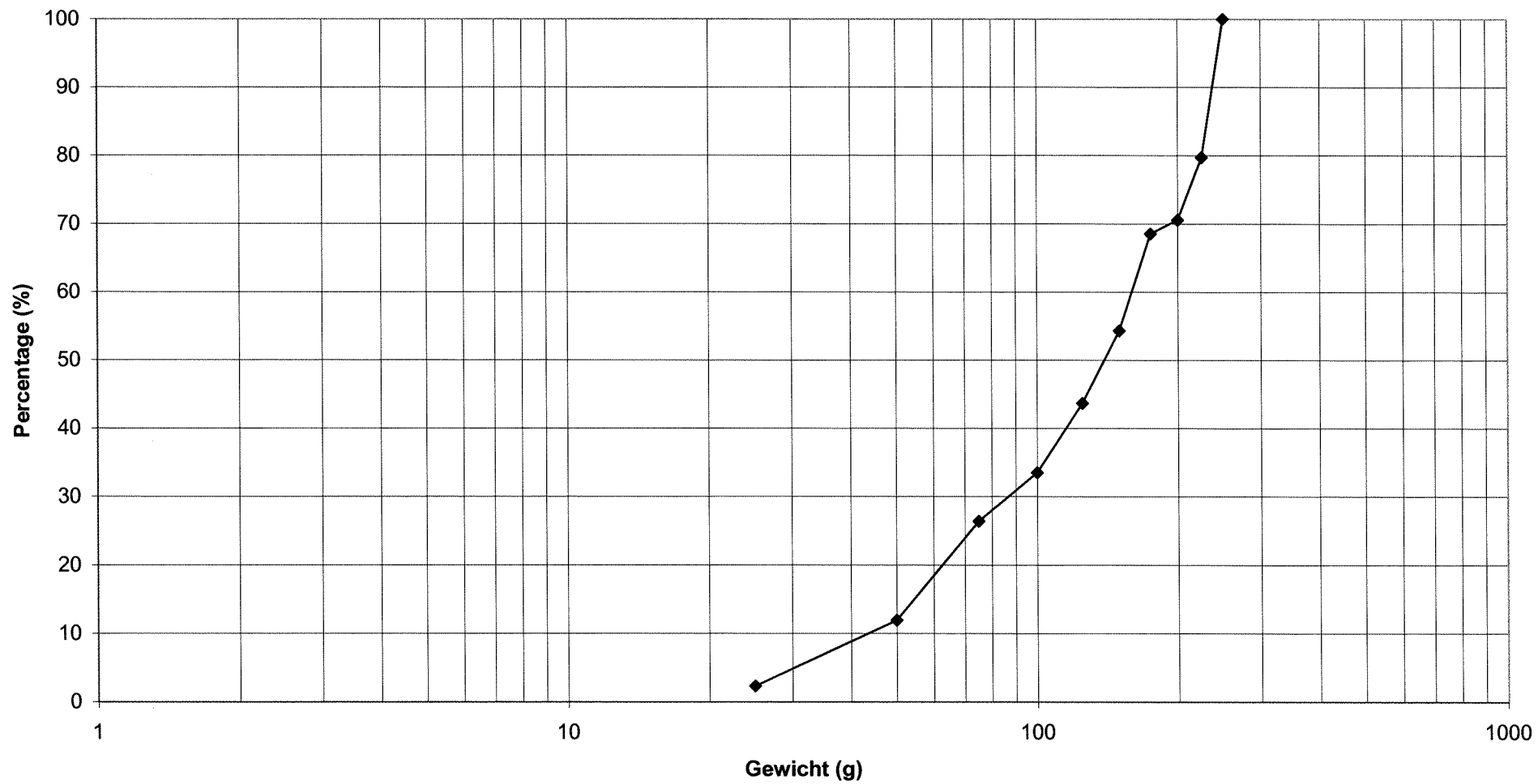
# Zeefkromme Toplaag Nauw

D15 = 33 mm; D50 = 36 mm; D85 = 40 mm



# Zeefkromme Toplaag Wijd

D15 = 27 mm; D50 = 37 mm; D85 = 44 mm



## **BIJLAGE V**

### **Meting laagdikte**



In tabel V.1 is een voorbeeld gegeven van een meting uitgevoerd om de laagdikte te bepalen. Er wordt onderscheid gemaakt tussen de metingen I, II en III. Bij meting I werd er gemeten op 10 cm afstand van de wand van de goot aan de kant van de bezinkbank. Bij meting II werd in het midden gemeten en bij meting III werd op 10 cm afstand gemeten van de andere wand van de goot. In de kolommen 'meting' is de waarde weergegeven, die werd afgelezen van de peilnaald. Deze waarde is vervolgens omgerekend naar de laagdikte  $d_L$ .

Deze meting werd gedaan bij het experiment HerK0,4t. Dit was een golfbreker met een dubbele 'armour layer' van kubussen op een talud van 1:1,5.

Tabel V.1: Meting laagdikte

x[m]	Meting I[m]	$d_{L,I}$ [m]	Meting II[m]	$d_{L,II}$ [m]	Meting III[m]	$d_{L,III}$ [m]
0	0,45	0,097	0,46	0,101	0,47	0,114
0,05	0,48	0,092	0,51	0,114	0,49	0,097
0,1	0,51	0,090	0,53	0,102	0,51	0,088
0,15	0,55	0,090	0,53	0,081	0,57	0,113
0,2	0,59	0,096	0,59	0,102	0,60	0,105
0,25	0,61	0,092	0,65	0,121	0,64	0,115
0,3	0,64	0,087	0,66	0,103	0,67	0,110
0,35	0,67	0,084	0,69	0,101	0,70	0,104
0,4	0,71	0,087	0,73	0,103	0,73	0,109
0,45	0,75	0,093	0,77	0,111	0,78	0,115
0,5	0,77	0,082	0,80	0,108	0,80	0,109
0,55	0,82	0,093	0,84	0,113	0,84	0,113
0,6	0,83	0,074	0,85	0,095	0,87	0,112
0,65	0,88	0,088	0,90	0,105	0,90	0,110

De gemiddelde waarde voor de laagdikte wordt dan gelijk aan 0,101 m. De waarde van  $\rho_{bulk}$  wordt bepaald met vergelijking 5.19 en heeft de waarde  $1328 \text{ kg/m}^3$ .  $V_{bulk}$  in vergelijking 5.19 is bepaald door de gemiddelde laagdikte met het oppervlakte te vermenigvuldigen.  $M_{bulk}$  in vergelijking 5.19 is bekend aangezien het aantal elementen en hun massa bekend is. Met behulp van vergelijking 4.2 kan nu de volumieke porositeit  $n_v$  worden bepaald. Deze is gelijk aan 0,399. Gestreefd werd naar een porositeit van 0,4.

**BIJLAGE VI**  
**Schaderapporten**

<b>Experiment:</b>	<b>K0.4</b>							
<b>Armourement:</b>	Kubus	cotan $\alpha$ :	1,5	$n_v$ :	0,4			
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)	Kruin	Roze	R	SWL	Geel	G		
		Groen	Gr		Blauw	B		
		Wit	W	Teen	Bruin	Br		
		Grijs	Gi					
<b>Opmerking:</b>	De teen is opgebouwd uit hetzelfde materiaal als het filtermateriaal.							
$H_s$ (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L(inks)	M(idden)	R(echts)	L	M	R	
0,052								
0,0671	15		1G					
0,0966	15		1G					
0,115	15		2G					
0,138	25		5G		10Br,2B,1G			
0,149	25		6G		5Br,1B			
0,155	25		5G,4Gi		19Br,29B, 23G,8Gi,1W		2G,5Gi,4W,5Gr	
Schuiven				Verplaatsen				
R	0	G	2	R	0	G	24	
Gr	5	B	0	Gr	0	B	31	
W	4	Br	0	W	1	Br	34	
Gi	5	<b>Totaal</b>	16	Gi	8	<b>Totaal</b>	98	
<b>Beschrijving</b>	<p>Veel verlies van bruine elementen als gevolg van zwakke punten in de berm. De bruine, de blauwe, de gele en de grijze band zijn vervormd door de druk van de omlaag rollende stenen. Filter is zichtbaar in de bruine en de gele laag. Geconcludeerd kan worden dat de constructie is bezweken. De berm is enigszins aangetast. Zie foto III.1 t/m III.3.</p>							

<b>Experiment:</b>		<b>K0.3</b>						
<b>Armourement:</b>		Kubus		cotan $\alpha$ :	1,5	$n_v$ :	0,3	
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)		Kruin	Roze	R	SWL	Geel	G	
			Groen	Gr		Blauw	B	
			Wit	W	Teen	Bruin	Br	
			Grijs	Gi				
<b>Opmerking:</b>		De teen is opgebouwd uit hetzelfde materiaal als het filtermateriaal.						
$H_s$ (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L	M	R	L	M	R	
0,115	15		3G					
0,138	25		5G,3Gi			10Br		
0,149	25		3B,3Gi			26Br,22B, 17G,8Gi,7W	2B,2G,2Gi,3W	
0,155	25		5G,5Gi			11Br,24B,32G, 41Gi,21W		
Schuiven				Verplaatsen				
	R	0	G	2	R	0	G	49
	Gr	0	B	2	Gr	0	B	46
	W	3	Br	0	W	28	Br	47
	Gi	2	<b>Totaal</b>	9	Gi	49	<b>Totaal</b>	219
<b>Beschrijving</b>		<p>Herschikking kan worden geweten aan de druk van de bovenste lagen. Vermoeden bestaat dat de bruine kubussen door enige herschikking in de bovengelegen banden (heel weinig) en de druk ten gevolge hiervan over de teen worden gedrukt. De blauwe band vervormt als gevolg van het wegdrukken van de bruine kubussen. Er ontstaat meer ruimte in de blauwe band. Als gevolg hiervan beginnen enkele elementen in de gele band te rocken.</p> <p>Er vindt bij <math>H_s=0,149m</math> een flinke afschuiving plaats aan bezinktankskant golfbreker. Bruine, blauwe en enkele gele kubussen schuiven omlaag. De berm wordt weggedrukt. De berm beschermt de onderste 'armour layer' echter nog uitstekend. Door verschuiven deel berm is afschuiving echter wel makkelijker geworden voor de bovenste 'armour layer'. Na afschuiving ziet het bovenste deel van de gele band er nog zeer stabiel uit, al is er zelfs bij grijs en wit wat verplaatsing te zien als gevolg van de afschuiving.</p> <p>Als nu de teen wordt bekeken is er wel sprake van enige vervorming. In plaats van twee taluds met tussenliggende berm is er nu sprake van een lang talud. Dit is eenvoudig te verklaren door te wijzen op het weggedrukte deel van de berm.</p> <p>Er is sprake van de vorming van een nieuwe bovenste 'armour layer' met stenen van hogere banden aan de onderkant van de constructie. De onderste 'armour layer' is geheel zichtbaar bij deel afschuiving, maar ziet er perfect uit. Als gevolg van de druk van de bovenste laag en het geweld van de afschuivende elementen is de onderste 'armour layer' nog compacter geworden. <math>H_s=0,155m</math>: Veel rocking in de bovenste 'armour layer'. Vooral in de gele en grijze band. Afgeschoven elementen stabiel. Hier en daar is er sprake van rocking, waar de elementen geen zijdelingse steun ondervinden. Dit is vooral het geval aan de bovenkant van de afschuiving.</p> <p>Bij de witte band, waar de onderste 'armour layer' bloot ligt, is op twee plekken het filter zichtbaar. Er is echter geen gevaar, omdat de witte band zo hoog ligt dat er geen uitspoeling plaatsvindt. Gaten zijn vrij klein. Onderste 'armour layer' witte band heeft nog de originele pakking, zodat er hier meer ruimte is, terwijl de onderste 'armour layer' van de onderliggende lagen is samengedrukt.</p> <p>Onderste 'armour layer' ziet er zeer stabiel uit. Er vindt geen rocking plaats in de onderste 'armour layer'. Dit is niet verwonderlijk, aangezien deze zeer is samengedrukt. Afschuiving gaat verder. Er treedt nu zeer grote schade op over de gehele golfbreker. De afschuiving laat namelijk een gat open, waarboven de bovenste 'armour layer' nog intact is. De inkomende golven klappen met grote kracht op deze nog intacte 'armour layer'. Aangezien de elementen ter plaatse geen steun meer ondervinden, rollen deze meteen omlaag.</p>						

De afgeschoven elementen hopen zich op aan de onderkant van de teen en vormen van daaruit een nieuwe dubbele 'armour layer'. Verwacht kan worden dat, als de golfhoogte verder wordt opgevoerd, uiteindelijk de volledige bovenste 'armour layer' naar beneden is geschoven. Waarschijnlijk ondervindt de bovenste 'armour layer' bij deze plaatsingsdichtheid geen steun meer van de onderliggende 'armour layer'. Deze is veel minder ruw dan het filter, waar de onderste 'armour layer' op steunt. De bovenste 'armour layer' schuift hierdoor heel makkelijk af. En, als er eenmaal schade optreedt, volgt de rest met groot gemak.

Als geheel blijft de constructie zeer stabiel. Er is absoluut geen schade aan de onderste 'armour layer'. De berm steunt deze nog volledig en aangezien deze berm nu ook nog beschermd wordt door een nieuwe 'armour layer' (van de afgeschoven elementen), zal er hier ook geen verandering meer in optreden. De nieuwe bovenste 'armour layer' is ook stabiel al zal er nog enige herschikking plaatsvinden als er meer golven op de constructie worden losgelaten.

Zie de foto's III.4 t/m III.7.



<b>Experiment:</b>	<b>K0.25</b>							
<b>Armourement:</b>	Kubus	cotan $\alpha$ :		1,5	$n_v$ :	0,25		
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)	Kruin	Roze	R	SWL	Geel	G		
		Groen	Gr		Blauw	B		
		Wit	W	Teen	Bruin	Br		
		Grijs	Gi					
<b>Opmerking:</b>	De teen is opgebouwd uit hetzelfde materiaal als het filtermateriaal.							
$H_s$ (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L	M	R	L	M	R	
0,115	15		1G					
0,138	15		1B			1B		
0,149	25		5B,3G			1B		
0,155	25		8Br			3Br	2B	
0,159	25					4Br	4G	
Schuiven				Verplaatsen				
R	0	G	4	R	0	G	0	
Gr	0	B	2	Gr	0	B	2	
W	0	Br	0	W	0	Br	7	
Gi	0	<b>Totaal</b>	6	Gi	0	<b>Totaal</b>	9	
<b>Beschrijving</b>	<p>Er vindt enige herschikking plaats van de vorm van de teen. Deze vormt langzamerhand een lang talud. Na deze herschikking is er praktisch geen beweging meer in de teen. Er worden wel wat deeltjes van de teen de bruine laag ingespoeld. Dit komt de stabiliteit ten goede.</p> <p>Er is sprake van veel run-up.</p> <p><math>H_s=0,159</math>m: Na 10 minuten is de teen zodanig aangetast dat de bovenste laag van bruine elementen er onveilig uit begint te zien. Enkele bruine elementen bewegen veel. Bij een zwakke plek in het midden waar bruine elementen wegspoelden is er sprake van inzakking van de blauwe band (heel licht). Verder ziet alles er heel stabiel uit. Ook de nog intacte delen van de bruine elementen. Teen houdt verder prima stand.</p> <p>De constructie is niet bezweken.</p> <p>Zie de foto's III.8 t/m III.10.</p>							

<b>Experiment:</b>		<b>K0.4t</b>						
<b>Armourement:</b>		Kubus		cotan $\alpha$ :	1,5	$n_v$ :	0,4	
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)		Kruin	Roze	R	SWL	Geel	G	
			Groen	Gr		Blauw	B	
			Wit	W	Teen	Bruin	Br	
			Grijs	Gi				
<b>Opmerking:</b>		Uit de vorige proeven is gebleken dat de sterkte van de teen een zeer grote invloed heeft op het bezwijkgedrag van de golfbreker. Door wegspoeling van materiaal uit de teen verloren de bruine elementen van de bovenste 'armour layer' immers hun houvast, waardoor de bovenste lagen ook makkelijker af konden schuiven. Daarom is er gekozen om de teen versterkt uit te voeren. Over de teen is een enkele laag breuksteen aangebracht met de wijde gradering.						
$H_s$ (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L	M	R	L	M	R	
0,115	5		2B,3G,3Gi					
	23		1B,4G			1B		
0,138	15		1Br,3B,3G					
0,149	15		2B,1G,2Gi					
0,155	10		4B,1Gi					
	20		1B,4G,3Gi			1B		
0,159	15		1B,3Gi					
0,166			1B,1Gi			1Gi		5G,3Gi,3W,4Gr, 5R
Schuiven				Verplaatsen				
R	5	G	5	R	0	G	0	
Gr	4	B	0	Gr	0	B	2	
W	3	Br	0	W	0	Br	0	
Gi	3	Totaal	20	Gi	1	Totaal	3	
<b>Beschrijving</b>	De berm blijkt voldoende stevig. De constructie is niet bezwaken. Zie de foto's III.11 t/m III.12.							

<b>Experiment:</b>		<b>K0.3t</b>						
<b>Armourement:</b>		Kubus		cotan $\alpha$ :	1,5	$n_v$ :	0,3	
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)		Kruin	Roze	R	SWL	Geel	G	
			Groen	Gr		Blauw	B	
			Wit	W	Teen	Bruin	Br	
			Grijs	Gi				
<b>Opmerking:</b>								
$H_s$ (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L	M	R	L	M	R	
0,115	10		1G					
0,138	15		1Gi					
0,149	15		1B					
0,155								
0,159	5		1G			1B		
0,166								
0,175	25						1G,1Gi,2W	
Schuiven				Verplaatsen				
R	0	G	1	R		G	0	
Gr	0	B	0	Gr		B	1	
W	2	Br	0	W		Br	0	
Gi	1	<b>Totaal</b>	4	Gi		<b>Totaal</b>	1	
<b>Beschrijving</b>		De constructie is niet bezwaken. Zie de foto's III.13 t/m III.14.						

<b>Experiment:</b>	<b>K0.25t</b>						
<b>Armourelement:</b>	Kubus	cotan $\alpha$ :		1,5	$n_v$ :	0,25	
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)	Kruin	Roze	R	SWL	Geel	G	
		Groen	Gr		Blauw	B	
		Wit	W	Teen	Bruin	Br	
		Grijs	Gi				
<b>Opmerking:</b>							
<b>H<sub>s</sub>(m)</b>	<b>t(min)</b>	<b>Rocken</b>			<b>Verplaatsen</b>		<b>Schuiven</b>
		<b>L</b>	<b>M</b>	<b>R</b>	<b>L</b>	<b>M</b>	<b>R</b>
0,115	5	1B,1G					
0,138	8	3B,1G,1Gi				1B	
	22	2B,1G,1Gi	1B			2B	
0,149	10		2G,3B			1B,2G	
0,155	25	3Br,1G,1Gi	4B			1Br,1B	
0,159	25	3Br,1G,1Gi	4B				
0,166	28	1G,1Gi	2B,2G			1B,1G	
0,175	28		3Br,1B,4Gi			3Gi	5G,4Gi
0,18	12	2G,2Gi	4Gi,3W				1Gi,3W
<b>Schuiven</b>				<b>Verplaatsen</b>			
R	0	G	5	R	0	G	3
Gr	0	B	0	Gr	0	B	6
W	3	Br	0	W	0	Br	1
Gi	5	<b>Totaal</b>	13	Gi	3	<b>Totaal</b>	13
<b>Beschrijving</b>	<p>De elementen worden er duidelijk uitgezogen (gelift). Dit is kenmerkend voor dichte pakkingen. De 'armour layer' begint zich als een bekleding te gedragen. Het bij eerdere proeven geconstateerde fenomeen van afschuiven is ook hier zichtbaar. Het wegdrukken van bruine elementen is zichtbaar, alleen is in dit geval de teen voldoende sterk. Er is sprake van een duidelijke zakking van de banden in het midden. Bij wegslaan elementen is er duidelijk sprake van uplift (kenmerkend voor bekledingen) en als er eenmaal gaten zijn, zijn de bovengelegen elementen snel het slachtoffer van afschuivingen (door gebrek aan ruwheid tussen de twee toplagen). De constructie is niet bezwaken.</p> <p>Zie de foto's III.15 t/m III.16.</p>						

<b>Experiment:</b>		<b>HerK0.4t</b>						
<b>Armourement:</b>		Kubus		cotan $\alpha$ :	1,5	$n_v$ :	0,4	
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)		Kruin	Roze	R	SWL	Geel	G	
			Groen	Gr		Blauw	B	
			Wit	W	Teen	Bruin	Br	
			Grijs	Gi				
<b>Opmerking:</b>								
$H_s$ (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L	M	R	L	M	R	
0,107	5	1G	1G	2G				
	20	1Br,1B,1G	1G					5G,3Gi
0,115	8		1B,1Gi					
	25	4B,1G,1Gi	1B,2G	2G				
0,129	10	4B,3G,1Gi	4G,1W	2G				
0,138	5	1B,1G	1B,6G,1Gi	1G				1Gi,1W
0,149	25	2B,4G	1G	1B		1B		1G
0,155	1	1B,4G	1B,2G,2Gi					
0,159	1	1B,3G	2G,1W	2B				
0,166	25	1Br,5B,3G	3B,1W	2B,2G				
0,175	15	5B,3G	1Br,5B,2Gi, 2W	2B	1B	1G		
	28	2Br,3Gi	2Br,10B	1Gr		1B,2G	1G	4B,3G,5Gi,2W, 6Gr
<b>Schuiven</b>				<b>Verplaatsen</b>				
R	0	G	9	R	0	G	4	
Gr	6	B	4	Gr	0	B	3	
W	3	Br	0	W	0	Br	0	
Gi	9	<b>Totaal</b>	31	Gi	0	<b>Totaal</b>	7	
<b>Beschrijving</b>	<p>Links is er duidelijk sprake van afschuiven. Met elke golf rollen veel bovenliggende kubussen omlaag.</p> <p>Achteraf is er sprake van een gat tussen geel en blauw, waar de tweede 'armour layer' zichtbaar is. Er is een groot gat in grijs van links tot midden. Filter is een beetje zichtbaar. Wit helt over naar grijs.</p> <p>Er is een groot gat in grijs en bovenkant geel rechts van midden. In groen is een gat waardoor het filter zichtbaar is. De constructie is bezwaken.</p> <p>Zie de foto's III.17 t/m III.18.</p>							



<b>Experiment:</b>		<b>HerK0.3t</b>						
<b>Armourement:</b>		Kubus		cotan $\alpha$ :	1,5	$n_v$ :	0,3	
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)		Kruin	Roze	R	SWL	Geel	G	
			Groen	Gr		Blauw	B	
			Wit	W	Teen	Bruin	Br	
			Grijs	Gi				
<b>Opmerking:</b>								
$H_s$ (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L	M	R	L	M	R	
0,115	15			1Br,1B				
0,129	15		1B,1G	2B				
0,138	15		1B,1G	4B				
0,149	15			3B				
0,155	15		1G			1B		
0,159	10		1B,1G	4B,2G,2Gi				
0,166	27	4B	4B,2G	4B,2G	1B	1B	1B	
0,175	2		2G	2G		1B	2G,2W	
Schuiven				Verplaatsen				
R	0	G	2	R	0	G	0	
Gr	0	B	0	Gr	0	B	5	
W	2	Br	0	W	0	Br	0	
Gi	0	<b>Totaal</b>	4	Gi	0	<b>Totaal</b>	5	
<b>Beschrijving</b>	<p>Na afloop is blauw links van het midden los gepakt. Rechts van het midden is blauw los gepakt. De rest van blauw is compact. Links van het midden is er een gat in geel als gevolg van het zakken van de 'armour layer' elementen. Rechts van het midden is geel zeer los gepakt. Gaten in de bovenste 'armour layer'. Rechts boven deze gaten in geel is een gat in de grijze band. De constructie is niet bezwaken.</p> <p>Zie de foto's III.19 t/m III.20.</p>							

<b>Experiment:</b>	<b>HerK0.25t</b>						
<b>Armourement:</b>	Kubus		cotan $\alpha$ :	1,5	$n_v$ :	0,25	
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)	Kruin	Roze	R	SWL	Geel	G	
		Groen	Gr		Blauw	B	
		Wit	W	Teen	Bruin	Br	
		Grijs	Gi				
<b>Opmerking:</b>							
<b>H<sub>s</sub>(m)</b>	<b>t(min)</b>	<b>Rocken</b>			<b>Verplaatsen</b>		<b>Schuiven</b>
		<b>L</b>	<b>M</b>	<b>R</b>	<b>L</b>	<b>M</b>	<b>R</b>
0,115	10		2Br				
0,129	15		2Br	2B			
0,138	15		1Br	3B			
0,149	15		2Br	3B			
0,155	15			2Br,3B	1Br		
0,159	12	1Br	1Gi	2Br,3B,1G			
0,166	15	1Br,1B		4Br,2B,2G		2B	1G
0,175	28		5G,3B				1B,3G,1Gi,7W, 4Gr
<b>Schuiven</b>				<b>Verplaatsen</b>			
R	0	G	4	R	0	G	0
Gr	4	B	1	Gr	0	B	2
W	7	Br	0	W	0	Br	1
Gi	1	<b>Totaal</b>	17	Gi	0	<b>Totaal</b>	3
<b>Beschrijving</b>	Na afloop is geel erg losgepakt. De constructie is niet bezwaken. Soms ziet men dat een element in één keer wordt uitgedrukt bij het neerkomen van een collapsing golf.						
	Zie de foto's III.21 t/m III.22.						

<b>Experiment:</b>		<b>T0.4t</b>						
<b>Armourement:</b>		Tetrapode		cotan $\alpha$ :	1,5	$n_v$ :	0,4	
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)		Kruin	Roze	R	SWL	Geel	G	
			Groen	Gr		Blauw	B	
			Wit	W	Teen	Bruin	Br	
			Grijs	Gi				
<b>Opmerking:</b>								
$H_s$ (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L	M	R	L	M	R	
0,0671								
0,0966								
0,107	15		1G,1Gi					
0,115	10		4G					
	25		4G,5Gi,6W		1G			
0,129	25		2G,2Gi,1W				8Gi,4W,2Gr	
0,138	28		2G,6Gi		1G		3B,3G,3Gi,2W, 2Gr	
Schuiven				Verplaatsen				
R	0	G	3	R	0	G	2	
Gr	4	B	3	Gr	0	B	0	
W	6	Br	0	W	0	Br	0	
Gi	11	<b>Totaal</b>	<b>27</b>	Gi	0	<b>Totaal</b>	<b>2</b>	
<b>Beschrijving</b>	<p>Tijdens <math>H_s=0,115</math>m is grijs duidelijk omlaag gezakt. Ook wit is omlaag gezakt. Gat met filter zichtbaar in de gele en de grijze band.</p> <p>Veel zakking van de banden als gevolg van herschikkingen.</p> <p>Na afloop is er sprake van een groot gat in grijs. Filter wordt hier aangevallen. Er is een groot gat in groen. Wit en groen zijn erg los gepakt. De onderste 'armour layer'banden zijn erg compact. Alle banden hellen over naar beneden.</p> <p>De constructie is bezweken bij <math>H_s = 0,138</math>m.</p> <p>Zie de foto's III.23 t/m III.24.</p>							

<b>Experiment:</b>		<b>T0.3t</b>						
<b>Armourellement:</b>		Tetrapode		cotan $\alpha$ :	1,5	$n_v$ :	0,3	
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)		Kruin	Roze	R	SWL	Geel	G	
			Groen	Gr		Blauw	B	
			Wit	W	Teen	Bruin	Br	
			Grijs	Gi				
<b>Opmerking:</b>								
$H_s$ (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L	M	R	L	M	R	
0,0872								
0,0966								
0,107	10		1B					
0,115	25		2B,1G					
0,129	20		4G					
0,138	20		2B,4G			1G		
	27		1B,8G,2Gi			3G		
Schuiven				Verplaatsen				
R	0	G	0	R	0	G	4	
Gr	0	B	0	Gr	0	B	0	
W	0	Br	0	W	0	Br	0	
Gi	0	<b>Totaal</b>	0	Gi	0	<b>Totaal</b>	4	
<b>Beschrijving</b>	<p>Na afloop van de serie is er sprake van een flink gat in geel.  Filtermateriaal spoelt van onder grijs door het gat in geel weg. Het gevolg is een holle ruimte onder grijs. Grijs wordt eigenlijk ondermijnd. De grijze band zelf is echter nog intact.  Er is sprake van een vrij subtiele methode van bezwijken. Toen het gat net ontstond en vrij klein was, was er aan het oppervlak was vrijwel niets te zien. Er waren nog geen gele elementen weggespoeld. Toch werd toen al grijs volledig ondermijnd door uitspoeling filter. Uit latere proeven blijkt dit ook. Tetrapoden lijken ongeschikt als enkellaags element. Al vanaf het begin spoelen elementen van het filter niet uit de constructie, maar door de constructie van hogere delen naar beneden. Er is immers erg veel ruimte tussen tetrapoden, vanwege hun vorm.  In de holle ruimte onder grijs is zelfs de kern zichtbaar.  Geen zakking van banden, zoals bij de serie met plaatsingsdichtheid 0,4&gt; Alleen geel steunt flink op blauw.  De constructie is bezweken bij <math>H_s=0,138m</math>.</p> <p>Zie de foto's III.25 t/m III.26.</p>							

<b>Experiment:</b>		<b>T0.25t</b>						
<b>Armourement:</b>		Tetrapode		cotan $\alpha$ :	1,5	$n_v$ :	0,25	
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)		Kruin	Roze	R	SWL	Geel	G	
			Groen	Gr		Blauw	B	
			Wit	W	Teen	Bruin	Br	
			Grijs	Gi				
<b>Opmerking:</b>								
$H_s$ (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L	M	R	L	M	R	
0,0872								
0,0966								
0,107								
0,115								
0,129								
0,138	20		2G					
0,149	20		2G			1G		
0,155	25					1B	1G	
0,159	15		2G					
0,166	28		4B,8G			1B,1G		
Schuiven				Verplaatsen				
R	0	G	1	R	0	G	2	
Gr	0	B	0	Gr	0	B	2	
W	0	Br	0	W	0	Br	0	
Gi	0	<b>Totaal</b>	1	Gi	0	<b>Totaal</b>	4	
<b>Beschrijving</b>	<p>Merkbaar dat er een erg goede inhaking is.</p> <p>Het is duidelijk hoe filtermateriaal onder grijs vandaan komt en naar de gaten in geel rolt. Er is geen sprake van echte uitspoeling, maar wel van een ondermijning van grijs.</p> <p>Er is heel veel beweging bij blauw en geel in het midden.</p> <p>Na afloop is er sprake van een gat tussen geel en grijs. Veel filtermateriaal is er uitgespoeld naar blauw en geel.</p> <p>De constructie is bezweken bij <math>H_s=0,166m</math>.</p> <p>Zie de foto's III.27 t/m III.28.</p>							



<b>Experiment:</b>		<b>HerT0.25t</b>						
<b>Armourelement:</b>		Tetrapode		cotan $\alpha$ :		1,5	$n_v$ :	0,25
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)		Kruin	Roze	R	SWL	Geel	G	
			Groen	Gr		Blauw	B	
			Wit	W	Teen	Bruin	Br	
			Grijs	Gi				
<b>Opmerking:</b>								
$H_s$ (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L	M	R	L	M	R	
0,0872								
0,0966								
0,107								
0,115								
0,129	1		1G					
0,138	12		2B,1G					
0,149	20		1G			1G		
0,155	25		2B,5G,1Gi			1B,1G		
0,159	10		1B,1Gi	5G		1B	1G	
	20		1Gi	2B,5G			1G	1G,3Gi,1W
<b>Schuiven</b>				<b>Verplaatsen</b>				
R	0	G	1	R	0	G	4	
Gr	0	B	0	Gr	0	B	2	
W	1	Br	0	W	0	Br	0	
Gi	3	<b>Totaal</b>	5	Gi	0	<b>Totaal</b>	6	
<b>Beschrijving</b>	<p>Na afloop van <math>H_s=0,115</math>m is er links in blauw ophoping van filtermateriaal te zien, afkomstig van onder geel. Het vermoeden bestaat dat zelfs zonder beweging van de tetrapoden de golven het filter kunnen bewerken. Er is bij tetrapoden immers teveel ruimte tussen en onder de elementen als gevolg van hun vorm.</p> <p>Na afloop is er een spleet in de groene laag ontstaan als gevolg van zakking. Schadeproces: Stijgende golf slaat steen voldoende los. Terugkomende golf neemt hem mee. De constructie is bezweken bij <math>H_s=0,159</math>m.</p> <p>Zie de foto's III.29 t/m III.30.</p>							

<b>Experiment:</b>		<b>B0.3t</b>						
<b>Armoureelement:</b>		Breuksteen		cotan $\alpha$ :		1,5		
				n <sub>v</sub> :		0,3		
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)		Kruin	Roze	R	SWL	Geel	G	
			Groen	Gr		Blauw	B	
			Wit	W	Teen	Bruin	Br	
			Grijs	Gi				
<b>Opmerking:</b>								
H <sub>s</sub> (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L	M	R	L	M	R	
0,0671								
0,0872	10	1G	2G					
0,0966	15		3G	1G	1G		1G	
	24	1B,1G	4G		1B	1G		
0,107	6	2G	2G		1G			
	25	4G	4G,2Gi			4G	5Gi,1W	
0,115	5	4G	4G,2Gi		8G,10Gi, 12W,5Gr, 1R	3B,11G,8Gi ,7W,4Gr	2B,8G,2Gi 1Gi,8W,3Gr,2R	
<b>Schuiven</b>				<b>Verplaatsen</b>				
R	2	G	0	R	0	G	35	
Gr	3	B	0	Gr	9	B	6	
W	9	Br	0	W	19	Br	0	
Gi	6	<b>Totaal</b>	20	Gi	20	<b>Totaal</b>	89	
<b>Beschrijving</b>	<p>Na 5 minuten bij H<sub>s</sub>=0,115m bezwijkt de constructie. De 'armour layer' verliest zijn stabiliteit en schuift ineens massaal af.</p> <p>Na afloop is er sprake van veel uitgespoeld filtermateriaal op bruin en blauw. Er is een enorm gat in grijs, wit en groen.</p> <p>Zie de foto's III.31 t/m III.33.</p>							

<b>Experiment:</b>		<b>BAt</b>						
<b>Armourement:</b>		Breuksteen		cotan $\alpha$ :	1,5	$n_v$ :	0,3	
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)		Kruin	Roze	R	SWL	Geel	G	
			Groen	Gr		Blauw	B	
			Wit	W	Teen	Bruin	Br	
			Grijs	Gi				
<b>Opmerking:</b>		De elementen zijn grotendeels rechtop geplaatst.						
$H_s$ (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L	M	R	L	M	R	
0,0872	4		1G			1G		
	16			1B,1G				
0,0966	10	1G	1Gi	2G				
	23			4G			2G	
0,107	4	1G	1G	4G,3W	1G		3G	
	23		4G,2Gi	1Gi	2G		2Gi	
0,115	6	1G	3G	1B,2G,3Gi		1G	2G	
	23	1Gi	4G,1Gi	4G,1Gi	1G	1G	8Gi,1W	
0,129	8		2G,1Gi	1G,1Gi		2G	4G	
	25	3G	1Gi,2W	2Gi	1G	1B,1G,1Gi	2Gi	
0,138	15	1Gi	1Gi	1Gi,2W	1B,2G,2Gi, 1W	1W	1Gi	
				1G	6G,5Gi,4W ,1Gi	9Gi,4W,2Gr	5G,5Gi,2W	
<b>Schuiven</b>				<b>Verplaatsen</b>				
R	0	G	0	R	0	G	37	
Gr	0	B	0	Gr	2	B	2	
W	11	Br	0	W	12	Br	0	
Gi	16	<b>Totaal</b>	27	Gi	22	<b>Totaal</b>	75	
<b>Beschrijving</b>	<p>De methode A plaatsing heeft duidelijk een beter zelfherstellend vermogen. De gaten in geel zijn weer dicht. Door hun rechtopstaande plaatsing kunnen ze na het verdwijnen van enkele elementen deze ruimte opvullen door horizontaal te gaan liggen. Ze kunnen een groter oppervlak bedekken. Er is sprake van een constante opvulling van gaten door omvallende elementen.</p> <p>Tijdens <math>H_s=0,129</math>m verdwijnen de gaten in geel omdat grijs plat gaat liggen. De grijze band is twee keer zo breed geworden als gevolg hiervan. Het zelfherstel ziet er goed uit. Toch kan de golfbreker na deze golf als bezweken worden beschouwd, gezien de ruimte die nu aanwezig is tussen de stenen.</p> <p>Bij <math>H_s=0,138</math>m zijn er constant teveel gaten. Deze gaten worden telkens opgevuld terwijl andere elementen weg worden geslagen. Als gevolg hiervan zijn er telkens gaten op andere plekken. De opvulling door vallende elementen kan het aantal gaten niet meer bijhouden, zodat het filter nu kan worden aangetast.</p> <p>Na afloop is er sprake van veel uitgespoeld filtermateriaal op blauw. De gele band is praktisch weg links en rechts naast het midden. In de gaten in geel is het filter duidelijk aangetast. Er zijn gaten in grijs en wit. De groene band is duidelijk gezakt. De elementen zijn losser gepakt. Bruin, blauw en roze zijn zo goed als intact.</p> <p>De constructie is bezweken bij <math>H_s=0,138</math>m.</p> <p>Zie de foto's III.34 t/m III.36.</p>							

<b>Experiment:</b>		<b>BBt</b>						
<b>Armourelement:</b>		Breuksteen		cotan $\alpha$ :	1,5	$n_v$ :	0,3	
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)		Kruin	Roze	R	SWL	Geel	G	
			Groen	Gr		Blauw	B	
			Wit	W	Teen	Bruin	Br	
			Grijs	Gi				
<b>Opmerking:</b>		De elementen zijn grotendeels plat geplaatst.						
$H_s$ (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L	M	R	L	M	R	
0,0671	15	1G						
0,0872	4	1G	4G,2Gi			3G	1Gi	
		1G	1Gi,1G	1G	1Gi	1G	1G	
0,0966	8	1G	1G,5Gi	1G		10G,16Gi,1 4W,6Gr	1Gi,5W,3Gr	
Schuiven				Verplaatsen				
R	0	G	0	R	0	G	15	
Gr	3	B	0	Gr	6	B	0	
W	5	Br	0	W	14	Br	0	
Gi	4	<b>Totaal</b>	12	Gi	17	<b>Totaal</b>	52	
<b>Beschrijving</b>		<p>Tijdens <math>H_s=0,0872m</math> vindt er inzakking in het midden plaats. Het filter wordt hier al aangevallen. Na afloop van deze golf zijn er twee gaten in geel, links en rechts van het midden. Grijs is losser gepakt boven het linkergat. Ook wit zakt hier omlaag. De constructie is bezwaken.</p> <p>Bij <math>H_s=0,0966m</math> stort de gehele 'armour layer' na 8 minuten in. Vele afschuivingen vinden plaats. Na afloop zijn in het midden van de gele, grijze, witte en groene band alle elementen praktisch weg. Er is een groot open gat in het midden van wit en groen. Het filtermateriaal hoopt zich op in blauw en geel. Bruin, blauw en roze zijn nog volledig intact. De constructie is bezwaken.</p> <p>Zie de foto's III.37 t/m III.38.</p>						

<b>Experiment:</b>		<b>B0.3T12</b>						
<b>Armourelement:</b>		Breuksteen		cotan $\alpha$ :	2	$n_v$ :	0,3	
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)		Kruin	Lichtgeel	LG	SWL	Grijs	Gi	
			Blauw	B		Geel	G	
			Roze	R		Blauw	B	
			Groen	Gr	Teen	Bruin	Br	
			Wit	W				
<b>Opmerking:</b>								
$H_s$ (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L	M	R	L	M	R	
0,0872	1		3Gi,1W	2G				
0,0966	13	1Gi	3G,1Gi,1W	1G		1Gi		
0,107	16		5G,1Gi,3W	1Gi	1G	4G	1G	
	25	1Gi	8G,3Gi,3W	3G		1G		
0,115	7	1Gi,1W	6G,2Gi,1W	2G		2G	1G	
	17	1Gi,1W	5W	1Gi,1W		1G,3Gi	1G,1Gi	
	25	1Gi,4W	8G,3Gi,6W	1Gi,2W		1G	1G,2Gi	3G,15Gi,12W,2Gr
<b>Schuiven</b>				<b>Verplaatsen</b>				
LG	0	Gi	15	LG	0	Gi	7	
B	0	G	3	B	0	G	14	
R	0	B	0	R	0	B	0	
Gr	2	Br	0	Gr	0	Br	0	
W	12	<b>Totaal</b>	<b>32</b>	W	0	<b>Totaal</b>	<b>21</b>	
<b>Beschrijving</b>	<p>De grijze en de witte band zakken geleidelijk in. Sommige blauwe elementen worden door de druk van de bovengelegen lagen iets uitgedrukt.</p> <p>Na afloop zijn er gaten in grijs, in wit en vooral in groen. Groen is heel los gepakt. Filterlaag onder groen en wit wordt aangevallen.</p> <p>De constructie is bezweken bij <math>H_s=0,115</math> m.</p> <p>Zie de foto's III.39 t/m III.40.</p>							



<b>Experiment:</b>		<b>BAT12</b>						
<b>Armourelement:</b>		Breuksteen		cotan $\alpha$ :	2	n <sub>v</sub> :	0,3	
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)		Kruin	Lichtgeel	LG	SWL	Grijs	Gi	
			Blauw	B		Geel	G	
			Roze	R		Blauw	B	
			Groen	Gr	Teen	Bruin	Br	
			Wit	W				
<b>Opmerking:</b>		Voor de plaatsing is methode A toegepast. De stenen zijn grotendeels rechtop geplaatst.						
H <sub>s</sub> (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L	M	R	L	M	R	
0,0872	1		1G					
	15							
0,0966	1	1Gi	1Gi					
	15	1Gi			1Gi			
0,107	4	1Gi,1G	3G,1Br					
	22	1Gi,1G	1G,1Br					
0,115	1	2G,1Gi	4G,1Gi					
	10		5G,2Gi,1W			1G		
	18	2G,1Gi	2G,3Gi			2G,1Gi		
	25		6G,7Gi,1W		1G	3G,1Gi,		9Gi
0,129	5	1G,1Gi	3G,1W,1Gi		1Gi			
	10		5Gi,3W,4G		1Gi	2Gi		
	20		2G,4Gi,1W, 1B		2Gi,1G	2Gi,1B		4Gi,13G,4W
0,138	4	1G,1Gi	4G,1Gi,1W		2Gi	2G,1Gi	1Gi	
	12	1B	1G,3Gi,1W			1Gi	1Gi	
	25	1W	4Gi,4W		2Gi,1W	1G,2Gi		5W
0,149	1	1W	1G,3Gi,2W	2Gi	1W	1Gi		
	20	3W	4W,1Gr		2Gi,3W	2Gi	2W	6W,3Gr
0,155	20	4W,1Gr	4G,1Gi,4W		1G,2W	2G,4Gi,1W		7Gi,9W,3Gr
Schuiven				Verplaatsen				
LG	0	Gi	20	LG	0	Gi	30	
B	0	G	13	B	0	G	14	
R	0	B	0	R	0	B	1	
Gr	6	Br	0	Gr	0	Br	0	
W	24	<b>Totaal</b>	63	W	10	<b>Totaal</b>	55	
<b>Beschrijving</b>	<p>Collapsing golven zorgen voor de meeste schade. Een collapsing golf kan een gehele laag doen roken. De collapsing golf schudt de laag los, waarna surging golven de elementen eenvoudig mee kunnen nemen. In dit geval neemt de teruglopende golf de elementen mee. Als gevolg van de gebruikte plaatsingsmethode vindt er zelfherstel plaats. Daar waar elementen verdwijnen gaan de rechtopstaande elementen platliggen en op deze wijze worden ontstane gaten snel hersteld. Collapsing golven drukken ook de elementen uit. Zichtbaar is dat de onderste lagen samengedrukt worden. Elementen verdwijnen hier door uitdrukking. Omdat deze samengedrukte elementen elkaar ook weer tegenhouden wordt dit weer beperkt.</p> <p>Uiteindelijk gaten in 'armour layer' in de banden wit, grijs, groen en roze. De gaten verschuiven naar een steeds hogere positie. Ze ontstaan rond de waterlijn, maar door omvallen van de elementen en het zakken van de elementen schuiven de gaten geleidelijk naar boven. De bruine en blauwe band zijn nog helemaal intact. Dit geldt ook voor de banden die hoger zijn gelegen dan de roze.</p> <p>De constructie is bezweken bij H<sub>s</sub>=0,155m.</p> <p>Zie de foto's III.41 t/m III.43.</p>							

<b>Experiment:</b>		<b>BBT12</b>						
<b>Armourelement:</b>		Breuksteen		cotan $\alpha$ :	2	$n_v$ :	0,3	
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)		Kruin	Lichtgeel	LG	SWL	Grijs	Gi	
			Blauw	B		Geel	G	
			Roze	R		Blauw	B	
			Groen	Gr	Teen	Bruin	Br	
			Wit	W				
<b>Opmerking:</b>		Voor de plaatsing is methode B toegepast. De stenen zijn grotendeels plat geplaatst.						
$H_s$ (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L	M	R	L	M	R	
0,0671	1			1W				
	14			1Gi				
0,0872	5	2G,1Gi	2G	1Gi			1Gi	
	22	2G,1Gi	1G,3Gi,1W	1G,1Gi	1Gi			
0,0966	2	1W	3G,2Gi,2W	1Gi	1G			
	7	1W	1G,1W	1W	2G,1Gi	2G,2Gi		
	17		1G,8Gi,1W	1W	3Gi,1W	2G,2Gi,2Gr		10Gi,9w
Schuiven				Verplaatsen				
LG	0	Gi	9	LG	0	Gi	10	
B	0	G	0	B	0	G	7	
R	0	B	0	R	0	B	0	
Gr	0	Br	0	Gr	2	Br	0	
W	10	<b>Totaal</b>	19	W	1	<b>Totaal</b>	20	
<b>Beschrijving</b>	<p>Al tijdens <math>H_s = 0,0872m</math> is de constructie bezwaken (na 12 minuten). Er zijn dan grote gaten in wit ontstaan. Collapsing golven zijn het schadelijkst. De onderste lagen worden opgestuwd, iedere keer dat er een collapsing golf optreedt. De elementen in de gele en de grijze laag komen als gevolg hiervan rechtop te staan. Dit, in combinatie met het wegslaan van elementen, zorgt al snel voor inzakking van volledige lagen, omdat er veel extra ruimte ontstaat. Bovendien is er nu geen zelfherstel mogelijk, aangezien alle elementen plat liggen.</p> <p>Uiteindelijk zijn er grote gaten in geel, grijs en wit.</p> <p>Zie de foto's III.44 t/m III.45.</p>							

<b>Experiment:</b>		<b>Her1B0.3T12</b>						
<b>Armourelement:</b>		Breuksteen		cotan $\alpha$ :	2	n <sub>v</sub> :	0,3	
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)		Kruin	Lichtgeel	LG	SWL	Grijs	Gi	
			Blauw	B		Geel	G	
			Roze	R		Blauw	B	
			Groen	Gr	Teen	Bruin	Br	
			Wit	W				
<b>Opmerking:</b>								
H <sub>s</sub> (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L	M	R	L	M	R	
0,0872	1	1G	1G	1Br,1B				
	15	1Gi	2G,1Gi,1W	1Gi				
0,0966	1	1Gi	3G,2Gi	1B,1Gi	1Gi			
	6	3G,1Gi,2W	3G		1G			
	20	1G	5G,4Gi			1G		2Gi
0,107	4	1G,1W	3G,1Gi	1B,1G,1Gi	1G	2G		
	20	3W	2G,1Gi,2W	1G,4Gi,1W	2G,2Gi,1W	2G,2Gi	3Gi	6W,3Gr
0,115	5	1G,2W	2G	3Gi	2Gi	1B,1G		
					2G,6Gi,8W, 2Gr	6G,5Gi,1B, 8W,4Gr	3G,1Gi,4W, 2Gr	12G,17Gi,12W, 5Gr
<b>Schuiven</b>				<b>Verplaatsen</b>				
LG	0	Gi	19	LG	0	Gi	22	
B	0	G	12	B	0	G	21	
R	0	B	0	R	0	B	2	
Gr	8	Br	0	Gr	8	Br	0	
W	18	<b>Totaal</b>	<b>57</b>	W	21	<b>Totaal</b>	<b>74</b>	
<b>Beschrijving</b>	<p>Collapsing golven zijn het ergst. Compactie lagere lagen. Hogere lagen zakken in. Zo kunnen er hele losse pakkingen ontstaan in hoger gelegen lagen, terwijl er nog geen enkel element is weggeslagen.</p> <p>Na H<sub>s</sub> = 0,107m is de constructie al bezweken. Gaten met name in wit en groen. Grijs is erg losgepakt. Na de volgende golfserie is het gat in groen en wit erg groot en is de filterlaag al aangetast.</p> <p>Zie de foto's III.46 t/m III.48.</p>							

<b>Experiment:</b>		<b>Her2B0.3T12</b>						
<b>Armourelement:</b>		Breuksteen		cotan $\alpha$ :	2	$n_v$ :	0,3	
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)		Kruin	Lichtgeel	LG	SWL	Grijs	Gi	
			Blauw	B		Geel	G	
			Roze	R		Blauw	B	
			Groen	Gr	Teen	Bruin	Br	
			Wit	W				
<b>Opmerking:</b>								
$H_s$ (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L	M	R	L	M	R	
0,0872	15	1B,1G	2G,4Gi,1W	1Gi				
0,0966	1	2B,2Gi	2Gi	1Gi			1G	
	20	1B	3G,5Gi,1W	2G,1Gi,2W				
0,107	25	1B	3G,5Gi,1W	2G,1Gi,2W	2G	4G,2Gi	1G,1W	
0,115	10	2Gi,1W,1Gr	1B,2W,1Gr	1G,2Gi		2G,3Gi,1W		
	20	3G,1W,3Gr	5G,6W,3Gr	2G,3W,3Gr	1G,2Gi,2W	5Gi,3W,1Gr	1G,3Gi	
<b>Schuiven</b>				<b>Verplaatsen</b>				
LG	0	Gi	21	LG	0	Gi	15	
B	0	G	3	B	0	G	12	
R	0	B	0	R	0	B	0	
Gr	13	Br	0	Gr	1	Br	0	
W	14	<b>Totaal</b>	51	W	7	<b>Totaal</b>	35	
<b>Beschrijving</b>	Met name het midden is aangetast. De resterende gele elementen zijn zeer compact, maar rocken wel erg veel. Ze zijn rechtop gestuwd. Grijs is los gepakt. Wit is heel erg los gepakt. Grote gaten zijn aanwezig in de groene band. Filter wordt aangetast en filterelementen zijn zich aan het ophopen in geel. De constructie bezwijkt bij $H_s=0,115$ m.							
	Zie de foto's III.49 t/m III.50.							

<b>Experiment:</b>		<b>Her3B0.3T12</b>						
<b>Armourement:</b>		Breuksteen		cotan $\alpha$ :	2	$n_v$ :	0,3	
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)		Kruin	Lichtgeel	LG	SWL	Grijs	Gi	
			Blauw	B		Geel	G	
			Roze	R		Blauw	B	
			Groen	Gr	Teen	Bruin	Br	
			Wit	W				
<b>Opmerking:</b>								
<b>H<sub>s</sub>(m)</b>	<b>t(min)</b>	<b>Rocken</b>			<b>Verplaatsen</b>			<b>Schuiven</b>
		<b>L</b>	<b>M</b>	<b>R</b>	<b>L</b>	<b>M</b>	<b>R</b>	
0,0872	7		1G,2Gi,1W	1G				
0,0966	16		1G,2W	1G				
	25	1G	1B,2W	1G,1Gi	1Gi			
0,107	5	2Gi	1B,1W	1G,1Gi,1W	2G			
	25	2Gi	5W	1W	1G,2Gi		1Gi	3Gi,2Gr
0,115	5	2G	4G,4Gi,5W	2G		2G,1Gi	1W	
		1Gi	2B,4G,4Gi,4W	1Gi,2W	2G,2Gi	2G,6Gi,1W	1G,3Gi	2G,10Gi,17W,3Gr,1R
<b>Schuiven</b>				<b>Verplaatsen</b>				
LG	0	Gi	13	LG	0	Gi	16	
B	0	G	2	B	0	G	10	
R	1	B	0	R	0	B	0	
Gr	5	Br	0	Gr	0	Br	0	
W	17	<b>Totaal</b>	<b>38</b>	W	2	<b>Totaal</b>	<b>28</b>	
<b>Beschrijving</b>	Grijs en met name wit zijn erg los gepakt. In de witte band zijn enkele gaten. Groen is ook zeer los gepakt met enkele gaten. Het filter wordt aangetast. Ophoping van filtermateriaal is zichtbaar in de gele en grijze band. De constructie bezwijkt bij H <sub>s</sub> =0,115m.							
	Zie de foto's III.51 t/m III.52.							



<b>Experiment:</b>	<b>BW0.3T12</b>							
<b>Armourement:</b>	Breuksteen		cotan $\alpha$ :		2	$n_v$ :	0,3	
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)	Kruin	Lichtgeel	LG	SWL	Grijs	Gi		
		Blauw	B		Geel	G		
		Roze	R		Blauw	B		
		Groen	Gr	Teen	Bruin	Br		
		Wit	W					
<b>Opmerking:</b>	Een breuksteen 'armour layer' met een wijde gradering 1,6 is gebruikt.							
$H_s$ (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L	M	R	L	M	R	
0,0671	5	2W	1Gi	1G			1Gi	
	15	1Gi,1W	1W			1Gi		
0,0872	1	2W	1W		2Gi	1G		
	25	2W	3G,1Gi,4W	1W			1G,1Gi	
0,0966	5		2G,2W		2W	1G,1W	3Gi	
	10	1W	3G,1Gi,1W	1G,2W	1Gi	1Gi	1G	
	25	3G,2Gi,1W	4G,1Gi	1Gi	1G,5Gi	1Gi		
0,107	5	4Gi,3W	6G,5Gi,2W		3Gi		1G	
		2G,1Gi,5W	6G,5Gi,4W	2Gi,1W	2G,5Gi,6W, 2Gr	2G,4Gi,9W, 2Gr	2G,3Gi,7W	2G,17Gi,19W, 18Gr,3R
Schuiven				Verplaatsen				
LG	0	Gi	17	LG	0	Gi	31	
B	0	G	2	B	0	G	11	
R	3	B	0	R	0	B	0	
Gr	18	Br	0	Gr	4	Br	0	
W	19	<b>Totaal</b>	<b>59</b>	W	<b>25</b>	<b>Totaal</b>	<b>71</b>	
<b>Beschrijving</b>	<p>Als er eenmaal een zwak punt ontstaat, spoelen de kleinere elementen heel snel weg. De situatie wordt sneller instabieler dan bij een nauwe gradering.</p> <p>De onderste lagen worden opgestuwd en zijn na afloop erg compact. In grijs zijn gaten in het midden en links. Wit is erg los gepakt. Er is in deze band erg veel ruimte rechts en links. In groen en roze is aan de rechterkant een groot gat. Ook rechts zijn er gaten in groen en wit. Uitgespoelde filterelementen zijn zichtbaar in blauw en geel. De constructie bezwijkt bij <math>H_s=0,107m</math>.</p> <p>Zie de foto's III.53 t/m III.54.</p>							

<b>Experiment:</b>		<b>B0.3T13</b>						
<b>Armourement:</b>		Breuksteen		cotan $\alpha$ :	3	$n_v$ :	0,3	
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)		Kruin	Bruin	Br	SWL	Groen	Gr	
			Wit	W		Wit	W	
			Grijs	Gi		Grijs	Gi	
			Lichtgeel	LG		Geel	G	
			Blauw	B		Blauw	B	
			Roze	R	Teen	Bruin	Br	
<b>Opmerking:</b>								
$H_s$ (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L	M	R	L	M	R	
0,0872	1	2W	1W,1Gr,1R					
0,0966	1	2Gr	1W,2Gr					
0,107	1	2Gr	1W,2Gr					
0,115	10		1G	1Gi	1G			
	20	1Gr	1Gi,2W,2Gr		1Gi	1Gi		
0,129	1	1W,1Gr	2G,2W	1W				
	25		3G,4Gi,2W,1Gr	2G,1Gi		1Gi		
0,138	5	1Gr	2G,2Gi,3W			1Gi	1G,1Gi	
	20	1Gr	4Gr			1G,1Gr	2Gi,6W,2Gr	
0,149	10	2Gr	3G,2W,4Gr,3R	1W		1G,2Gi,1W		
	25	2Gr	3Gi,4Gr		2W	2G,1Gi,2W	1G	
0,155	5	3Gr	6W,5Gr,5R	3W,2Gr		1W		
	25	4Gr,5R	5Gi,5W,10Gr,5R	5Gr,2R	1Gi	2G,1Gi,3W,1Gr	1Gi,1W	
0,159	29	2Gi,1W,5Gr,7R	4Gi,5W,10Gr,7R	4Gi,4W,5Gr,4R	1Gi,2W,1Gr,6R	4Gi,5W,3Gr,5R	1Gi,2W,2Gr,5R	
<b>Schuiven</b>				<b>Verplaatsen</b>				
Br	0	W	23	Br	0	W	19	
W	0	Gi	19	W	0	Gi	17	
Gi	0	G	0	Gi	0	G	9	
LG	0	B	0	LG	0	B	0	
B	2	Br	0	B	0	Br	1	
R	11		0	R	16		0	
Gr	23	<b>Totaal</b>	78	Gr	8	<b>Totaal</b>	70	
<b>Beschrijving</b>	<p>Bij dit flauwe talud is er veel vaker sprake van plunging golven dan van collapsing golven. De collapsing golven die echter nog optreden komen voor ter hoogte van de gele band, dus vrij ver van de SWL vandaan. Geel en grijs worden ook bij dit talud opgestuwd. Veel golven breken voor de golfbreker. Bij dit talud treft men veel schuimende, oplopende golven.</p> <p>Door het flauwe talud gaan rockende stenen minder gemakkelijk weg. Een steen die helemaal los ligt, gaat hier niet per sé weg. Er is geen sprake meer van progressief bezwijkgedrag.</p> <p>Na afloop bevindt er zich links een gat in de witte band. Groen is heel los gepakt en bevat vele gaten. Ook roze is heel los gepakt en bevat grote gaten, met name aan de linkerkant. Er kan getwist worden over het feit of de constructie bij <math>H_s=0,155</math> al niet bezweken is.</p> <p>Zie de foto's III.55 t/m III.57.</p>							

<b>Experiment:</b>		<b>BAT13</b>						
<b>Armourelement:</b>		Breuksteen		cotan $\alpha$ :	3	$n_v$ :	0,3	
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)		Kruin	Bruin	Br	SWL	Groen	Gr	
			Wit	W		Wit	W	
			Grijs	Gi		Grijs	Gi	
			Lichtgeel	LG		Geel	G	
			Blauw	B		Blauw	B	
			Roze	R	Teen	Bruin	Br	
<b>Opmerking:</b>		Voor de plaatsing is methode A toegepast. De elementen zijn grotendeels rechtop geplaatst.						
$H_s$ (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L	M	R	L	M	R	
0,0872	15		2W,2Gr	1W				
0,0966	15	1Gi,1Gr	3W,1Gr	1W				
0,107	8	1Gr	2W,1Gr	1W				
	15	1Gi,1W,1Gr	1Gr	1W				
0,115	15	3Gi,1Gr	1G,1Gi,1W,2Gr	1G,1W				
0,129	5	1Gi	3Gi,1W	1W		1Gi		
0,138	20	1Gi,2Gr	2G	1W,1Gr		1Gi	1G,1W	
0,149	2	2Gr	2G,3Gi,2W	1G,1W	1Gi	1G	2W	
	24	1W	3Gi,2W,2Gr	1G	1Gi,1W	1G,1W		
0,155	6	3Gi,2W,3Gr	3Gi,2Gr	1W	1Gi,1W	2Gi		
	25	1R	1G,2W	4G,1R	1G,2Gi	2G,3Gi	1G,2Gi	4G,7Gi,5W,5Gr
0,159	25	2G,5W,1Gr,1R	5W,5Gr	8Gi,5W,1Gr,1R	1G,2Gi,3W	1G,3Gi,2W,1Gr	2G,2Gi	1G,6Gi,10W,17Gr
0,166		1G,1Gi,2W,4Gr	1G,5W,1Gr,1R	2Gi,4W,1Gr	2Gi,4W,2Gr	6Gi,8W,3Gr	2Gi,3W,2Gr	2G,1Gi,10W,18Gr,8R
Schuiven				Verplaatsen				
Br	0	W	25	Br	0	W	26	
W	0	Gi	14	W	0	Gi	31	
Gi	0	G	7	Gi	0	G	11	
LG	0	B	0	LG	0	B	0	
B	0	Br	0	B	0	Br	0	
R	8			R	0			
Gr	40	<b>Totaal</b>	<b>94</b>	Gr	8	<b>Totaal</b>	<b>76</b>	
<b>Beschrijving</b>	De groupiness van de golven lijkt relevant voor de schadeontwikkeling. Na afloop zijn er gaten in de groene en de roze band. De blauwe band begint enigszins over te hellen naar roze. De constructie bezwijkt bij $H_s=0,166m$ . Zie de foto's III.58 t/m III.59.							

<b>Experiment:</b>		<b>BBT13</b>						
<b>Armourement:</b>		Breuksteen		cotan $\alpha$ :	3	$n_v$ :	0,3	
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)		Kruin	Bruin	Br	SWL	Groen	Gr	
			Wit	W		Wit	W	
			Grijs	Gi		Grijs	Gi	
			Lichtgeel	LG		Geel	G	
			Blauw	B		Blauw	B	
			Roze	R	Teen	Bruin	Br	
<b>Opmerking:</b>		Voor de plaatsing is methode B toegepast. De elementen zijn grotendeels plat neergelegd.						
$H_s$ (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L	M	R	L	M	R	
0,0872	15		1Gi,3Gr					
0,0966	15		1Gi,1Gr					
0,107	15		4Gi,1W,2Gr	2Gi,1W		1G,1Gi	1W	
0,115	10	1Gi,1Gr	1Gi,1W,1Gr	1G,1Gi	2Gi			
	25		3G,1Gi,2W, 2Gr	1B,1G,1Gi, 1W				
0,129	15	1Gi,2W	2Gi,4W,2Gr	2G,2W		2G		
	25	3Gi,1W	2G,2Gi,2W, 6Gr	2G,1Gi,1W			1Gi	
0,138	1	1Gi,1W	3G,2Gi,1W, 3Gr			1Gi		
	20	3Gi,4W	4Gi,4Gr	4W	1Gr	1G,1Gi	1W	
0,149	25	4W,2Gr,2R	2W,6Gr,4R	3Gi,2W,2R	2G,1Gi,1W, 2Gr	2G,3Gi,3W, 7Gr,1R	1G,3Gi,1W, 3Gr	5Gi,8W,4Gr,10R
Schuiven				Verplaatsen				
Br	0	W	28	Br	0	W	7	
W	0	Gi	15	W	0	Gi	13	
Gi	0	G	0	Gi	0	G	9	
LG	0	B	0	LG	0	B	0	
B	0	Br	0	B	0	Br	0	
R	13			R	1			
Gr	12	<b>Totaal</b>	<b>58</b>	Gr	13	<b>Totaal</b>	<b>43</b>	
<b>Beschrijving</b>	<p>Bij dit talud worden elementen vaak weer teruggeslagen op hun plek.</p> <p>Bij <math>H_s=0,138</math>m is de constructie bezwaken na 20 minuten. Er is dan een groot gat in groen ontstaan.</p> <p>Na afloop zijn er enkele gaten in geel. Verder is geel heel erg compact en opgestuwd. Wit is erg ruim gepakt. In groen en roze zijn vele gaten. Het filter is aangetast onder groen en roze.</p> <p>Zie de foto's III.60 t/m III.62.</p>							

<b>Experiment:</b>		<b>Her1B0.3T13</b>						
<b>Armourelement:</b>		Breuksteen		cotan $\alpha$ :	3	$n_v$ :	0,3	
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)		Kruin	Bruin	Br	SWL	Groen	Gr	
			Wit	W		Wit	W	
			Grijs	Gi		Grijs	Gi	
			Lichtgeel	LG		Geel	G	
			Blauw	B		Blauw	B	
			Roze	R	Teen	Bruin	Br	
<b>Opmerking:</b>								
$H_s$ (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L	M	R	L	M	R	
0,0872	15		1Gi,1W,2Gr ,1R	1G,1Gi				
0,0966	5		3W,2Gr	1G,1Gi				
0,107	5	1Gi,1W,2Gr	1B,2G,1R	1G,2Gi				
0,115	5	1G,1Gi,1W	1Gi,1Gr	1G,1Gi,1W				
0,129	15	4Gi	1Gi,3W,1Gr	1B		5G		6G
0,138	25	4Gi,3W	1B,2G,4Gi, 4W,2Gr,1R	1B,1G,3Gi, 1W,1R	1Gi,1W	2G,1W		2G,10Gi
0,149	5	6W	4W,8Gr	5W	1Gi,3W			
	25	3G,1Gi,3W, 1Gr	1Gi,4W,1Gr	3G,2W	1G,1W,1Gr	1G,3Gi,1Gr	1Gi	4G,5Gi,11W,13Gr, 3R
0,155	25	4W,6Gr	4W,5R	3Gr	2G,1Gi,2W, 1Gr	4G,2Gi,3W, 2Gr	1G,1Gi	4G,8Gi,16W,9Gr, 13R,4B
<b>Schuiven</b>				<b>Verplaatsen</b>				
Br	0	W	27	Br	0	W	11	
W	0	Gi	23	W	0	Gi	10	
Gi	0	G	16	Gi	0	G	16	
LG	0	B	0	LG	0	B	0	
B	4	Br	0	B	0	Br	0	
R	16			R	0			
Gr	22	<b>Totaal</b>	<b>98</b>	Gr	5	<b>Totaal</b>	<b>42</b>	
<b>Beschrijving</b>	<p>Geel zakt hier duidelijk bij <math>H_s=0,129</math>m in blauw. Dit gebeurt als gevolg van de schade toegebracht door plunging en collapsing golven op geel.</p> <p>Bij <math>H_s=0,149</math>m is de golfbreker al bezweken. Achteraf zijn wit en groen erg los gepakt. Met name roze is los gepakt en hier bevinden zich ook enkele grote gaten links, midden en rechts.</p> <p>Zie de foto's III.63 t/m III.65.</p>							



Experiment:		Her2B0.3T13						
Armourement:		Breuksteen		cotan $\alpha$ :	3	$n_v$ :	0,3	
Kleurenbanden: (Van kruin tot teen)		Kruin	Bruin	Br	SWL	Groen	Gr	
			Wit	W		Wit	W	
			Grijs	Gi		Grijs	Gi	
			Lichtgeel	LG		Geel	G	
			Blauw	B		Blauw	B	
			Roze	R	Teen	Bruin	Br	
Opmerking:								
$H_s$ (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L	M	R	L	M	R	
0,0872	8		1Gr					
0,0966	5	1Gi,1W		1W				
0,107	5	1Gi,1W	1Gi,1W	2B,1Gr				
	15	1W	2B,1G,2W, 1Gr	1Gr				
0,115	1	2W	1Gi,1W,1Gr	1Gr				
	22	1Gi	2G,6Gi	1B		1Gi		
0,129	1	1W	2G,5Gi,2W	1G				
	8	2W	1B,3G,5Gi, 1Gr	1Gr				
0,138	5	3W	1B,2G,1Gi, 2W,1Gr	1Gi,1Gr	1Gi			
	25	1Gi,1W	1B,2G,4Gi, 1W,2Gr	1W		1Gi	2G,7Gi,10W,5Gr	
0,149	25	2G,1Gi,1Gr	1B,1G,2W, 3Gr	1W,1Gr	3G	1G,1Gi,1W	2Gi,7W,7Gr,3R	
0,155	6	5W,3Gr	6W,4Gr,3R	3R	1Gi	1Gi,1W	1G	
	25	3Gr	3B,7G,2Gi, 6Gr	3Gr	1G,1W,1R	2G,3Gi,1Gr	1G,1Gi,1W	1G,11Gi,8W,16Gr, 7R,2B
Schuiven				Verplaatsen				
Br	0	W	25	Br	0	W	4	
W	0	Gi	20	W	0	Gi	10	
Gi	0	G	3	Gi	0	G	10	
LG	0	B	0	LG	0	B	0	
B	2	Br	0	B	0	Br	0	
R	10			R	1			
Gr	28	Totaal	88	Gr	1	Totaal	26	
Beschrijving	<p>Iedere collapsing golf is in staat om de gele band volledig te doen rocken. Na 20 minuten bij <math>H_s=0,155m</math> is de constructie bezwaken. Bij dit talud is er sprake van opstuwing en opstapeling van de elementen in de gele en de blauwe band. Dit levert extra ruimte op en zodoende zakking van de hogere lagen. Er zijn heel veel plunging golven. Na afloop zijn blauw, geel en grijs erg compact. Wit is vrij ruim gepakt. Groen en roze zijn heel erg ruim gepakt. Veel gaten van midden tot links in deze banden. De hoger gelegen blauwe band neigt tot zakken, maar is nog redelijk intact.</p> <p>Zie de foto's III.66 t/m III.67.</p>							

<b>Experiment:</b>		<b>Her3B0.3T13</b>						
<b>Armourement:</b>		Breuksteen		cotan $\alpha$ :	3	$n_v$ :	0,3	
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)		Kruin	Bruin	Br	SWL	Groen	Gr	
			Wit	W		Wit	W	
			Grijs	Gi		Grijs	Gi	
			Lichtgeel	LG		Geel	G	
			Blauw	B		Blauw	B	
			Roze	R	Teen	Bruin	Br	
<b>Opmerking:</b>								
$H_s$ (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L	M	R	L	M	R	
0,0872	5		2W,1Gr					
0,0966	16	1Gr	1Gi,2W,1Gr				1G	
0,107	1	1Gr	1W,1Gr	1G,1Gr				
	20	1Gi,1Gr	1B,1G,1Gr	1Gr				
0,115	5	2Gi,2W	3W	1Gr				
	18	2Gr	6Gi,7W		1W	1Gi	1Gi	
0,129	11	1B,2W	1G,3Gi,1W, 2Gr	3Gi,1Gr	1B	2G,1Gi		
	25	1G,2Gi	2G,2Gi,8W	1G			2G,4Gi,1W,4Gr	
0,138	15	2Gi,2Gr	2G,2Gi,1W	1G	1G,1Gi	4G,1Gr		
	25	1Gr	1B,4Gi,1W, 2Gr,1R	2G,1W,1Gr, 2R	1Gi	1B,1G,3Gi, 2W	7Gi,12W,10Gr,2R	
Schuiven				Verplaatsen				
Br	0	W	13	Br	0	W	3	
W	0	Gi	12	W	0	Gi	7	
Gi	0	G	0	Gi	0	G	9	
LG	0	B	0	LG	0	B	2	
B	0	Br	0	B	0	Br	0	
R	2			R	0			
Gr	14	<b>Totaal</b>	<b>41</b>	Gr	1	<b>Totaal</b>	<b>22</b>	
<b>Beschrijving</b>	Na afloop is er een gat in het midden op de grens tussen blauw en geel. Grijs en wit zijn los gepakt. Groen is erg los gepakt. Gaten zijn in groen aanwezig in het midden en links. De constructie bezwijkt bij $H_s=0,138m$ .							
	Zie de foto's III.68 t/m III.69.							

<b>Experiment:</b>		<b>BW0.3T13</b>						
<b>Armourement:</b>		Breuksteen		cotan $\alpha$ :	3	$n_v$ :	0,3	
<b>Kleurenbanden:</b> (Van kruin tot teen)		Kruin	Bruin	Br	SWL	Groen	Gr	
			Wit	W		Wit	W	
			Grijs	Gi		Grijs	Gi	
			Lichtgeel	LG		Geel	G	
			Blauw	B		Blauw	B	
			Roze	R	Teen	Bruin	Br	
<b>Opmerking:</b>		Als 'armor layer' is breuksteen met een wijde gradering (1,6) toegepast.						
$H_s$ (m)	t(min)	Rocken			Verplaatsen			Schuiven
		L	M	R	L	M	R	
0,0872			1G,3W,3Gr					
0,0966	5		1G,4Gr,1W	1Gi		1W		
	17		1G,2W,2Gr			1Gr		
0,107	25	3W	1G,1Gi,3W, 2Gr,1R	1Gi		1G,1Gr	1W	
0,115	25	3W	2Gi,5W,4Gr	2Gi		2G,1Gi	1Gi	
0,129		1W	1G,1Gi,5W, 4Gr	1Gi,1Gr	1G,1Gi,1W	1G,3Gi,6W, 1Gr	1Gi,2W	5Gr
0,138		1W,2Gr	1B,2G,3Gi, 2W,4Gr	2G,3W,2Gr	2W,1Gr	3G,4W,5Gr, .2R	3W,2Gr	10Gi,11W,3Gr
Schuiven				Verplaatsen				
Br	0	W	11	Br	0	W	20	
W	0	Gi	10	W	0	Gi	7	
Gi	0	G	0	Gi	0	G	8	
LG	0	B	0	LG	0	B	0	
B	0	Br	0	B	0	Br	0	
R	0			R	2			
Gr	8	<b>Totaal</b>	<b>29</b>	Gr	<b>11</b>	<b>Totaal</b>	<b>48</b>	
<b>Beschrijving</b>	<p>Plunging golven zorgen niet voor opstuwing. Het water waar de golf opklapt neemt de energie op. Plunging golven met name op grijs en wit.</p> <p>Na afloop zijn wit en groen heel erg los gepakt. In deze banden ligt het filter bloot. De constructie bezwijkt bij <math>H_s=0,138m</math>.</p> <p>Zie de foto's III.70 t/m III.71.</p>							

## **BIJLAGE VII**

### **Resultaten experimenten**

## Meetdata

Voor de golfhoogte bij de constructie  $H_s$  is gebruik gemaakt van de golfhoogte gemeten tijdens de proeven zonder constructie.

De golfhoogten zijn bepaald met het programma Reflex. De golfperiode  $T_{mio}$  is bepaald met het programma Waves.

Voor  $T_p$  is de ingevoerde waarde gebruikt. Er is aangenomen dat deze constant is gebleven.

Symbolen:

$\alpha$ = hellingshoek [°]

$n_v$ = volumieke porositeit [-]

$D_n$ = nominale diameter [m]

$\Delta$ = relatieve dichtheid [-]

$H_{invoer}$ = ingevoerde significante golfhoogte [m]

$T_p$ = piekperiode [s]

$T_{mio}$ = gemeten gemiddelde, inkomende golfperiode op diep water [s]

$H_{sio}$ = gemeten significante inkomende golfhoogte op diep water [m]

$s_{om}$ = opgetreden gemiddelde golfsteilheid op diep water [-]

$s_{op}$ = piekgolfsteilheid op diep water [-]

$H_{sro}$ = gemeten significante gereflecteerde golfhoogte op diep water [m]

$H_{si}$ = gemeten significante inkomende golfhoogte bij teenconstructie [m]

$s_m$ = gemiddelde golfsteilheid bij teenconstructie

$H_{sr}$ = gemeten significante gereflecteerde golfhoogte bij teenconstructie [m]

## Kubussen

Test: K0.4

cot $\alpha$	$n_v$ [-]	spec	$D_n$ [m]	$\Delta$ [-]	$H_{invoer}$ [m]	$T_p$ [s]	$T_{mio}$ [s]	$H_{sio}$ [m]	$s_{om}$ [-]	$s_{op}$ [-]	$H_{sro}$ [m]	$H_{si}$ [m]	$s_m$ [-]	$H_{sr}$ [m]	$H_{sio}/(\Delta \cdot D_n)$ [-]	$H_{si}/(\Delta \cdot D_n)$ [-]	$N_o$ [-]	$N_{od}$ [-]
1,5	0,4	JONSWAP	0,043	1,2	0,06	1,09	0,91	0,06	0,04	0,03	0,02	0,05	0,04	0,01	1,09	1,00	0	0,00
1,5	0,4	JONSWAP	0,043	1,2	0,08	1,22	1,00	0,07	0,05	0,03	0,02	0,07	0,04	0,01	1,44	1,29	0	0,00
1,5	0,4	JONSWAP	0,043	1,2	0,11	1,42	1,17	0,11	0,05	0,03	0,03	0,10	0,04	0,02	2,08	1,86	0	0,00
1,5	0,4	JONSWAP	0,043	1,2	0,13	1,55	1,27	0,13	0,05	0,03	0,04	0,12	0,05	0,02	2,48	2,21	0	0,00
1,5	0,4	JONSWAP	0,043	1,2	0,15	1,66	1,36	0,15	0,05	0,03	0,05	0,14	0,05	0,03	2,90	2,65	13	0,70
1,5	0,4	JONSWAP	0,043	1,2	0,16	1,72	1,43	0,16	0,05	0,03	0,06	0,15	0,05	0,03	3,06	2,86	19	1,02
1,5	0,4	JONSWAP	0,043	1,2	0,17	1,77	1,45	0,17	0,05	0,03	0,06	0,16	0,05	0,03	3,19	2,98	112	6,02



**Test: K0.3**

cot $\alpha$	$n_v[-]$	spec	$D_n[m]$	$\Delta[-]$	$H_{invoer}[m]$	$T_p[s]$	$T_{mio}[s]$	$H_{sio}[m]$	$s_{om}[-]$	$s_{op}[-]$	$H_{sro}[m]$	$H_{sil}[m]$	$s_m[-]$	$H_{sr}[m]$	$H_{sio}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$H_{sr}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$N_o[-]$	$N_{od}[-]$
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,13	1,55	1,27	0,13	0,05	0,03	0,04	0,12	0,05	0,02	2,52	2,21	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,15	1,66	1,37	0,15	0,05	0,03	0,05	0,14	0,05	0,03	2,88	2,65	10	0,54
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,16	1,72	1,42	0,16	0,05	0,03	0,06	0,15	0,05	0,03	3,08	2,86	99	5,32
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,17	1,77	1,45	0,17	0,05	0,03	0,06	0,16	0,05	0,03	3,25	2,98	228	12,26

**Test: K0.25**

cot $\alpha$	$n_v[-]$	spec	$D_n[m]$	$\Delta[-]$	$H_{invoer}[m]$	$T_p[s]$	$T_{mio}[s]$	$H_{sio}[m]$	$s_{om}[-]$	$s_{op}[-]$	$H_{sro}[m]$	$H_{sil}[m]$	$s_m[-]$	$H_{sr}[m]$	$H_{sio}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$H_{sr}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$N_o[-]$	$N_{od}[-]$
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,13	1,55	1,30	0,13	0,05	0,04	0,05	0,12	0,04	0,02	2,58	2,21	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,15	1,66	1,35	0,15	0,05	0,03	0,06	0,14	0,05	0,03	2,90	2,65	1	0,05
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,16	1,72	1,44	0,16	0,05	0,03	0,06	0,15	0,05	0,03	3,08	2,86	2	0,11
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,17	1,77	1,47	0,17	0,05	0,03	0,07	0,16	0,05	0,03	3,23	2,98	5	0,27
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,18	1,82	1,49	0,18	0,05	0,03	0,07	0,16	0,05	0,03	3,38	3,06	9	0,48

**Test: K0.4t**

cot $\alpha$	$n_v[-]$	spec	$D_n[m]$	$\Delta[-]$	$H_{invoer}[m]$	$T_p[s]$	$T_{mio}[s]$	$H_{sio}[m]$	$s_{om}[-]$	$s_{op}[-]$	$H_{sro}[m]$	$H_{sil}[m]$	$s_m[-]$	$H_{sr}[m]$	$H_{sio}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$H_{sr}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$N_o[-]$	$N_{od}[-]$
1,5	0,4	JONSWAP	0,043	1,2	0,13	1,55	1,26	0,13	0,05	0,04	0,04	0,12	0,05	0,02	2,54	2,21	1	0,05
1,5	0,4	JONSWAP	0,043	1,2	0,15	1,66	1,36	0,15	0,05	0,03	0,05	0,14	0,05	0,03	2,83	2,65	1	0,05
1,5	0,4	JONSWAP	0,043	1,2	0,16	1,72	1,41	0,16	0,05	0,03	0,05	0,15	0,05	0,03	3,02	2,86	1	0,05
1,5	0,4	JONSWAP	0,043	1,2	0,17	1,77	1,48	0,17	0,05	0,03	0,06	0,16	0,05	0,03	3,17	2,98	2	0,11
1,5	0,4	JONSWAP	0,043	1,2	0,18	1,82	1,51	0,17	0,05	0,03	0,06	0,16	0,04	0,03	3,33	3,06	2	0,11
1,5	0,4	JONSWAP	0,043	1,2	0,19	1,87	1,59	0,18	0,05	0,03	0,06	0,17	0,04	0,03	3,42	3,19	23	1,24

Test: K0.3t

cot $\alpha$	$n_v$ [-]	spec	$D_n$ [m]	$\Delta$ [-]	$H_{invoer}$ [m]	$T_p$ [s]	$T_{mio}$ [s]	$H_{sio}$ [m]	$s_{om}$ [-]	$s_{op}$ [-]	$H_{sro}$ [m]	$H_{sil}$ [m]	$s_m$ [-]	$H_{srl}$ [m]	$H_{sio}/(\Delta \cdot D_n)$ [-]	$H_{sil}/(\Delta \cdot D_n)$ [-]	$N_o$ [-]	$N_{od}$ [-]
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,13	1,55	1,29	0,13	0,05	0,03	0,04	0,12	0,04	0,02	2,50	2,21	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,15	1,66	1,38	0,15	0,05	0,03	0,05	0,14	0,05	0,03	2,83	2,65	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,16	1,72	1,42	0,16	0,05	0,03	0,06	0,15	0,05	0,03	3,00	2,86	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,17	1,77	1,48	0,17	0,05	0,03	0,06	0,16	0,05	0,03	3,17	2,98	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,18	1,82	1,51	0,17	0,05	0,03	0,06	0,16	0,04	0,03	3,31	3,06	1	0,05
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,19	1,87	1,59	0,18	0,05	0,03	0,07	0,17	0,04	0,03	3,42	3,19	1	0,05
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,2	1,92	1,60	0,18	0,05	0,03	0,07	0,18	0,04	0,04	3,52	3,36	5	0,27

Test: K0.25t

cot $\alpha$	$n_v$ [-]	spec	$D_n$ [m]	$\Delta$ [-]	$H_{invoer}$ [m]	$T_p$ [s]	$T_{mio}$ [s]	$H_{sio}$ [m]	$s_{om}$ [-]	$s_{op}$ [-]	$H_{sro}$ [m]	$H_{sil}$ [m]	$s_m$ [-]	$H_{srl}$ [m]	$H_{sio}/(\Delta \cdot D_n)$ [-]	$H_{sil}/(\Delta \cdot D_n)$ [-]	$N_o$ [-]	$N_{od}$ [-]
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,13	1,55	1,28	0,13	0,05	0,04	0,05	0,12	0,05	0,02	2,54	2,21	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,15	1,66	1,38	0,15	0,05	0,03	0,06	0,14	0,05	0,03	2,81	2,65	3	0,16
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,16	1,72	1,42	0,15	0,05	0,03	0,06	0,15	0,05	0,03	2,96	2,86	6	0,32
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,17	1,77	1,46	0,16	0,05	0,03	0,06	0,16	0,05	0,03	3,13	2,98	8	0,43
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,18	1,82	1,51	0,17	0,05	0,03	0,07	0,16	0,04	0,03	3,27	3,06	8	0,43
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,19	1,87	1,58	0,18	0,05	0,03	0,07	0,17	0,04	0,03	3,42	3,19	10	0,54
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,2	1,92	1,61	0,18	0,05	0,03	0,07	0,18	0,04	0,04	3,50	3,36	22	1,18
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,21	1,97	1,63	0,18	0,04	0,03	0,07	0,18	0,04	0,04	3,52	3,46	26	1,40

**Test: HerK0.4t**

cot $\alpha$	$n_v[-]$	spec	$D_n[m]$	$\Delta[-]$	$H_{invoer}[m]$	$T_p[s]$	$T_{mic}[s]$	$H_{sio}[m]$	$s_{om}[-]$	$s_{op}[-]$	$H_{sro}[m]$	$H_{sil}[m]$	$s_m[-]$	$H_{sr}[m]$	$H_{sio}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$H_{sr}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$N_o[-]$	$N_{od}[-]$
1,5	0,4	JONSWAP	0,043	1,2	0,12	1,49	1,23	0,12	0,05	0,03	0,04	0,11	0,05	0,02	2,31	2,06	8	0,43
1,5	0,4	JONSWAP	0,043	1,2	0,13	1,55	1,28	0,13	0,05	0,03	0,04	0,12	0,05	0,02	2,52	2,21	8	0,43
1,5	0,4	JONSWAP	0,043	1,2	0,14	1,61	1,34	0,14	0,05	0,03	0,05	0,13	0,05	0,03	2,67	2,48	8	0,43
1,5	0,4	JONSWAP	0,043	1,2	0,15	1,66	1,36	0,15	0,05	0,03	0,05	0,14	0,05	0,03	2,81	2,65	10	0,54
1,5	0,4	JONSWAP	0,043	1,2	0,16	1,72	1,44	0,15	0,05	0,03	0,05	0,15	0,05	0,03	2,96	2,86	12	0,65
1,5	0,4	JONSWAP	0,043	1,2	0,17	1,77	1,47	0,16	0,05	0,03	0,05	0,16	0,05	0,03	3,11	2,98	12	0,65
1,5	0,4	JONSWAP	0,043	1,2	0,18	1,82	1,51	0,17	0,05	0,03	0,06	0,16	0,04	0,03	3,29	3,06	12	0,65
1,5	0,4	JONSWAP	0,043	1,2	0,19	1,87	1,58	0,18	0,04	0,03	0,06	0,17	0,04	0,03	3,38	3,19	12	0,65
1,5	0,4	JONSWAP	0,043	1,2	0,2	1,92	1,60	0,18	0,04	0,03	0,07	0,18	0,04	0,04	3,46	3,36	38	2,04

**Test: HerK0.3t**

cot $\alpha$	$n_v[-]$	spec	$D_n[m]$	$\Delta[-]$	$H_{invoer}[m]$	$T_p[s]$	$T_{mic}[s]$	$H_{sio}[m]$	$s_{om}[-]$	$s_{op}[-]$	$H_{sro}[m]$	$H_{sil}[m]$	$s_m[-]$	$H_{sr}[m]$	$H_{sio}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$H_{sr}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$N_o[-]$	$N_{od}[-]$
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,13	1,55	1,28	0,14	0,05	0,04	0,05	0,12	0,05	0,02	2,63	2,21	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,14	1,61	1,33	0,14	0,05	0,04	0,05	0,13	0,05	0,03	2,77	2,48	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,15	1,66	1,34	0,15	0,05	0,04	0,05	0,14	0,05	0,03	2,92	2,65	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,16	1,72	1,42	0,16	0,05	0,03	0,06	0,15	0,05	0,03	3,08	2,86	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,17	1,77	1,45	0,17	0,05	0,03	0,06	0,16	0,05	0,03	3,27	2,98	1	0,05
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,18	1,82	1,51	0,18	0,05	0,03	0,07	0,16	0,04	0,03	3,44	3,06	1	0,05
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,19	1,87	1,56	0,18	0,05	0,03	0,07	0,17	0,04	0,03	3,54	3,19	4	0,22
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,2	1,92	1,61	0,19	0,05	0,03	0,07	0,18	0,04	0,04	3,61	3,36	9	0,48

**Test: HerK0.25t**

cot $\alpha$	$n_v[-]$	spec	$D_n[m]$	$\Delta[-]$	$H_{invoer}[m]$	$T_p[s]$	$T_{mio}[s]$	$H_{sio}[m]$	$s_{om}[-]$	$s_{op}[-]$	$H_{sro}[m]$	$H_{sil}[m]$	$s_m[-]$	$H_{sr}[m]$	$H_{sio}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$H_{sr}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$N_o[-]$	$N_{od}[-]$
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,13	1,55	1,30	0,13	0,05	0,04	0,05	0,12	0,04	0,02	2,56	2,21	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,14	1,61	1,34	0,14	0,05	0,04	0,05	0,13	0,05	0,03	2,73	2,48	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,15	1,66	1,39	0,15	0,05	0,03	0,06	0,14	0,05	0,03	2,88	2,65	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,16	1,72	1,43	0,16	0,05	0,03	0,06	0,15	0,05	0,03	3,04	2,86	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,17	1,77	1,47	0,17	0,05	0,03	0,06	0,16	0,05	0,03	3,21	2,98	1	0,05
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,18	1,82	1,52	0,18	0,05	0,03	0,07	0,16	0,04	0,03	3,36	3,06	1	0,05
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,19	1,87	1,59	0,18	0,05	0,03	0,07	0,17	0,04	0,03	3,50	3,19	4	0,22
1,5	0,3	JONSWAP	0,043	1,2	0,2	1,92	1,62	0,19	0,05	0,03	0,07	0,18	0,04	0,04	3,56	3,36	20	1,08

**Tetrapoden**

**Test: T0.4t**

cot $\alpha$	$n_v[-]$	spec	$D_n[m]$	$\Delta[-]$	$H_{invoer}[m]$	$T_p[s]$	$T_{mio}[s]$	$H_{sio}[m]$	$s_{om}[-]$	$s_{op}[-]$	$H_{sro}[m]$	$H_{sil}[m]$	$s_m[-]$	$H_{sr}[m]$	$H_{sio}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$H_{sr}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$N_o[-]$	$N_{od}[-]$
1,5	0,4	JONSWAP	0,044	1,3	0,08	1,22	1,00	0,07	0,05	0,03	0,02	0,07	0,04	0,01	1,27	1,16	0	0,00
1,5	0,4	JONSWAP	0,044	1,3	0,1	1,36	1,12	0,10	0,05	0,03	0,03	0,09	0,04	0,01	1,67	1,50	0	0,00
1,5	0,4	JONSWAP	0,044	1,3	0,12	1,49	1,22	0,12	0,05	0,03	0,04	0,11	0,05	0,02	2,03	1,84	0	0,00
1,5	0,4	JONSWAP	0,044	1,3	0,13	1,55	1,28	0,13	0,05	0,03	0,04	0,12	0,05	0,02	2,22	1,98	1	0,06
1,5	0,4	JONSWAP	0,044	1,3	0,14	1,61	1,32	0,14	0,05	0,03	0,04	0,13	0,05	0,03	2,36	2,22	15	0,83
1,5	0,4	JONSWAP	0,044	1,3	0,15	1,66	1,37	0,15	0,05	0,03	0,04	0,14	0,05	0,03	2,50	2,38	29	1,60

**Test: T0.3t**

cot $\alpha$	$n_v[-]$	spec	$D_n[m]$	$\Delta[-]$	$H_{invoer}[m]$	$T_p[s]$	$T_{mio}[s]$	$H_{sio}[m]$	$s_{om}[-]$	$s_{op}[-]$	$H_{sro}[m]$	$H_{sil}[m]$	$s_m[-]$	$H_{sr}[m]$	$H_{sio}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$H_{sr}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$N_o[-]$	$N_{od}[-]$
1,5	0,3	JONSWAP	0,044	1,3	0,1	1,36	1,14	0,10	0,05	0,03	0,03	0,09	0,04	0,01	1,67	1,50	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,044	1,3	0,11	1,42	1,19	0,11	0,05	0,03	0,03	0,10	0,04	0,02	1,84	1,66	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,044	1,3	0,12	1,49	1,22	0,12	0,05	0,03	0,04	0,11	0,05	0,02	2,05	1,84	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,044	1,3	0,13	1,55	1,28	0,13	0,05	0,03	0,04	0,12	0,05	0,02	2,22	1,98	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,044	1,3	0,14	1,61	1,29	0,14	0,05	0,03	0,04	0,13	0,05	0,03	2,34	2,22	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,044	1,3	0,15	1,66	1,37	0,15	0,05	0,03	0,04	0,14	0,05	0,03	2,50	2,38	4	0,22

Test: T0.25t

cot $\alpha$	$n_v[-]$	spec	$D_n[m]$	$\Delta[-]$	$H_{invoer}[m]$	$T_p[s]$	$T_{mio}[s]$	$H_{sio}[m]$	$s_{om}[-]$	$s_{op}[-]$	$H_{sro}[m]$	$H_{sil}[m]$	$s_m[-]$	$H_{sr}[m]$	$H_{sio}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$H_{sr}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$N_o[-]$	$N_{od}[-]$
1,5	0,3	JONSWAP	0,044	1,3	0,1	1,36	1,12	0,10	0,05	0,03	0,03	0,09	0,04	0,01	1,67	1,50	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,044	1,3	0,11	1,42	1,20	0,11	0,05	0,03	0,03	0,10	0,04	0,02	1,84	1,66	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,044	1,3	0,12	1,49	1,23	0,12	0,05	0,03	0,04	0,11	0,05	0,02	2,05	1,84	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,044	1,3	0,13	1,55	1,26	0,13	0,05	0,03	0,04	0,12	0,05	0,02	2,20	1,98	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,044	1,3	0,14	1,61	1,33	0,14	0,05	0,03	0,04	0,13	0,05	0,03	2,38	2,22	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,044	1,3	0,15	1,66	1,38	0,14	0,05	0,03	0,04	0,14	0,05	0,03	2,48	2,38	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,044	1,3	0,16	1,72	1,43	0,15	0,05	0,03	0,05	0,15	0,05	0,03	2,65	2,57	1	0,06
1,5	0,3	JONSWAP	0,044	1,3	0,17	1,77	1,47	0,16	0,05	0,03	0,05	0,16	0,05	0,03	2,81	2,67	3	0,17
1,5	0,3	JONSWAP	0,044	1,3	0,18	1,82	1,49	0,17	0,05	0,03	0,06	0,16	0,05	0,03	2,88	2,74	3	0,17
1,5	0,3	JONSWAP	0,044	1,3	0,19	1,87	1,65	0,17	0,04	0,03	0,06	0,17	0,04	0,03	2,96	2,86	5	0,28

Test: HerT0.25t

cot $\alpha$	$n_v[-]$	spec	$D_n[m]$	$\Delta[-]$	$H_{invoer}[m]$	$T_p[s]$	$T_{mio}[s]$	$H_{sio}[m]$	$s_{om}[-]$	$s_{op}[-]$	$H_{sro}[m]$	$H_{sil}[m]$	$s_m[-]$	$H_{sr}[m]$	$H_{sio}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$H_{sr}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$N_o[-]$	$N_{od}[-]$
1,5	0,3	JONSWAP	0,044	1,3	0,1	1,36	1,14	0,10	0,05	0,03	0,03	0,09	0,04	0,01	1,65	1,50	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,044	1,3	0,11	1,42	1,18	0,11	0,05	0,03	0,03	0,10	0,04	0,02	1,84	1,66	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,044	1,3	0,12	1,49	1,23	0,12	0,05	0,03	0,03	0,11	0,05	0,02	2,03	1,84	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,044	1,3	0,13	1,55	1,26	0,13	0,05	0,03	0,04	0,12	0,05	0,02	2,20	1,98	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,044	1,3	0,14	1,61	1,31	0,14	0,05	0,03	0,04	0,13	0,05	0,03	2,32	2,22	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,044	1,3	0,15	1,66	1,37	0,14	0,05	0,03	0,04	0,14	0,05	0,03	2,48	2,38	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,044	1,3	0,16	1,72	1,44	0,16	0,05	0,03	0,05	0,15	0,05	0,03	2,67	2,57	1	0,06
1,5	0,3	JONSWAP	0,044	1,3	0,17	1,77	1,48	0,16	0,05	0,03	0,05	0,16	0,05	0,03	2,79	2,67	3	0,17
1,5	0,3	JONSWAP	0,044	1,3	0,18	1,82	1,49	0,17	0,05	0,03	0,05	0,16	0,05	0,03	2,88	2,74	11	0,61



## Breuksteen

### Test: B0.3t

cot $\alpha$	$n_v[-]$	spec	$D_n[m]$	$\Delta[-]$	$H_{invoer}[m]$	$T_p[s]$	$T_{mio}[s]$	$H_{sio}[m]$	$s_{om}[-]$	$s_{op}[-]$	$H_{sro}[m]$	$H_{sil}[m]$	$s_m[-]$	$H_{srf}[m]$	$H_{sio}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$H_{srf}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$N_o[-]$	$N_{od}[-]$
1,5	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,08	1,22	1,01	0,08	0,05	0,03	0,02	0,07	0,04	0,01	1,29	1,15	0,00	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,10	1,36	1,13	0,10	0,05	0,03	0,03	0,09	0,04	0,01	1,71	1,50	0,00	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,11	1,42	1,20	0,11	0,05	0,03	0,03	0,10	0,04	0,02	1,89	1,66	4,00	0,18
1,5	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,12	1,49	1,22	0,12	0,05	0,04	0,04	0,11	0,05	0,02	2,07	1,83	15	0,68
1,5	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,13	1,55	1,27	0,13	0,05	0,03	0,04	0,12	0,05	0,02	2,23	1,97	109	4,91

### Test: BA1

cot $\alpha$	$n_v[-]$	spec	$D_n[m]$	$\Delta[-]$	$H_{invoer}[m]$	$T_p[s]$	$T_{mio}[s]$	$H_{sio}[m]$	$s_{om}[-]$	$s_{op}[-]$	$H_{sro}[m]$	$H_{sil}[m]$	$s_m[-]$	$H_{srf}[m]$	$H_{sio}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$H_{srf}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$N_o[-]$	$N_{od}[-]$
1,5	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,10	1,36	1,25	0,09	0,04	0,03	0,03	0,09	0,04	0,01	1,58	1,50	1	0,05
1,5	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,11	1,42	1,19	0,11	0,05	0,03	0,03	0,10	0,04	0,02	1,87	1,66	3	0,14
1,5	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,12	1,49	1,22	0,12	0,05	0,04	0,04	0,11	0,05	0,02	2,07	1,83	11	0,50
1,5	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,13	1,55	1,27	0,13	0,05	0,03	0,04	0,12	0,05	0,02	2,25	1,97	25	1,13
1,5	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,14	1,61	1,27	0,14	0,06	0,03	0,04	0,13	0,05	0,03	2,38	2,21	44	1,98
1,5	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,15	1,66	1,36	0,15	0,05	0,03	0,04	0,14	0,05	0,03	2,54	2,37	102	4,59

### Test: BB1

cot $\alpha$	$n_v[-]$	spec	$D_n[m]$	$\Delta[-]$	$H_{invoer}[m]$	$T_p[s]$	$T_{mio}[s]$	$H_{sio}[m]$	$s_{om}[-]$	$s_{op}[-]$	$H_{sro}[m]$	$H_{sil}[m]$	$s_m[-]$	$H_{srf}[m]$	$H_{sio}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$H_{srf}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$N_o[-]$	$N_{od}[-]$
1,5	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,08	1,22	1,02	0,08	0,05	0,03	0,02	0,07	0,04	0,01	1,30	1,15	0	0,00
1,5	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,10	1,36	1,13	0,10	0,05	0,03	0,03	0,09	0,04	0,02	1,71	1,50	9	0,41
1,5	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,11	1,42	1,19	0,11	0,05	0,04	0,03	0,10	0,04	0,02	1,90	1,66	64	2,88

**Test: B0.3t12**

cot $\alpha$	$n_v[-]$	spec	$D_n[m]$	$\Delta[-]$	$H_{invoer}[m]$	$T_p[s]$	$T_{mio}[s]$	$H_{sio}[m]$	$s_{om}[-]$	$s_{op}[-]$	$H_{sro}[m]$	$H_{sil}[m]$	$s_m[-]$	$H_{sr}[m]$	$H_{sio}/(\Delta*D_n)[-]$	$H_{si}/(\Delta*D_n)[-]$	$N_o[-]$	$N_{od}[-]$
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,10	1,36	1,13	0,10	0,05	0,03	0,02	0,09	0,04	0,01	1,70	1,50	0	0,00
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,11	1,42	1,17	0,11	0,05	0,03	0,03	0,10	0,04	0,02	1,85	1,66	1	0,05
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,12	1,49	1,23	0,12	0,05	0,03	0,03	0,11	0,05	0,02	2,02	1,83	8	0,36
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,13	1,55	1,27	0,13	0,05	0,03	0,03	0,12	0,05	0,02	2,21	1,97	53	2,39
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,14	1,61	1,32	0,14	0,05	0,03	0,03	0,13	0,05	0,03	2,37	2,21	-	-

**Test: BA12**

cot $\alpha$	$n_v[-]$	spec	$D_n[m]$	$\Delta[-]$	$H_{invoer}[m]$	$T_p[s]$	$T_{mio}[s]$	$H_{sio}[m]$	$s_{om}[-]$	$s_{op}[-]$	$H_{sro}[m]$	$H_{sil}[m]$	$s_m[-]$	$H_{sr}[m]$	$H_{sio}/(\Delta*D_n)[-]$	$H_{si}/(\Delta*D_n)[-]$	$N_o[-]$	$N_{od}[-]$
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,10	1,36	1,11	0,10	0,05	0,03	0,02	0,09	0,05	0,01	1,65	1,50	0	0,00
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,11	1,42	1,16	0,11	0,05	0,03	0,02	0,10	0,05	0,02	1,85	1,66	1	0,05
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,12	1,49	1,21	0,12	0,05	0,03	0,03	0,11	0,05	0,02	2,02	1,83	1	0,05
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,13	1,55	1,28	0,13	0,05	0,03	0,03	0,12	0,05	0,02	2,23	1,97	19	0,86
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,14	1,61	1,30	0,14	0,05	0,03	0,03	0,13	0,05	0,03	2,35	2,21	50	2,25
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,15	1,66	1,36	0,15	0,05	0,03	0,03	0,14	0,05	0,03	2,52	2,37	69	3,11
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,16	1,72	1,41	0,16	0,05	0,03	0,04	0,15	0,05	0,03	2,67	2,55	89	4,01
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,17	1,77	1,45	0,16	0,05	0,03	0,04	0,16	0,05	0,03	2,79	2,66	118	5,31

**Test: BB12**

cot $\alpha$	$n_v[-]$	spec	$D_n[m]$	$\Delta[-]$	$H_{invoer}[m]$	$T_p[s]$	$T_{mio}[s]$	$H_{sio}[m]$	$s_{om}[-]$	$s_{op}[-]$	$H_{sro}[m]$	$H_{sil}[m]$	$s_m[-]$	$H_{sr}[m]$	$H_{sio}/(\Delta*D_n)[-]$	$H_{si}/(\Delta*D_n)[-]$	$N_o[-]$	$N_{od}[-]$
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,08	1,22	1,01	0,08	0,05	0,03	0,01	0,07	0,04	0,01	1,30	1,15	0	0,00
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,10	1,36	1,12	0,10	0,05	0,03	0,02	0,09	0,04	0,02	1,68	1,50	2	0,09
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,11	1,42	1,17	0,11	0,05	0,03	0,02	0,10	0,05	0,02	1,87	1,66	39	1,76

**Test: Her1B0.3t12**

cot $\alpha$	$n_v[-]$	spec	$D_n[m]$	$\Delta[-]$	$H_{invoer}[m]$	$T_p[s]$	$T_{mio}[s]$	$H_{sio}[m]$	$s_{om}[-]$	$s_{op}[-]$	$H_{sro}[m]$	$H_{sil}[m]$	$s_m[-]$	$H_{sr}[m]$	$H_{sio}/(\Delta*D_n)[-]$	$H_{si}/(\Delta*D_n)[-]$	$N_o[-]$	$N_{od}[-]$
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,10	1,36	1,13	0,10	0,05	0,03	0,02	0,09	0,04	0,01	1,66	1,50	0	0,00
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,11	1,42	1,17	0,11	0,05	0,03	0,03	0,10	0,05	0,02	1,87	1,66	5	0,23
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,12	1,49	1,22	0,12	0,05	0,03	0,03	0,11	0,05	0,02	2,04	1,83	29	1,31
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,13	1,55	1,28	0,13	0,05	0,03	0,03	0,12	0,05	0,02	2,23	1,97	131	5,90

**Test: Her2B0.3t12**

cot $\alpha$	$n_v$ [-]	spec	$D_n$ [m]	$\Delta$ [-]	$H_{invoer}$ [m]	$T_p$ [s]	$T_{mio}$ [s]	$H_{sio}$ [m]	$s_{om}$ [-]	$s_{op}$ [-]	$H_{sro}$ [m]	$H_{sil}$ [m]	$s_m$ [-]	$H_{sr}$ [m]	$H_{sio}/(\Delta \cdot D_n)$ [-]	$H_{si}/(\Delta \cdot D_n)$ [-]	$N_o$ [-]	$N_{od}$ [-]
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,10	1,36	1,13	0,10	0,05	0,03	0,02	0,09	0,04	0,01	1,68	1,50	0	0,00
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,11	1,42	1,17	0,11	0,05	0,03	0,02	0,10	0,04	0,02	1,87	1,66	1	0,05
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,12	1,49	1,23	0,12	0,05	0,03	0,03	0,11	0,05	0,02	2,04	1,83	24	1,08
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,13	1,55	1,27	0,13	0,05	0,03	0,03	0,12	0,05	0,02	2,23	1,97	86	3,87

**Test: Her3B0.3t12**

cot $\alpha$	$n_v$ [-]	spec	$D_n$ [m]	$\Delta$ [-]	$H_{invoer}$ [m]	$T_p$ [s]	$T_{mio}$ [s]	$H_{sio}$ [m]	$s_{om}$ [-]	$s_{op}$ [-]	$H_{sro}$ [m]	$H_{sil}$ [m]	$s_m$ [-]	$H_{sr}$ [m]	$H_{sio}/(\Delta \cdot D_n)$ [-]	$H_{si}/(\Delta \cdot D_n)$ [-]	$N_o$ [-]	$N_{od}$ [-]
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,10	1,36	1,13	0,10	0,05	0,03	0,02	0,09	0,04	0,01	1,68	1,50	0	0,00
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,11	1,42	1,17	0,11	0,05	0,03	0,02	0,10	0,05	0,02	1,87	1,66	1	0,05
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,12	1,49	1,24	0,12	0,05	0,03	0,03	0,11	0,04	0,02	2,06	1,83	12	0,54
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,13	1,55	1,27	0,13	0,05	0,03	0,03	0,12	0,05	0,02	2,23	1,97	66	2,97

**Test: BW0.3t12**

cot $\alpha$	$n_v$ [-]	spec	$D_n$ [m]	$\Delta$ [-]	$H_{invoer}$ [m]	$T_p$ [s]	$T_{mio}$ [s]	$H_{sio}$ [m]	$s_{om}$ [-]	$s_{op}$ [-]	$H_{sro}$ [m]	$H_{sil}$ [m]	$s_m$ [-]	$H_{sr}$ [m]	$H_{sio}/(\Delta \cdot D_n)$ [-]	$H_{si}/(\Delta \cdot D_n)$ [-]	$N_o$ [-]	$N_{od}$ [-]
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,08	1,22	1,02	0,08	0,05	0,03	0,01	0,07	0,04	0,01	1,30	1,15	2	0,09
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,10	1,36	1,14	0,10	0,05	0,03	0,02	0,09	0,04	0,02	1,68	1,50	7	0,32
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,11	1,42	1,18	0,11	0,05	0,03	0,02	0,10	0,04	0,02	1,87	1,66	24	1,08
2	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,12	1,49	1,23	0,12	0,05	0,03	0,03	0,11	0,05	0,02	2,02	1,83	130	5,85

**Test: B0.3t13**

cot $\alpha$	$n_v[-]$	spec	$D_n[m]$	$\Delta[-]$	$H_{invoer}[m]$	$T_{pl}[s]$	$T_{mio}[s]$	$H_{sio}[m]$	$s_{om}[-]$	$s_{op}[-]$	$H_{sro}[m]$	$H_{sil}[m]$	$s_m[-]$	$H_{sr}[m]$	$H_{sio}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$H_{si}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$N_o[-]$	$N_{od}[-]$
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,10	1,36	1,10	0,10	0,05	0,03	0,01	0,09	0,05	0,01	1,65	1,50	0	0,00
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,11	1,42	1,16	0,11	0,05	0,03	0,01	0,10	0,05	0,02	1,83	1,66	0	0,00
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,12	1,49	1,24	0,12	0,05	0,03	0,02	0,11	0,04	0,02	2,01	1,83	0	0,00
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,13	1,55	1,26	0,13	0,05	0,03	0,02	0,12	0,05	0,02	2,19	1,97	3	0,14
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,14	1,61	1,32	0,14	0,05	0,03	0,02	0,13	0,05	0,03	2,33	2,21	4	0,18
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,15	1,66	1,36	0,15	0,05	0,03	0,03	0,14	0,05	0,03	2,50	2,37	19	0,86
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,16	1,72	1,42	0,16	0,05	0,03	0,03	0,15	0,05	0,03	2,67	2,55	53	2,39
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,17	1,77	1,45	0,16	0,05	0,03	0,03	0,16	0,05	0,03	2,79	2,66	96	4,32
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,18	1,82	1,56	0,17	0,04	0,03	0,03	0,16	0,04	0,03	2,83	2,73	148	6,66

**Test: BA13**

cot $\alpha$	$n_v[-]$	spec	$D_n[m]$	$\Delta[-]$	$H_{invoer}[m]$	$T_{pl}[s]$	$T_{mio}[s]$	$H_{sio}[m]$	$s_{om}[-]$	$s_{op}[-]$	$H_{sro}[m]$	$H_{sil}[m]$	$s_m[-]$	$H_{sr}[m]$	$H_{sio}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$H_{si}/(\Delta \cdot D_n)[-]$	$N_o[-]$	$N_{od}[-]$
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,10	1,36	1,11	0,10	0,05	0,03	0,01	0,09	0,05	0,01	1,65	1,50	0	0,00
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,11	1,42	1,17	0,11	0,05	0,03	0,01	0,10	0,05	0,02	1,83	1,66	0	0,00
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,12	1,49	1,23	0,12	0,05	0,03	0,02	0,11	0,05	0,02	2,01	1,83	0	0,00
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,13	1,55	1,27	0,13	0,05	0,03	0,02	0,12	0,05	0,02	2,19	1,97	0	0,00
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,14	1,61	1,31	0,14	0,05	0,03	0,02	0,13	0,05	0,03	2,35	2,21	1	0,05
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,15	1,66	1,36	0,15	0,05	0,03	0,03	0,14	0,05	0,03	2,52	2,37	4	0,18
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,16	1,72	1,40	0,16	0,05	0,03	0,03	0,15	0,05	0,03	2,69	2,55	14	0,63
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,17	1,77	1,44	0,16	0,05	0,03	0,03	0,16	0,05	0,03	2,81	2,66	50	2,25
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,18	1,82	1,48	0,17	0,05	0,03	0,03	0,16	0,05	0,03	2,95	2,73	101	4,55
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,19	1,87	1,51	0,18	0,05	0,03	0,03	0,17	0,05	0,03	3,05	2,85	170	7,65

**Test: BBt13**

cot $\alpha$	$n_v$ [-]	spec	$D_n$ [m]	$\Delta$ [-]	$H_{invoer}$ [m]	$T_p$ [s]	$T_{mio}$ [s]	$H_{sio}$ [m]	$s_{om}$ [-]	$s_{op}$ [-]	$H_{sro}$ [m]	$H_{sil}$ [m]	$s_m$ [-]	$H_{sr}$ [m]	$H_{sio}/(\Delta \cdot D_n)$ [-]	$H_{si}/(\Delta \cdot D_n)$ [-]	$N_o$ [-]	$N_{od}$ [-]
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,10	1,36	1,11	0,10	0,05	0,03	0,01	0,09	0,05	0,01	1,65	1,50	0	0,00
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,11	1,42	1,16	0,11	0,05	0,03	0,01	0,10	0,05	0,02	1,83	1,66	0	0,00
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,12	1,49	1,22	0,12	0,05	0,03	0,02	0,11	0,05	0,02	2,01	1,83	3	0,14
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,13	1,55	1,26	0,13	0,05	0,03	0,02	0,12	0,05	0,02	2,19	1,97	5	0,23
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,14	1,61	1,31	0,14	0,05	0,03	0,02	0,13	0,05	0,03	2,33	2,21	8	0,36
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,15	1,66	1,36	0,15	0,05	0,03	0,02	0,14	0,05	0,03	2,52	2,37	54	2,43
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,16	1,72	1,41	0,16	0,05	0,03	0,02	0,15	0,05	0,03	2,67	2,55	101	4,55

**Test: Her1B0.3t13**

cot $\alpha$	$n_v$ [-]	spec	$D_n$ [m]	$\Delta$ [-]	$H_{invoer}$ [m]	$T_p$ [s]	$T_{mio}$ [s]	$H_{sio}$ [m]	$s_{om}$ [-]	$s_{op}$ [-]	$H_{sro}$ [m]	$H_{sil}$ [m]	$s_m$ [-]	$H_{sr}$ [m]	$H_{sio}/(\Delta \cdot D_n)$ [-]	$H_{si}/(\Delta \cdot D_n)$ [-]	$N_o$ [-]	$N_{od}$ [-]
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,10	1,36	1,11	0,10	0,05	0,03	0,01	0,09	0,05	0,01	1,65	1,50	0	0,00
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,11	1,42	1,16	0,11	0,05	0,03	0,01	0,10	0,05	0,02	1,85	1,66	0	0,00
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,12	1,49	1,21	0,12	0,05	0,03	0,01	0,11	0,05	0,02	2,01	1,83	0	0,00
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,13	1,55	1,26	0,13	0,05	0,03	0,02	0,12	0,05	0,02	2,19	1,97	0	0,00
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,14	1,61	1,32	0,14	0,05	0,03	0,02	0,13	0,05	0,03	2,35	2,21	11	0,50
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,15	1,66	1,35	0,15	0,05	0,03	0,02	0,14	0,05	0,03	2,52	2,37	28	1,26
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,16	1,72	1,40	0,16	0,05	0,03	0,03	0,15	0,05	0,03	2,69	2,55	77	3,47
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,17	1,77	1,44	0,16	0,05	0,03	0,03	0,16	0,05	0,03	2,81	2,66	140	6,30

**Test: Her2B0.3t13**

cot $\alpha$	$n_v$ [-]	spec	$D_n$ [m]	$\Delta$ [-]	$H_{invoer}$ [m]	$T_p$ [s]	$T_{mio}$ [s]	$H_{sio}$ [m]	$s_{om}$ [-]	$s_{op}$ [-]	$H_{sro}$ [m]	$H_{sil}$ [m]	$s_m$ [-]	$H_{sr}$ [m]	$H_{sio}/(\Delta \cdot D_n)$ [-]	$H_{si}/(\Delta \cdot D_n)$ [-]	$N_o$ [-]	$N_{od}$ [-]
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,10	1,36	1,11	0,10	0,05	0,03	0,01	0,09	0,05	0,01	1,63	1,50	0	0,00
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,11	1,42	1,16	0,11	0,05	0,03	0,01	0,10	0,05	0,02	1,83	1,66	0	0,00
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,12	1,49	1,22	0,12	0,05	0,03	0,01	0,11	0,05	0,02	2,01	1,83	0	0,00
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,13	1,55	1,27	0,13	0,05	0,03	0,02	0,12	0,05	0,02	2,19	1,97	1	0,05
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,14	1,61	1,32	0,14	0,05	0,03	0,02	0,13	0,05	0,03	2,33	2,21	1	0,05
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,15	1,66	1,35	0,15	0,05	0,03	0,02	0,14	0,05	0,03	2,50	2,37	27	1,22
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,16	1,72	1,41	0,16	0,05	0,03	0,02	0,15	0,05	0,03	2,67	2,55	52	2,34
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,17	1,77	1,44	0,16	0,05	0,03	0,03	0,16	0,05	0,03	2,81	2,66	114	5,13



**Test: Her3B0.3t13**

cot $\alpha$	$n_v$ [-]	spec	$D_n$ [m]	$\Delta$ [-]	$H_{invoer}$ [m]	$T_p$ [s]	$T_{mio}$ [s]	$H_{sio}$ [m]	$s_{om}$ [-]	$s_{op}$ [-]	$H_{sro}$ [m]	$H_{sil}$ [m]	$s_m$ [-]	$H_{sr}$ [m]	$H_{sio}/(\Delta \cdot D_n)$ [-]	$H_{sil}/(\Delta \cdot D_n)$ [-]	$N_o$ [-]	$N_{od}$ [-]
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,10	1,36	1,12	0,10	0,05	0,03	0,01	0,09	0,04	0,01	1,65	1,50	0	0,00
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,11	1,42	1,16	0,11	0,05	0,03	0,01	0,10	0,05	0,02	1,83	1,66	1	0,05
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,12	1,49	1,23	0,12	0,05	0,03	0,01	0,11	0,05	0,02	1,97	1,83	1	0,05
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,13	1,55	1,27	0,13	0,05	0,03	0,02	0,12	0,05	0,02	2,21	1,97	4	0,18
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,14	1,61	1,31	0,14	0,05	0,03	0,02	0,13	0,05	0,03	2,37	2,21	19	0,86
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,15	1,66	1,36	0,15	0,05	0,03	0,02	0,14	0,05	0,03	2,52	2,37	63	2,84

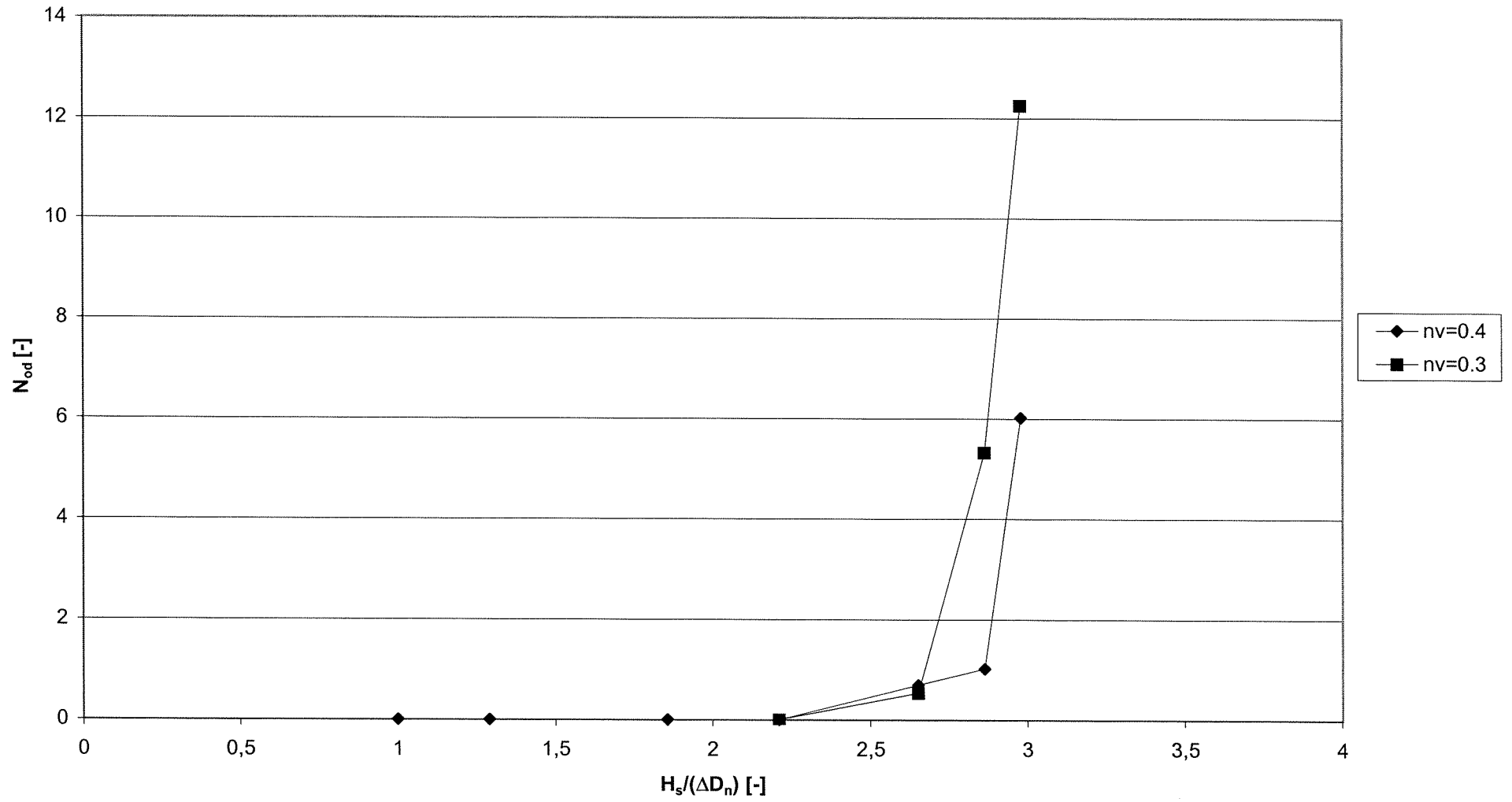
**Test: BW0.3t13**

cot $\alpha$	$n_v$ [-]	spec	$D_n$ [m]	$\Delta$ [-]	$H_{invoer}$ [m]	$T_p$ [s]	$T_{mio}$ [s]	$H_{sio}$ [m]	$s_{om}$ [-]	$s_{op}$ [-]	$H_{sro}$ [m]	$H_{sil}$ [m]	$s_m$ [-]	$H_{sr}$ [m]	$H_{sio}/(\Delta \cdot D_n)$ [-]	$H_{sil}/(\Delta \cdot D_n)$ [-]	$N_o$ [-]	$N_{od}$ [-]
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,10	1,36	1,11	0,10	0,05	0,03	0,01	0,09	0,05	0,01	1,65	1,50	0	0,00
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,11	1,42	1,17	0,11	0,05	0,03	0,01	0,10	0,05	0,02	1,85	1,66	2	0,09
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,12	1,49	1,22	0,12	0,05	0,03	0,02	0,11	0,05	0,02	2,02	1,83	5	0,23
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,13	1,55	1,27	0,13	0,05	0,03	0,02	0,12	0,05	0,02	2,23	1,97	9	0,41
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,14	1,61	1,31	0,14	0,05	0,03	0,02	0,13	0,05	0,03	2,35	2,21	31	1,40
3	0,3	JONSWAP	0,036	1,62	0,15	1,66	1,36	0,15	0,05	0,03	0,02	0,14	0,05	0,03	2,52	2,37	77	3,47

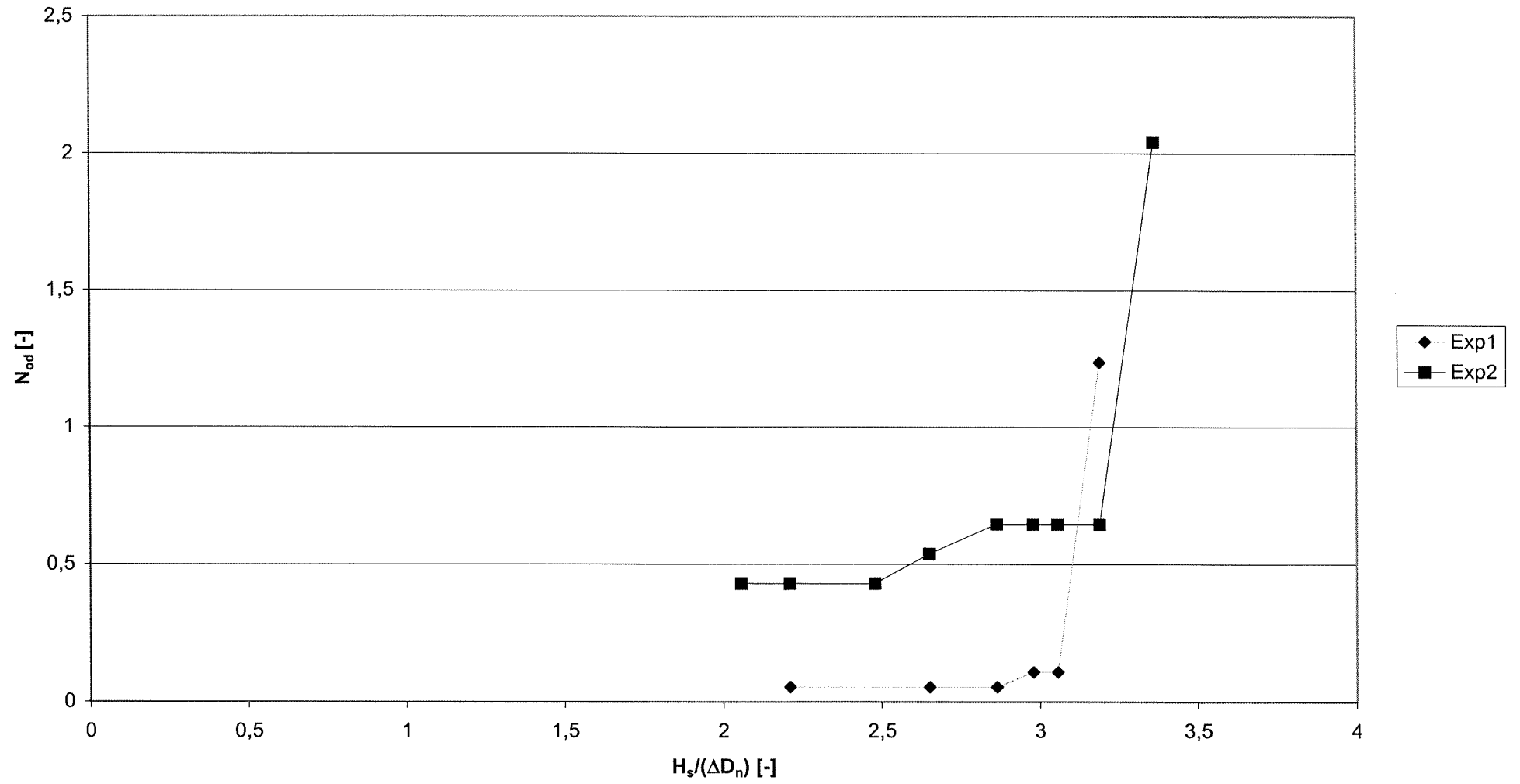
## **BIJLAGE VIII**

### **Schadeverloop**

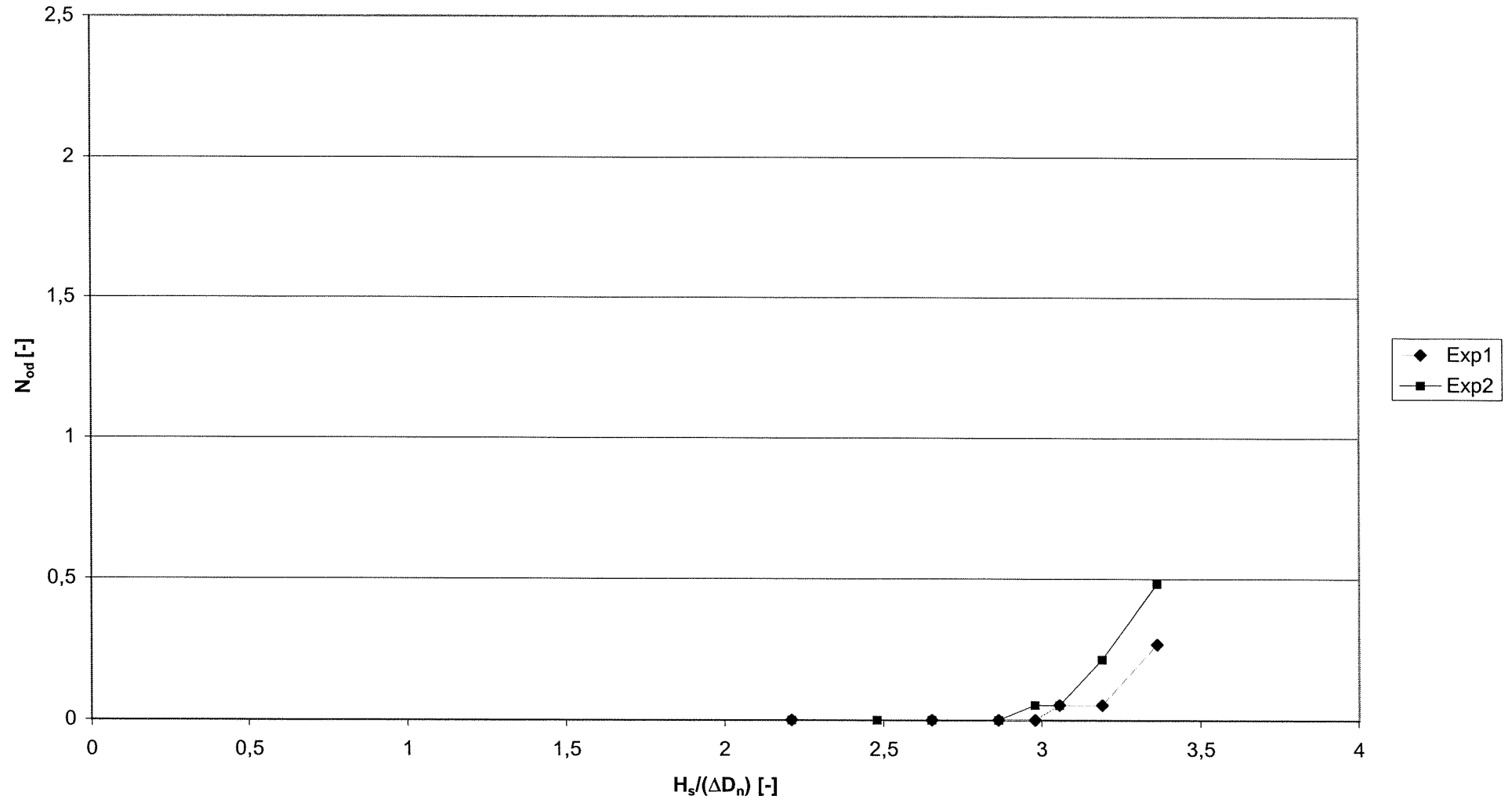
### Schadeverloop kubussen zonder verstevigde teen



### Schadeverloop kubussen; $n_v=0.4$

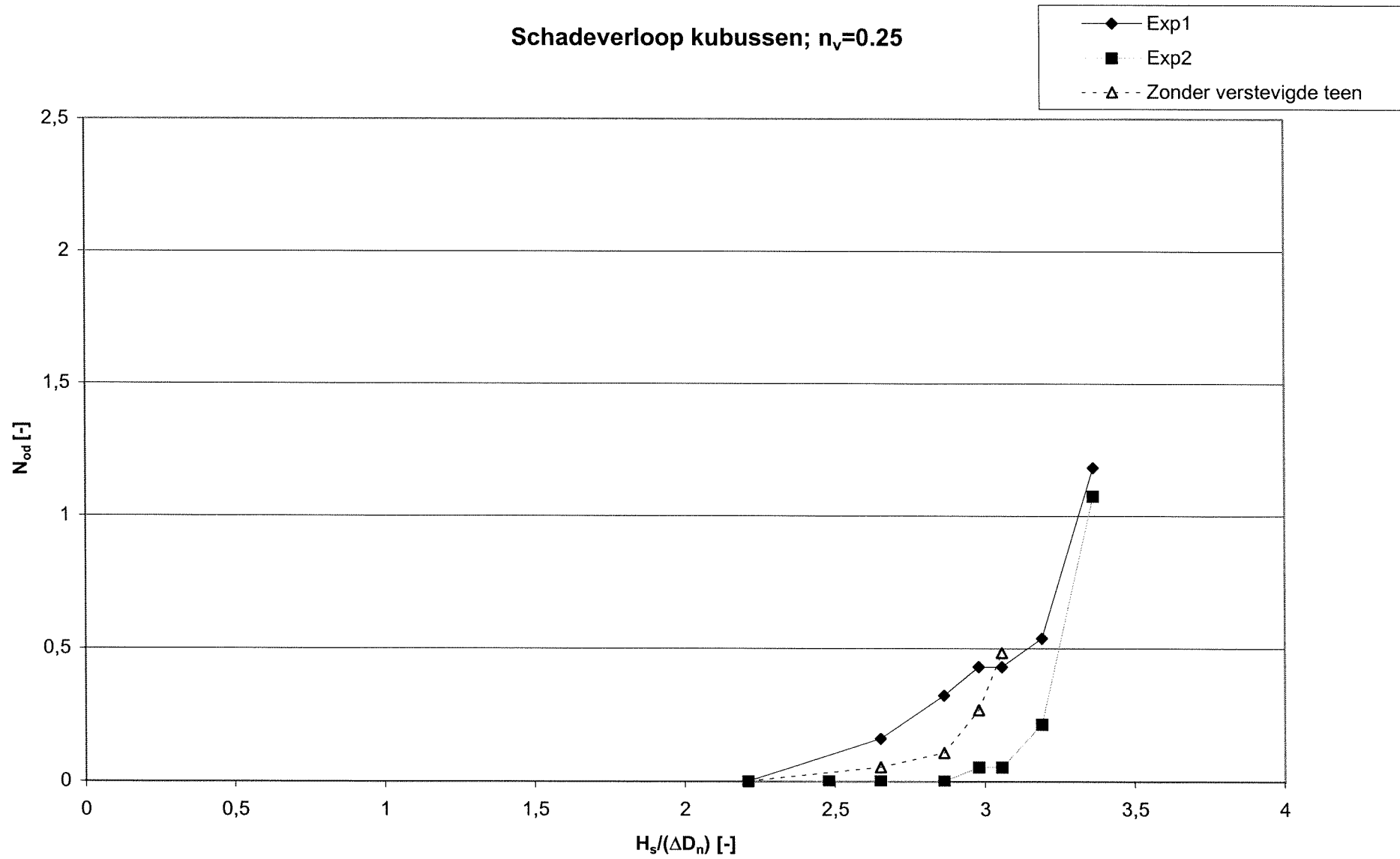


### Schadeverloop kubussen; $n_v=0.3$

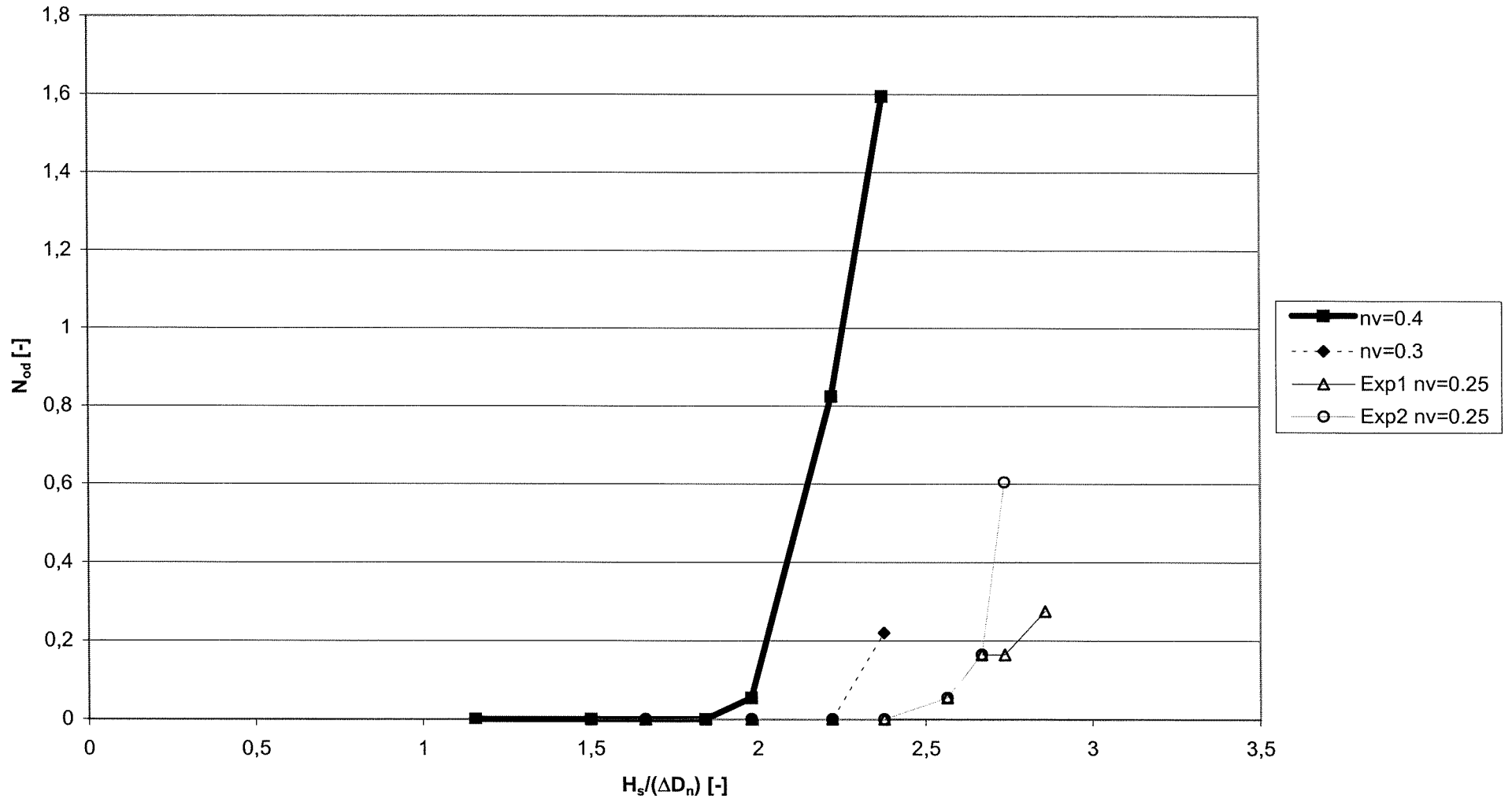




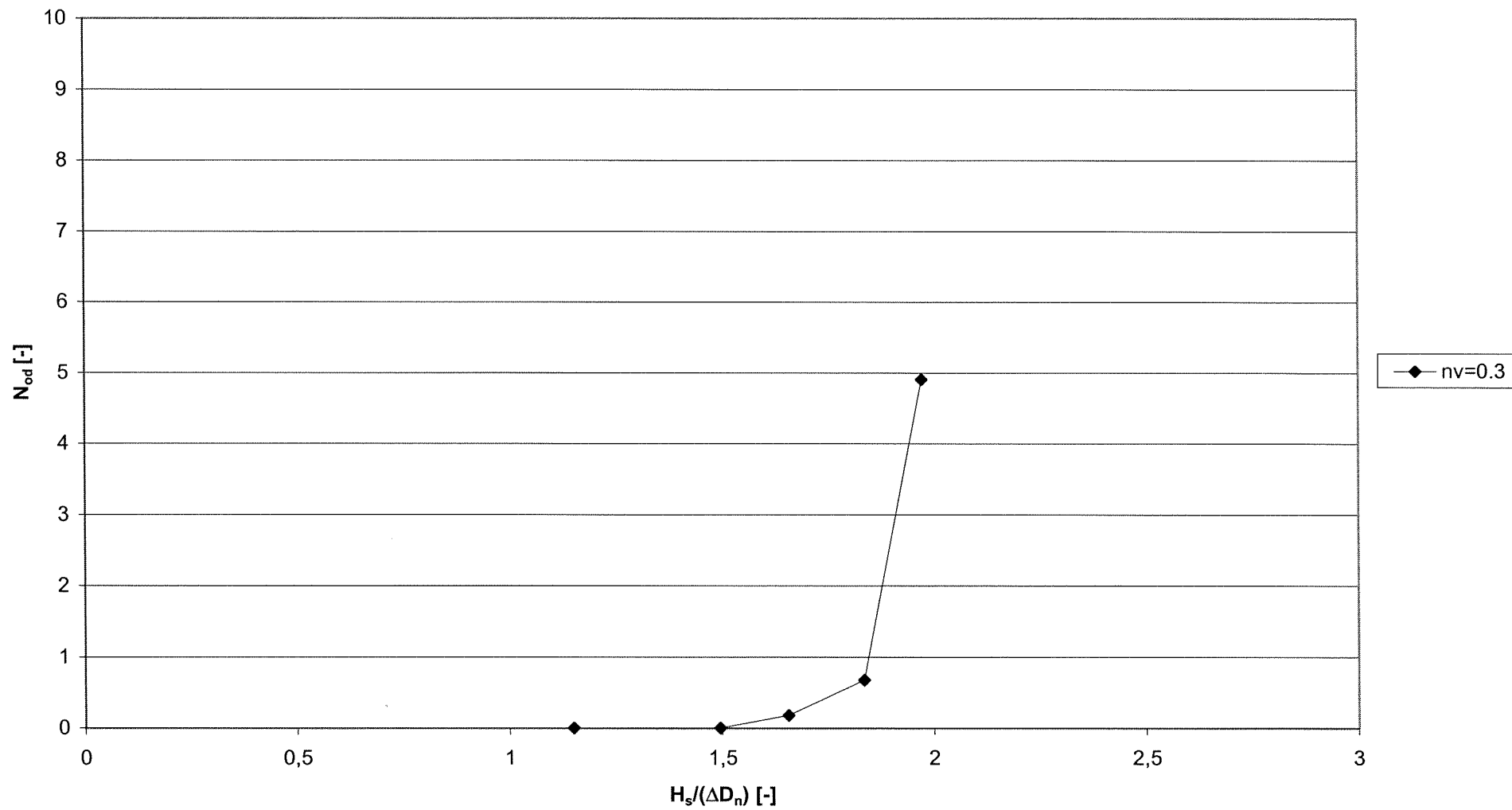
### Schadeverloop kubussen; $n_v=0.25$



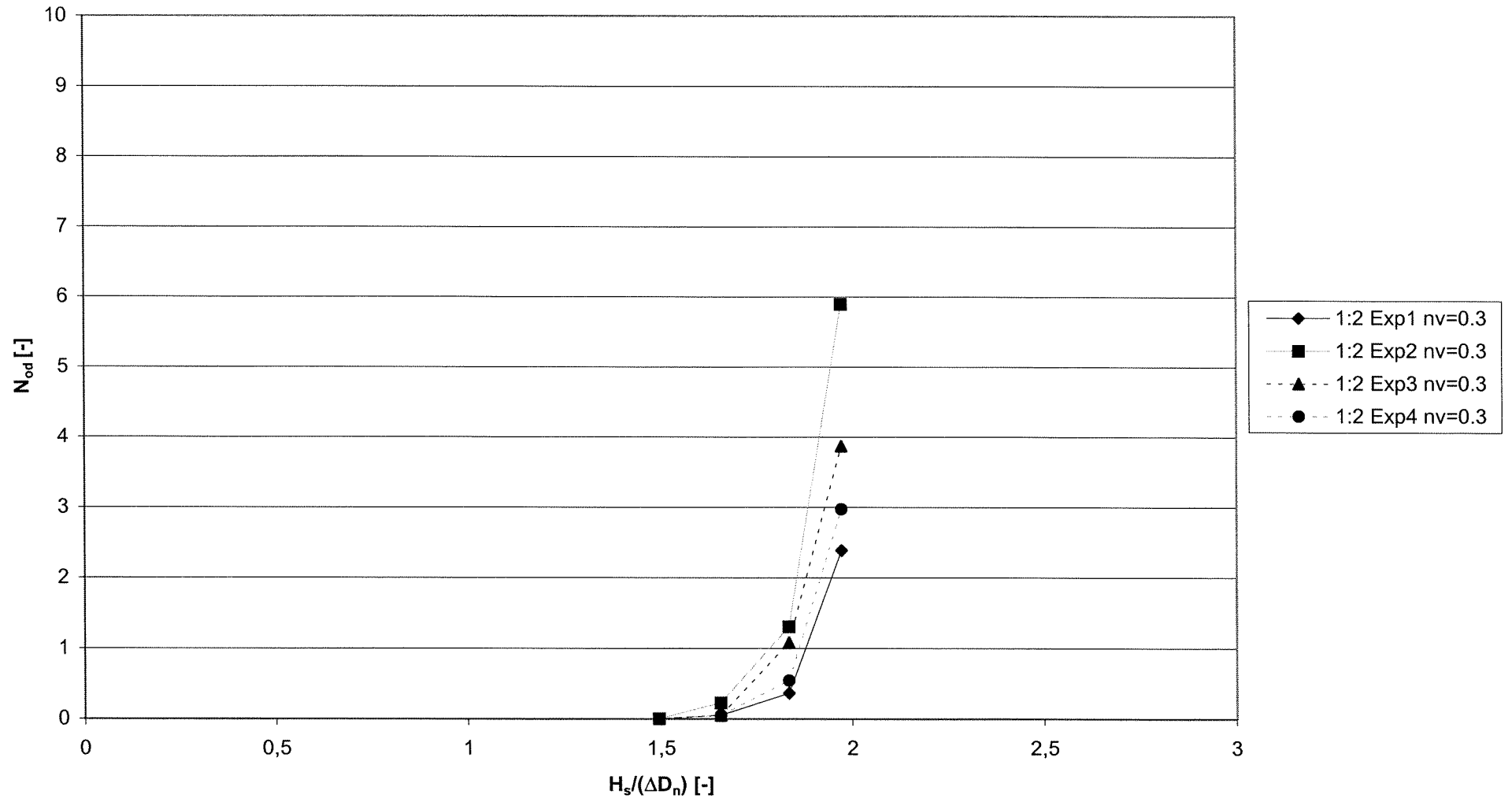
### Schadeverloop tetrapoden



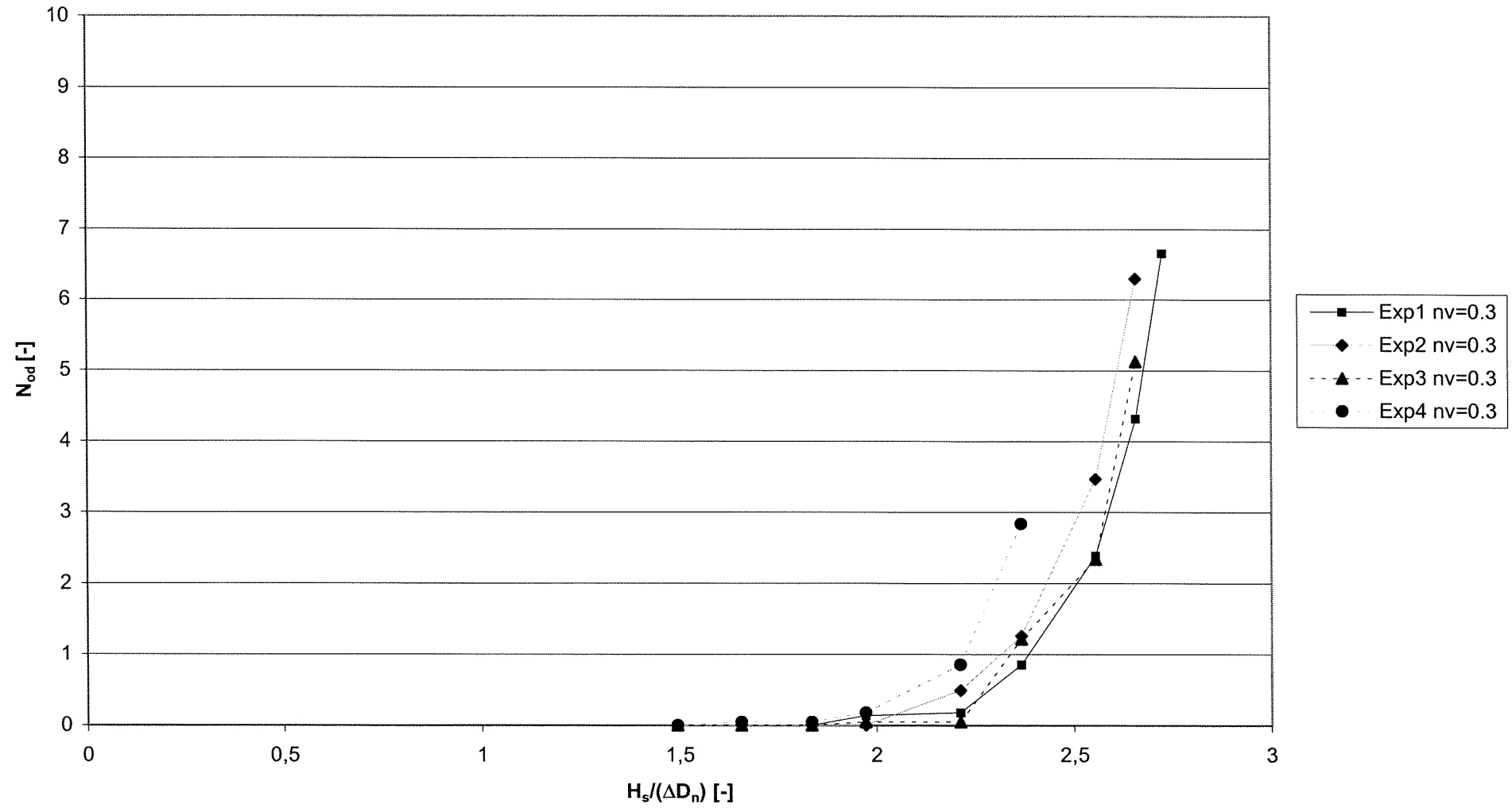
### Schadeverloop breuksteen; talud 1:1.5; normale plaatsing



### Schadeverloop breuksteen; talud 1:2; normale plaatsing

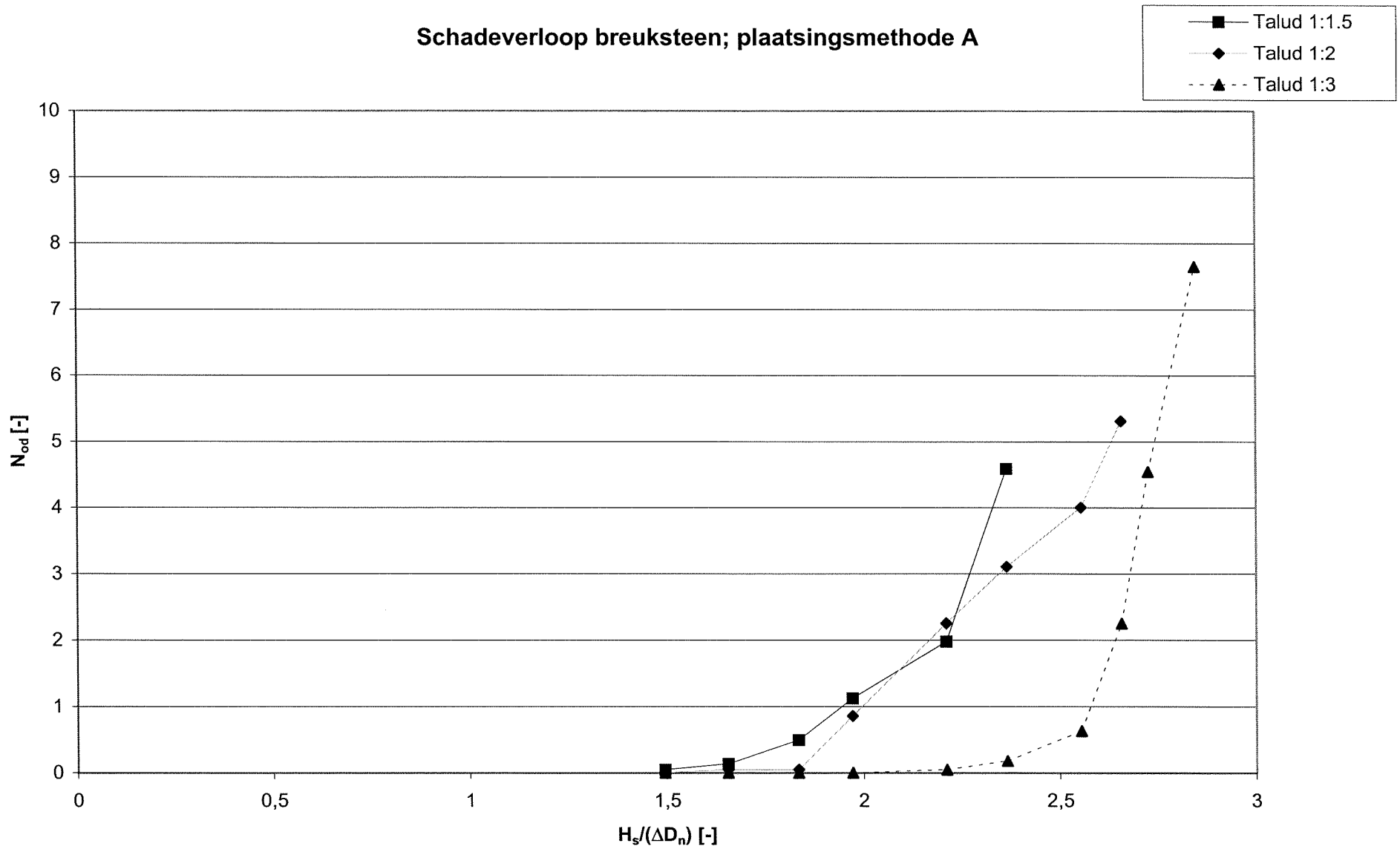


### Schadeverloop breuksteen; talud 1:3; normale plaatsing

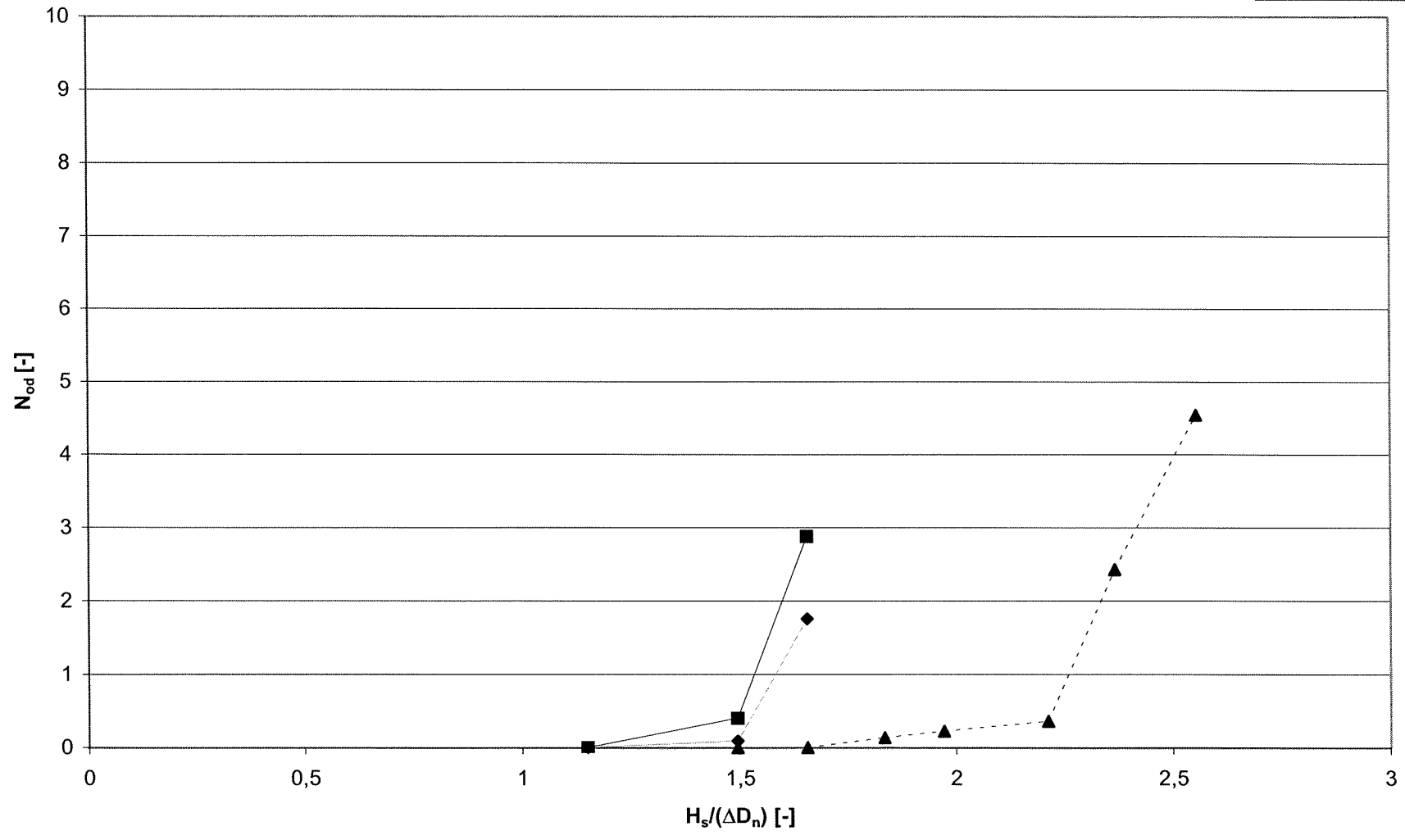
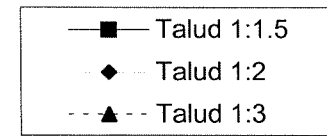




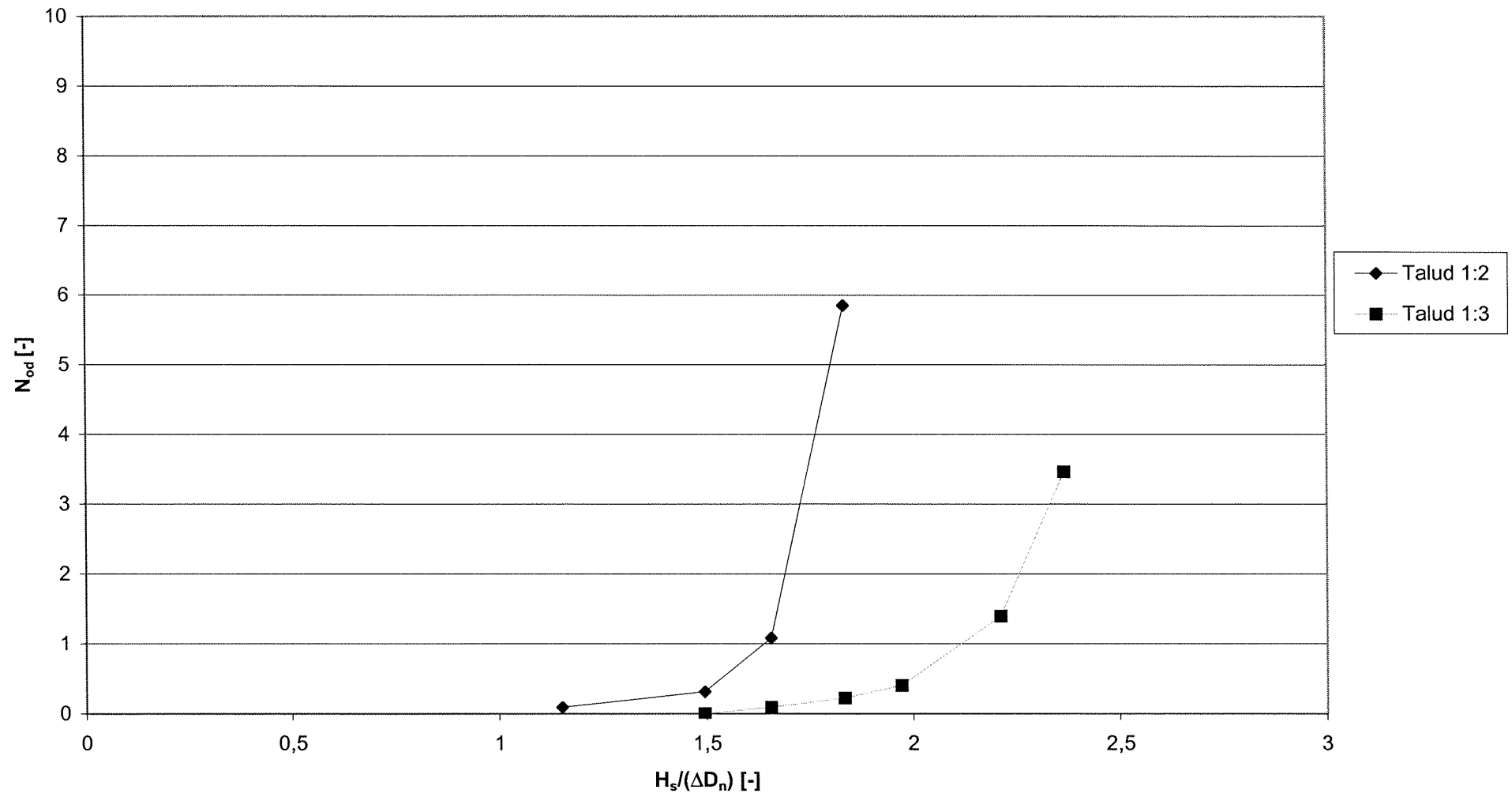
### Schadeverloop breuksteen; plaatsingsmethode A



### Schadeverloop breuksteen; plaatsingsmethode B



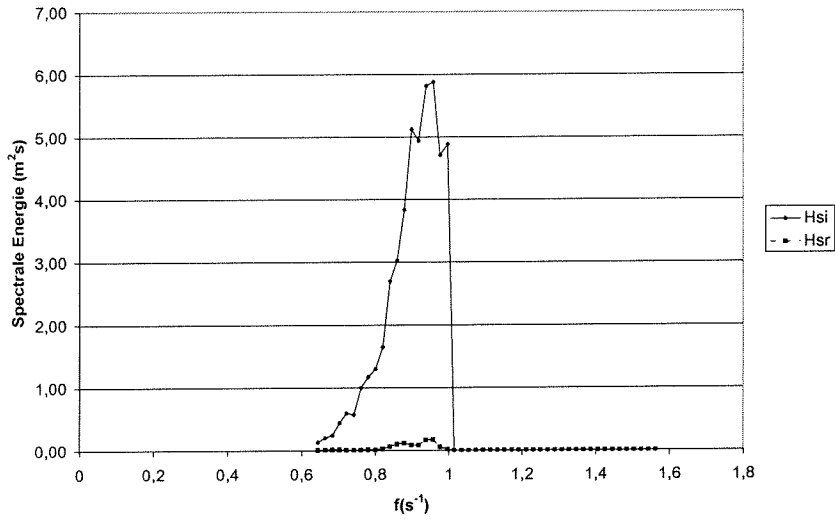
Schadeverloop breuksteen wijde gradering ( $D_{85}/D_{15}=1.63$ )



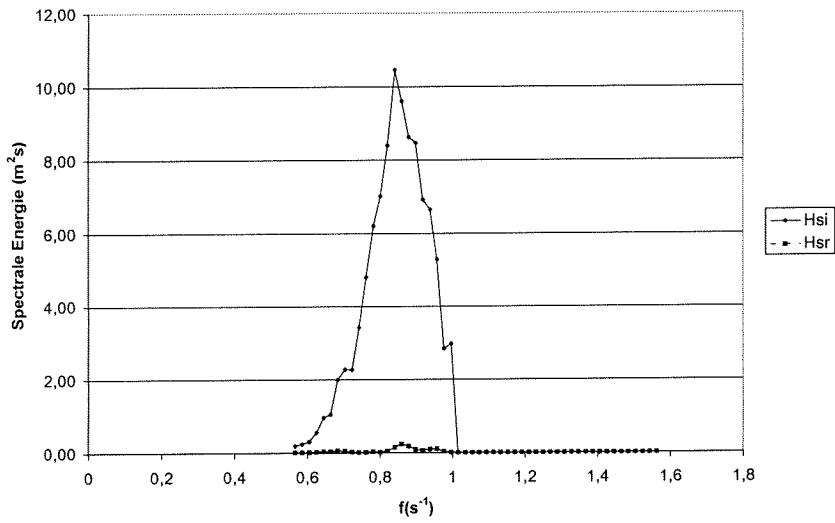
## **BIJLAGE IX**

### **Golfspectra**

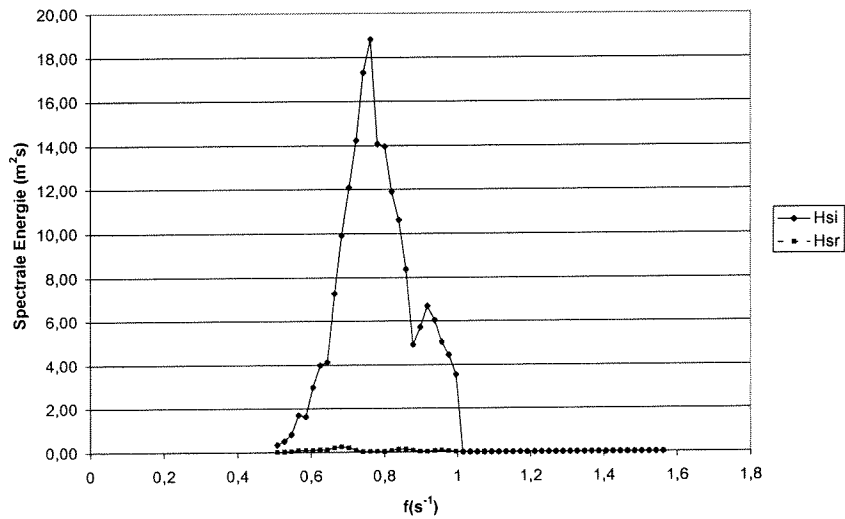
Proeven zonder constructie;  $H_{s1}=0,052$  m; GHM3+GHM4



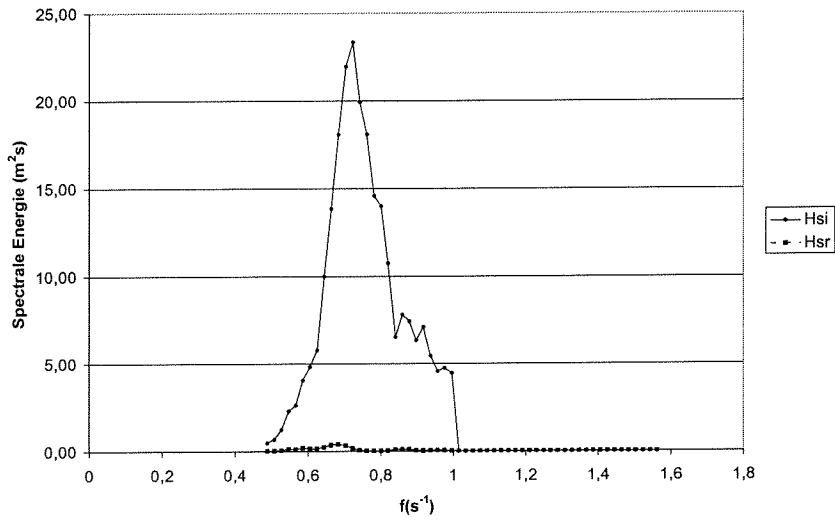
Proeven zonder constructie;  $H_{s1}=0,067$  m; GHM3+GHM4



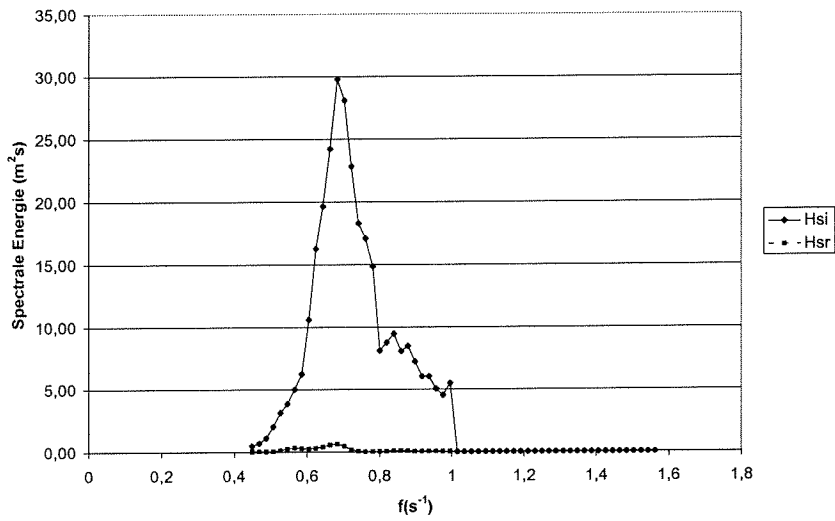
Proeven zonder constructie;  $H_{s1}=0,087$  m; GHM3+GHM4



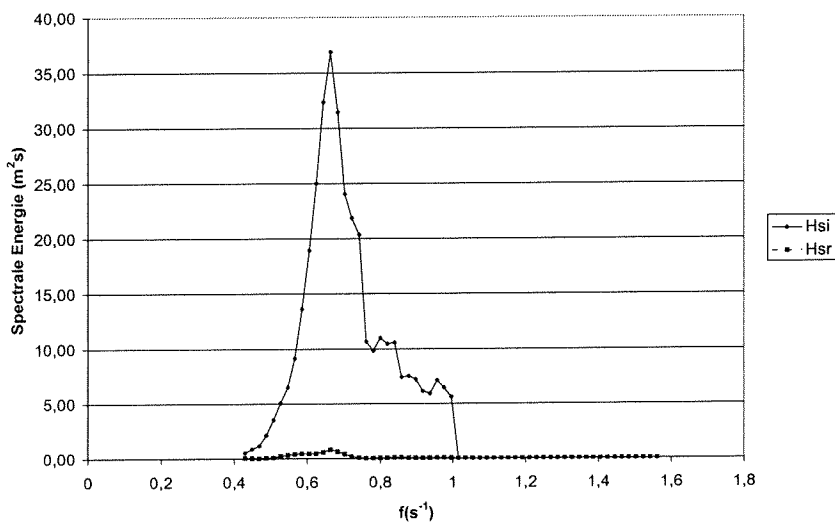
Proeven zonder constructie;  $H_{s1}=0,097$  m; GHM3+GHM4



Proeven zonder constructie;  $H_{s1}=0,107$  m; GHM3+GHM4

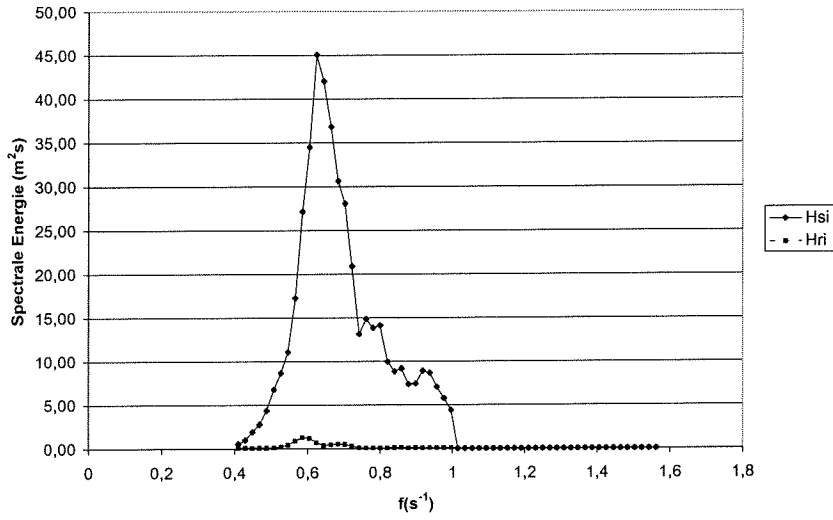


Proeven zonder constructie;  $H_{s1} = 0,115$  m; GHM3+GHM4

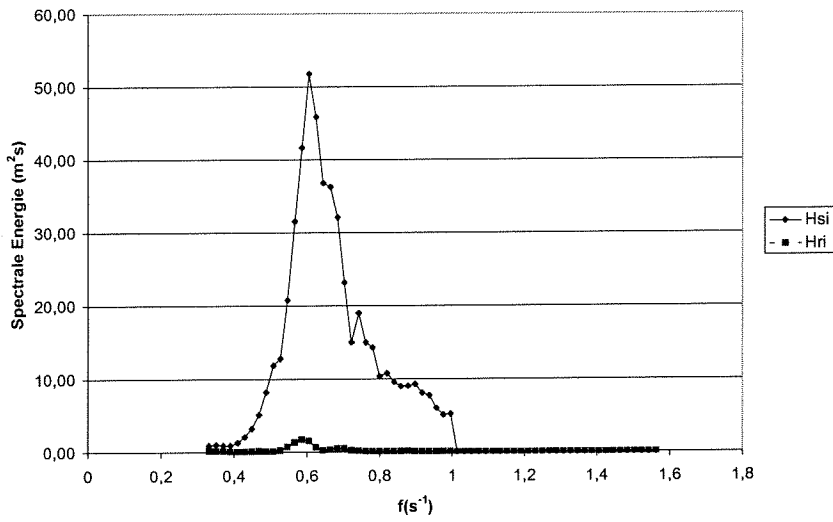




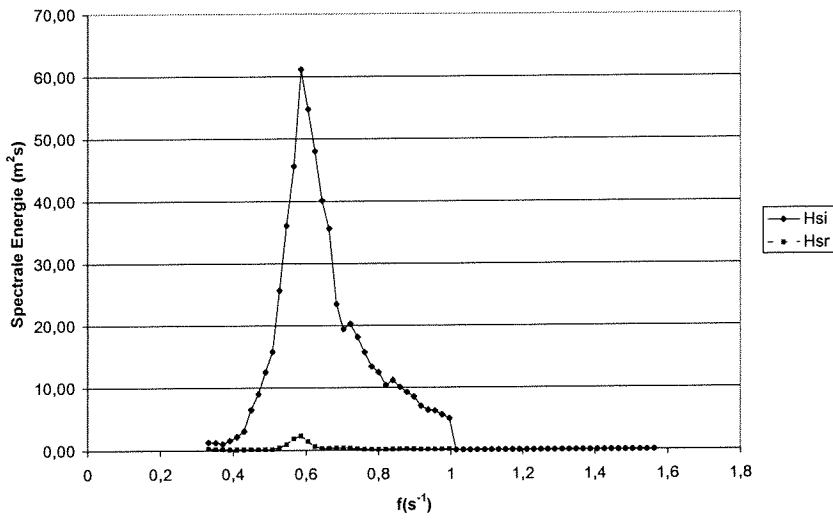
Proeven zonder constructie;  $H_{s1}=0,129$  m; GHM3+GHM4



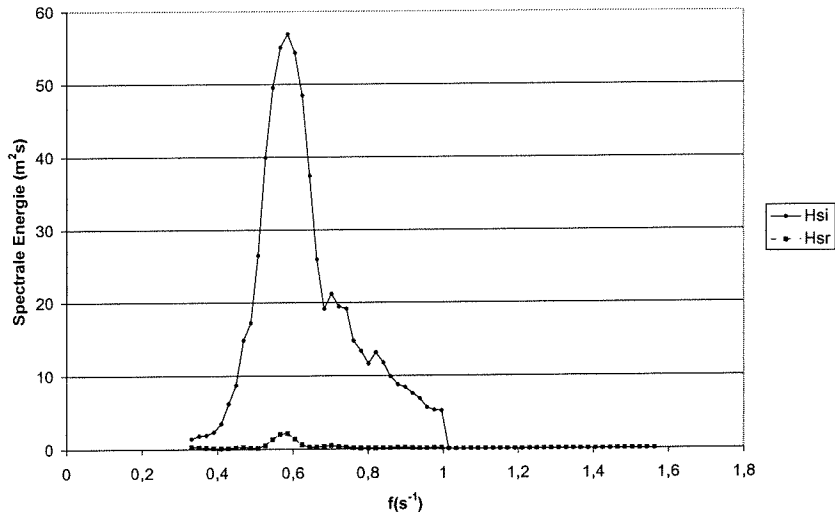
Proeven zonder constructie;  $H_{s1}=0,138$  m; GHM3+GHM4



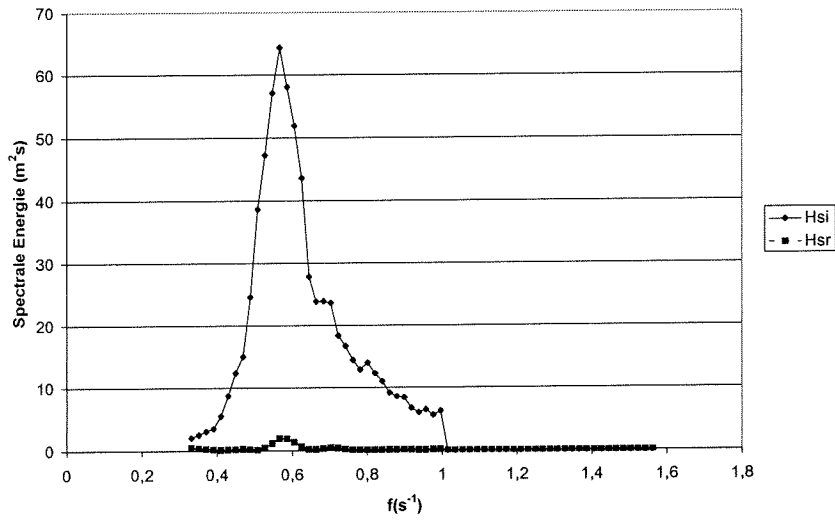
Proeven zonder constructie;  $H_{s1}=0,149$  m; GHM3+GHM4



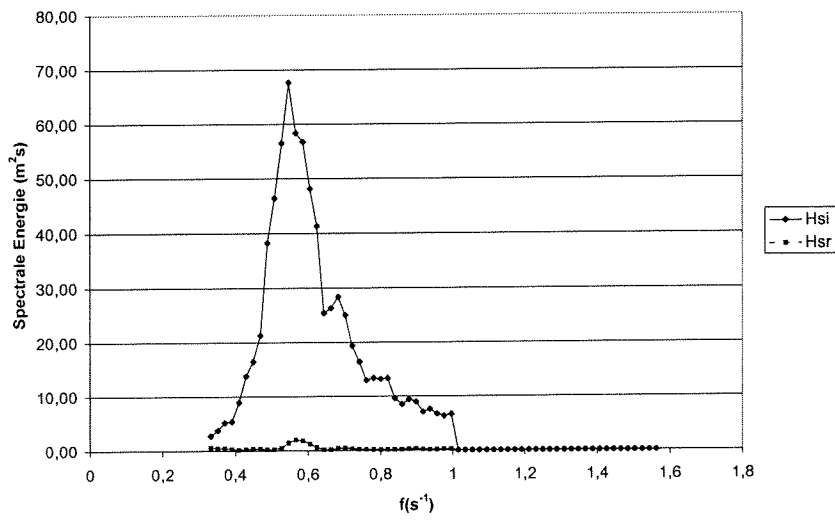
Proeven zonder constructie;  $H_{s1}=0,155$  m; GHM3+GHM4



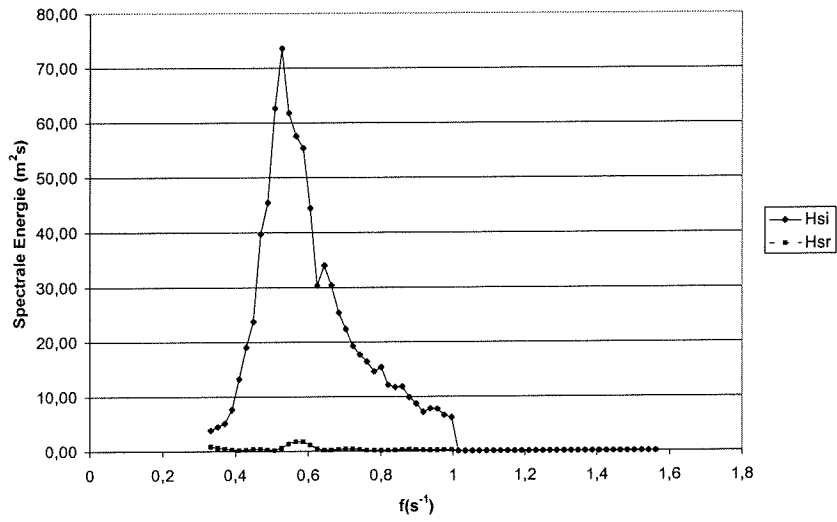
Proeven zonder constructie;  $H_{s1}=0,159$  m; GHM3+GHM4



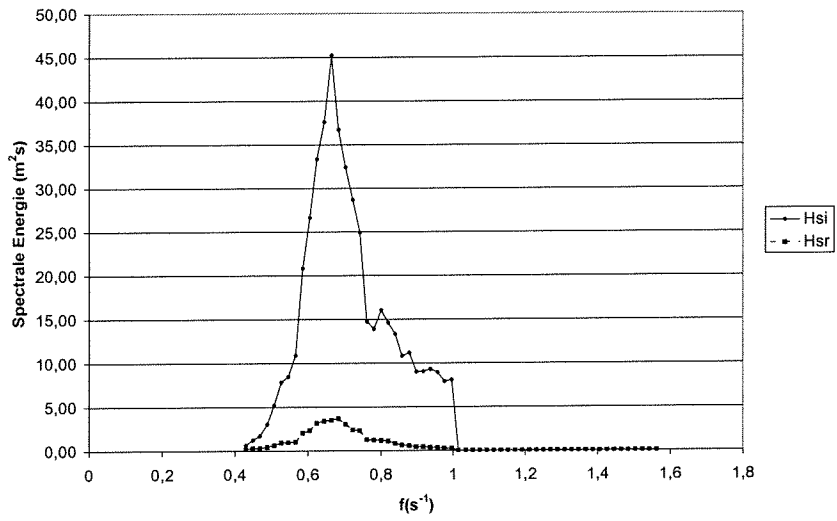
Proeven zonder constructie;  $H_{s1}=0,166$  m; GHM3+GHM4



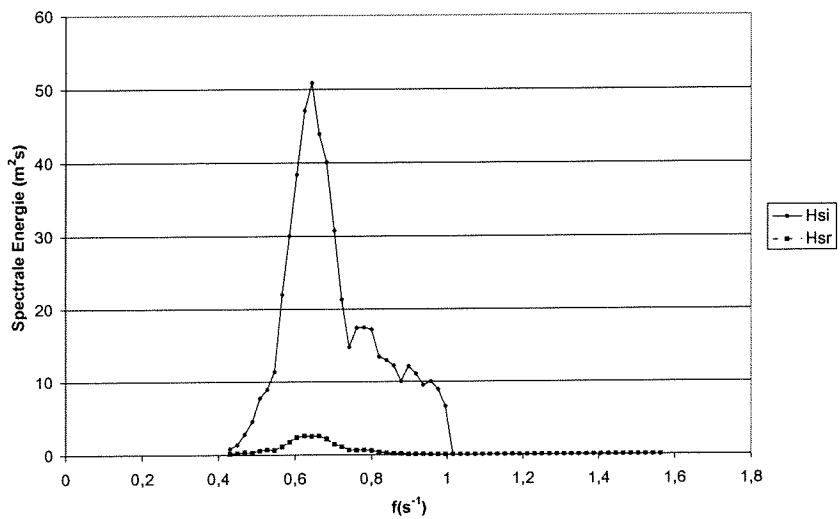
Proeven zonder constructie;  $H_{si}=0,175$  m; GHM3+GHM4



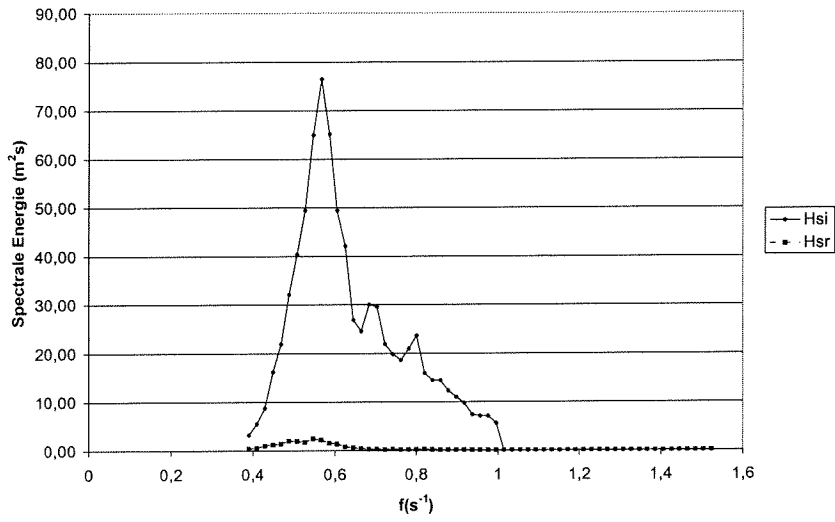
Breuksteen; talud 1:1,5  $n_v=0,3$ ;  $H_{si}=0,13$  m; GHM1+GHM2



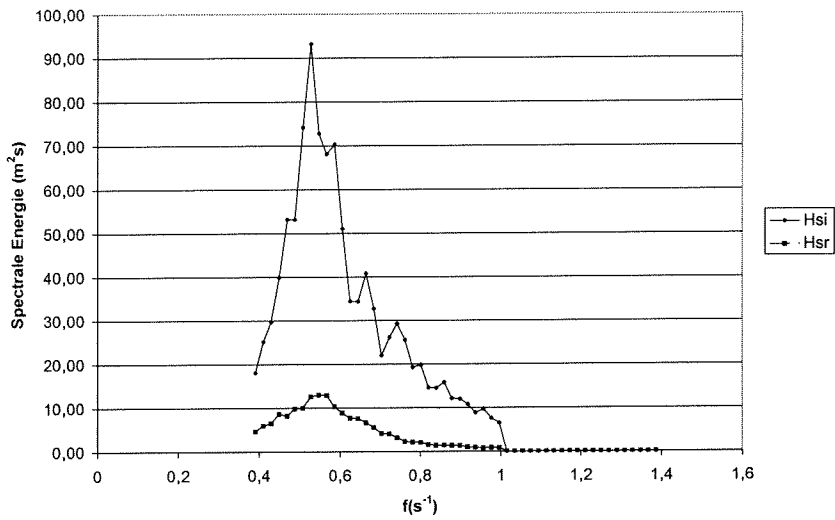
Breuksteen; talud 1:2;  $n_v=0,3$ ;  $H_{si}=0,138$  m; GHM1+GHM2



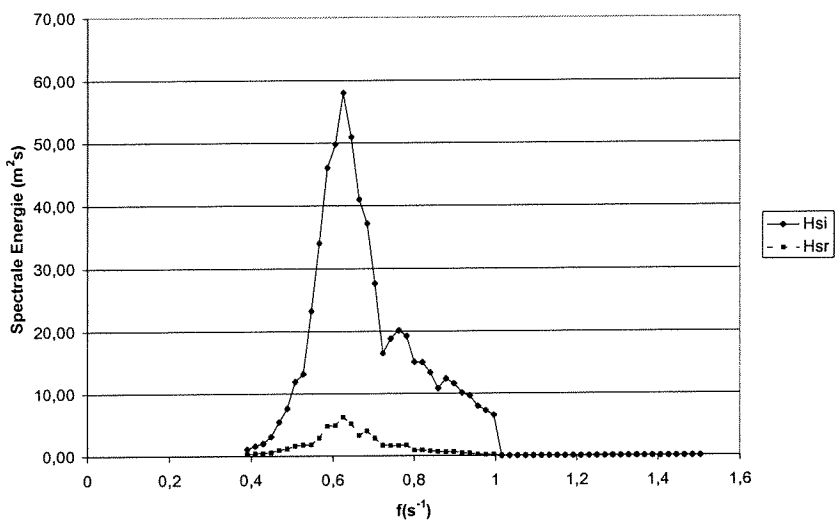
Breuksteen; talud 1:3;  $n_v=0,3$ ;  $H_{s1}=0,165$  m; GHM1+GHM2



Kubussen;  $n_v=0,25$ ;  $H_{s1}=0,185$  m; GHM1+GHM2



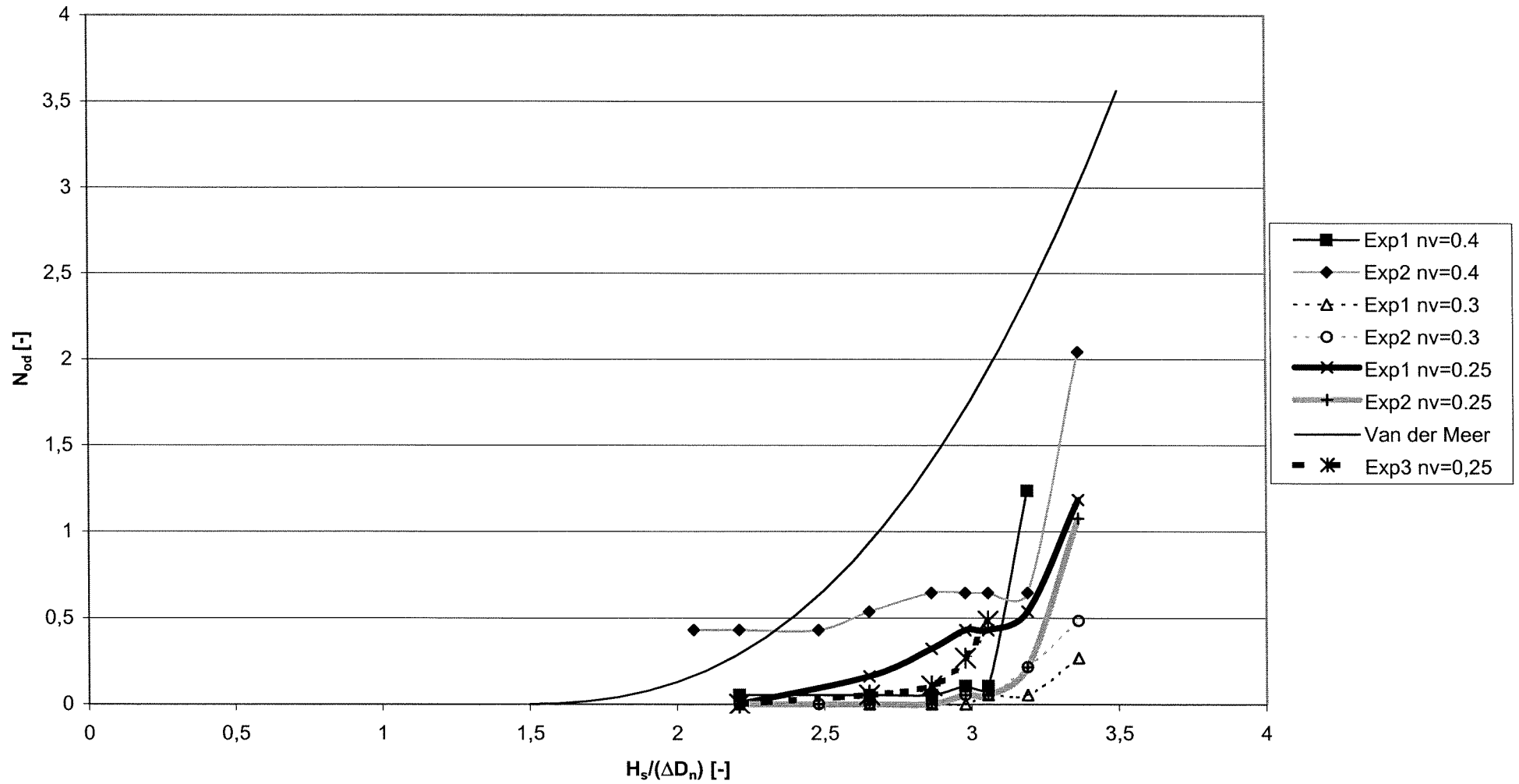
Tetrapoden;  $n_v=0,4$ ;  $H_{s1}=0,145$  m; GHM1+GHM2



## **BIJLAGE X**

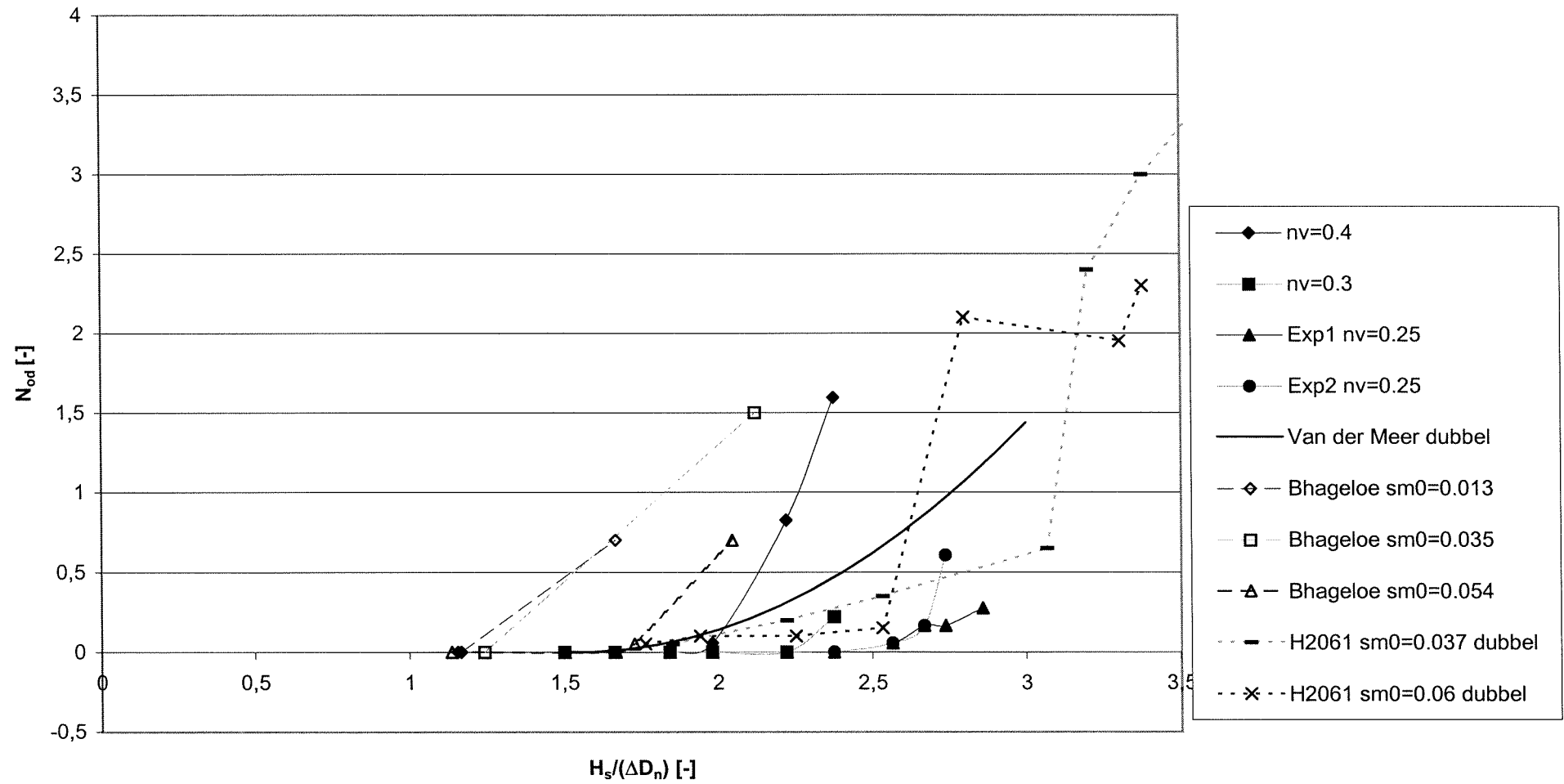
### **Vergelijking schadeverloop met voorgaande onderzoeken**

**Schadeverloop kubussen met verstevigde teen**  
**Van der Meer:  $H_s/(\Delta D_n) = 0.87(9N_o^{0.4}/N^{0.3} + 1.35) * \xi^{0.2}$  (Van der Meer 1986<sup>a</sup>)**

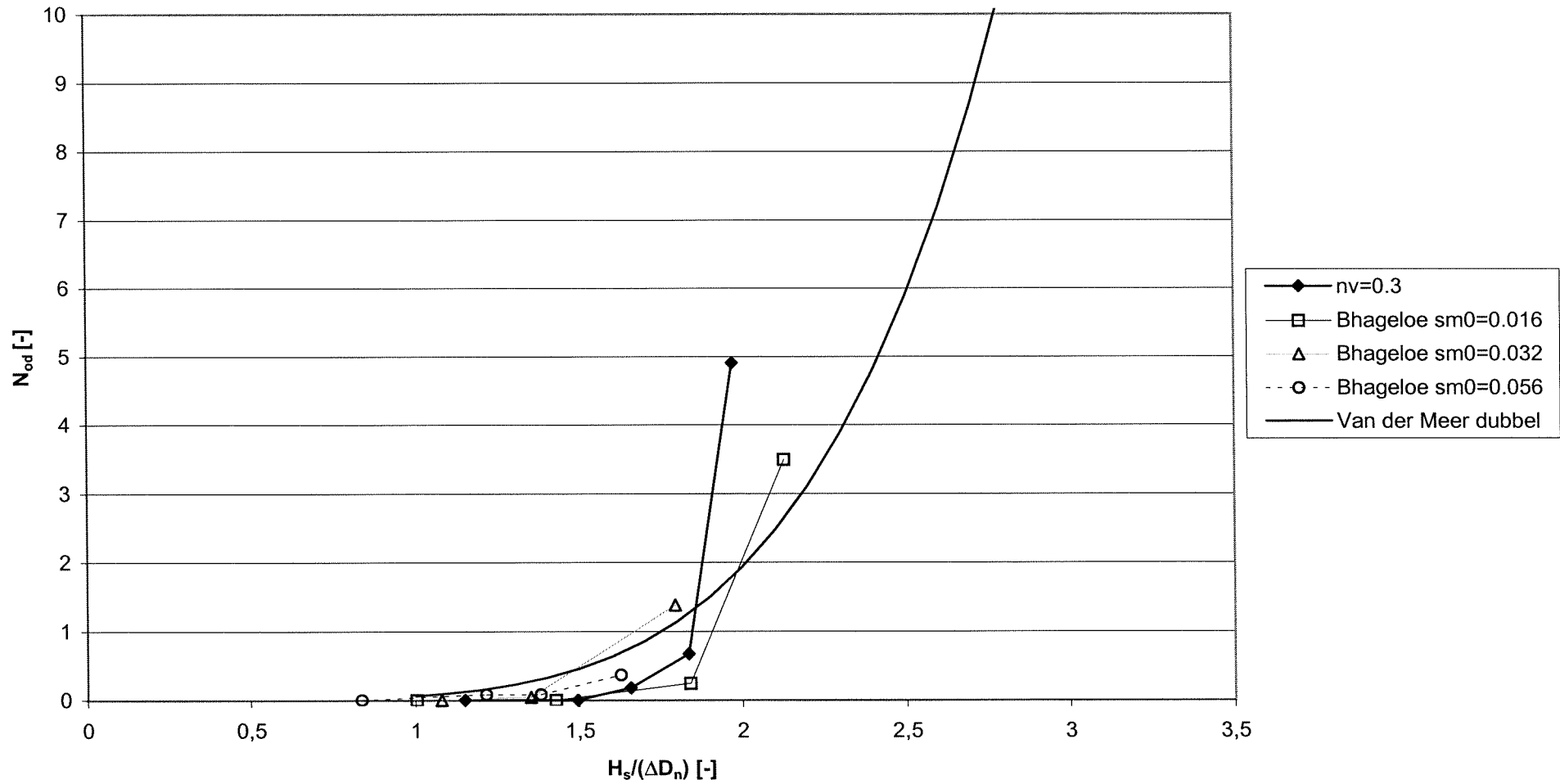




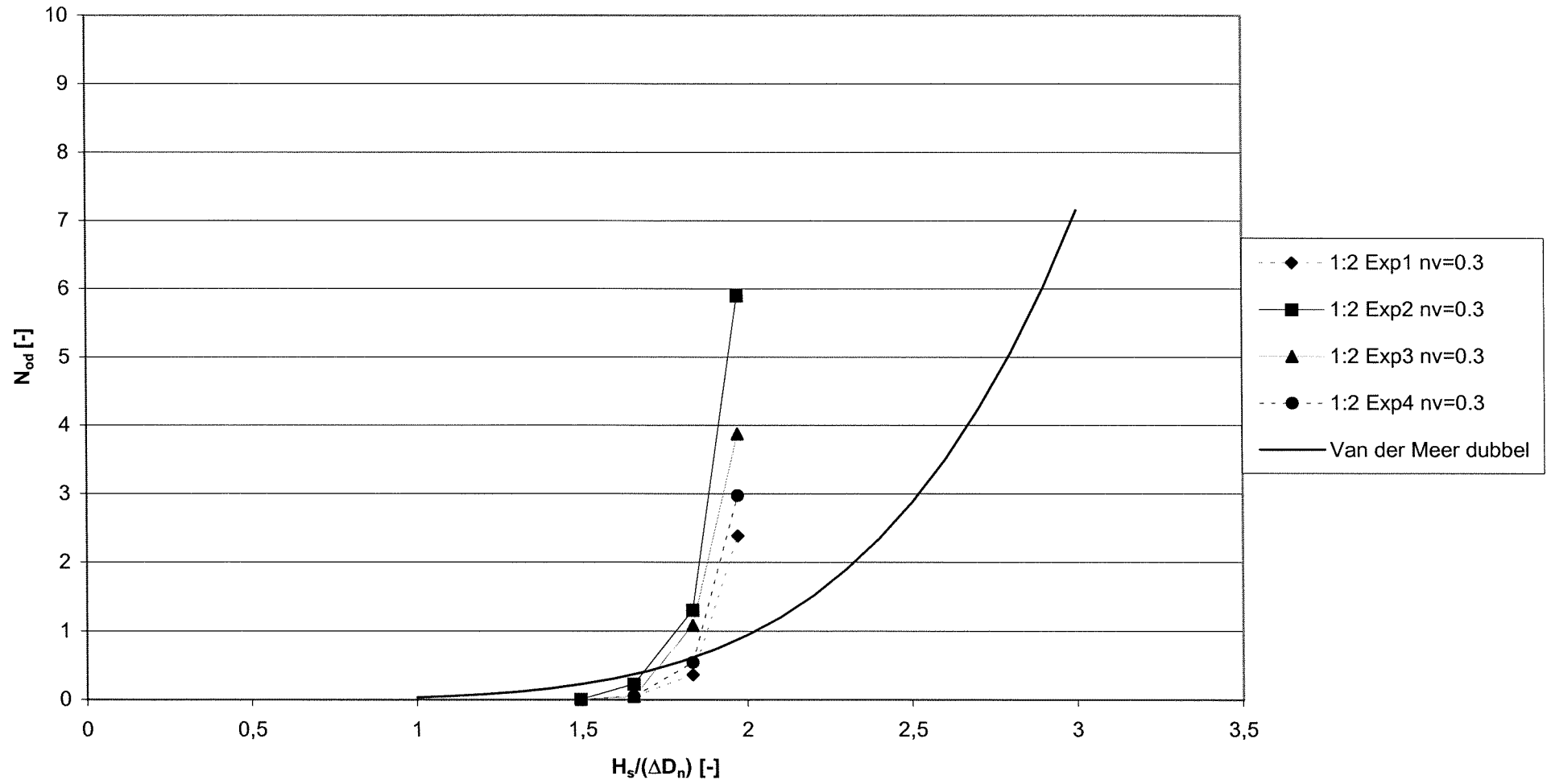
**Schadeverloop tetrapoden**  
**Van der Meer:  $H_s/(\Delta D_n) = (4.4(N_o/N^{0.5})^{0.5} + 1) * \xi^{0.4}$  (Van der Meer 1987<sup>b</sup>)**



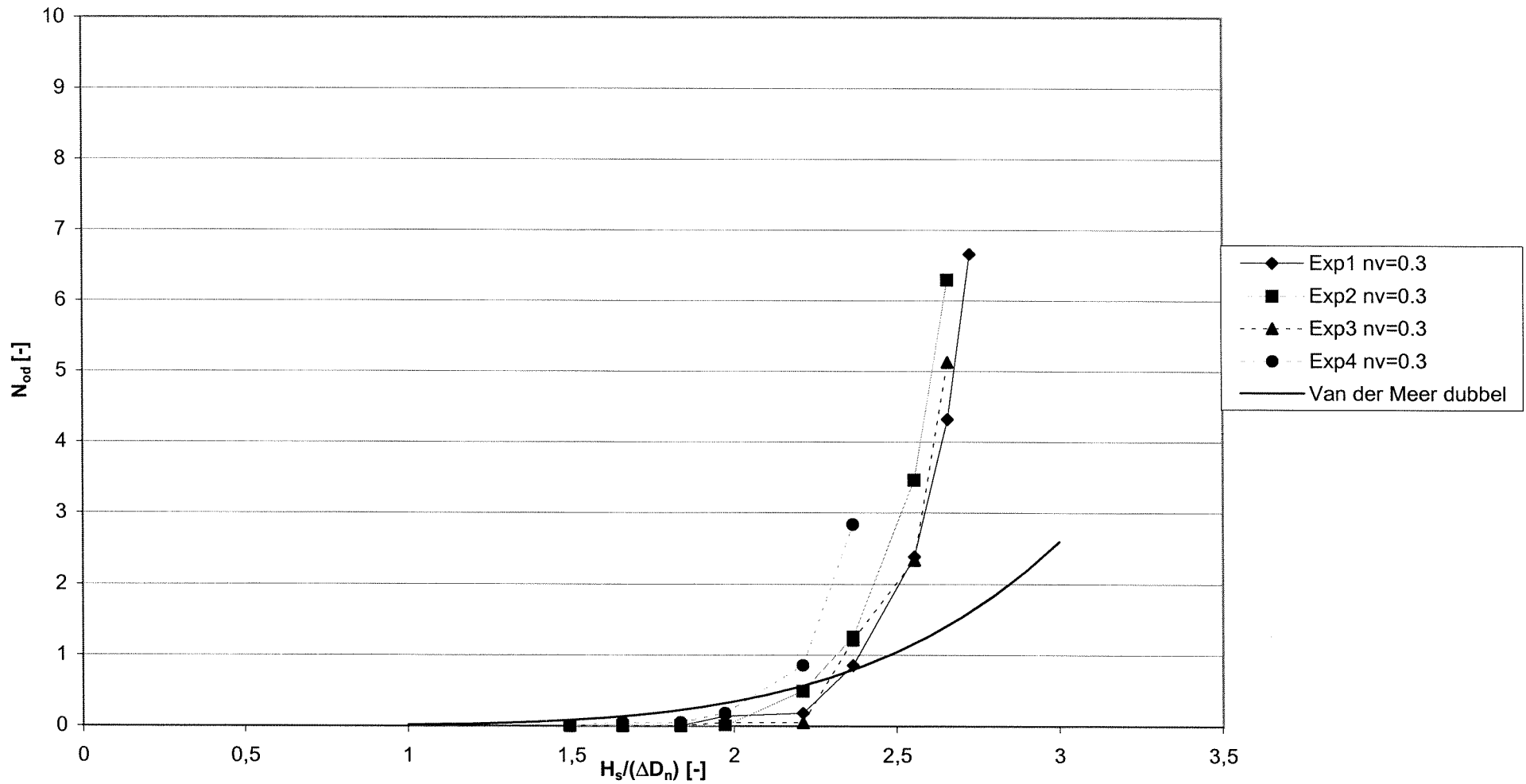
Vergelijking schadeverloop breuksteen; talud 1:1.5 met Bhageloe  
 Van der Meer:  $H_s/(\Delta D_{n50})=6.2P^{0.18}(S/N^{0.5})^{0.2}1/\xi_m^{0.5}$  (Van der Meer 1988)



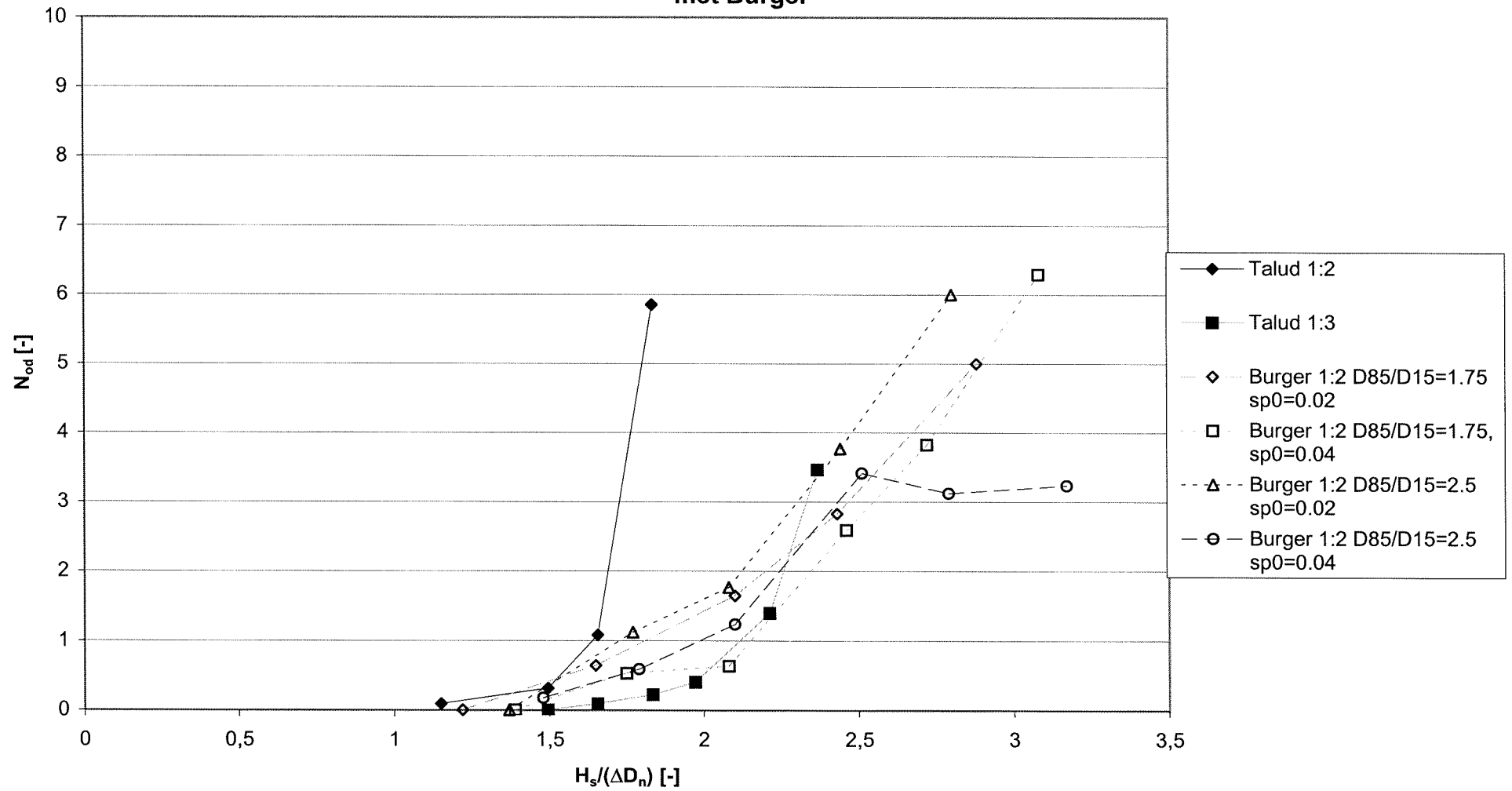
**Schadeverloop breuksteen; talud 1:2; normale plaatsing**  
**Van der Meer:  $H_s/(\Delta D_{n50})=6.2P^{0.18}(S/N^{0.5})^{0.2}1/\xi_{sm}^{0.5}$  (Van der Meer 1988)**



Schadeverloop breuksteen; talud 1:3; normale plaatsing  
 Van der Meer:  $H_s/(\Delta D_{n50})=6.2P^{0.18}(S/N^{0.5})^{0.2}1/\xi_{sm}^{0.5}$  (Van der Meer 1988)



Vergelijking schadeverloop breuksteen wijde gradering ( $D_{85}/D_{15}=1.63$ ) met Burger



## **BIJLAGE XI**

### **Berekening stabiliteit tegen oplichten element**



De doorlatendheid van de 'armour layer' kan berekend worden gebruik makend van de vergelijkingen 6.2 tot en met 6.8. De resultaten van deze berekening zijn vermeld in tabel XI.1.

Tabel XI.1: Berekening doorlatendheid 'armour layer'

Parameter	$n_v = 0,3$	$n_v = 0,25$	Prototype $n_v = 0,25$
$D_n$ [m]	0,043	0,043	2,2
$r_{min}$ [m]	0,006	0,006	0,3
$s$ [m]	0,005	0,004	0,2
$l$ [m]	4,3	5,4	5,5
$v$ [ $m^2/s$ ]	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$
$a_f$ [s/m]	2,06	2,06	$8,2 \cdot 10^{-4}$
$b_f$ [ $s^2/m^2$ ]	207,6	207,6	4,15
$k_f$ [m/s]	0,065	0,065	0,49
$n_f$ [-]	0,3	0,3	0,3
$d_f$ [m]	0,04	0,04	2
$d_a$ [m]	0,09	0,09	4,6
$i_a$ [-]	1	1	1
$a_a$ [s/m]	0,07	0,28	$1,2 \cdot 10^{-4}$
$b_a$ [ $s^2/m^2$ ]	53,9	91,9	1,9
<b><math>k_a</math> [m/s]</b>	<b>0,14</b>	<b>0,10</b>	<b>0,73</b>

Met behulp van de methode van Wolsink-Banach kunnen de verschillende bijdragen voor wrijving, traagheid en toestroming worden berekend. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de vergelijkingen A.1, A.2, A.9, A.10 en A.12 De resultaten zijn in tabel XI.2 weergegeven.

Tabel XI.2: Bijdragen voor wrijving, traagheid en toestroming

Parameter	$n_v = 0,3$	$n_v = 0,25$	Prototype $n_v = 0,25$
$\Lambda$ [m]	0,04	0,05	2,49
$\lambda$ [m]	0,02	0,03	1,37
$\Gamma_{s1}$ [-]	1,34	1,34	1,34
$\Gamma_{s2}$ [-]	4,26	4,26	4,33
$\Gamma_2$ [-]	3,26	3,26	3,33
$\Gamma_s$ [-]	4,60	4,60	4,67
$\Gamma_b$ [-]	1,07	1,07	1,07

Met deze gegevens en gebruikmakend van de vergelijkingen A.8, A.11, A.13 tot en met A.16 kunnen per golfhoogte de sterkte R en de belasting S worden berekend. De resultaten van deze berekeningen zijn in tabel XI.3 tot en met XI.5 weergegeven.

Tabel XI.3: Stabiliteitsberekening voor  $n_v = 0,3$ ; sterkte en belasting

H[m]	$T_{m0}$ [s]	$\phi_w$ [ $10^{-2}$ m]	R [ $10^{-1}$ m]	S [ $10^{-2}$ m]	R/S[-]
0,10	1,13	2,0	2,0	1,9	10,4
0,11	1,18	2,1	2,0	1,9	10,2
0,12	1,24	2,1	2,0	2,0	10,0
0,13	1,29	2,1	2,0	2,0	9,9
0,14	1,34	2,2	2,0	2,0	9,8
0,15	1,39	2,2	2,0	2,1	9,7
0,16	1,43	2,2	2,0	2,1	9,6
0,17	1,48	2,2	2,0	2,1	9,5
0,18	1,52	2,2	2,0	2,1	9,5

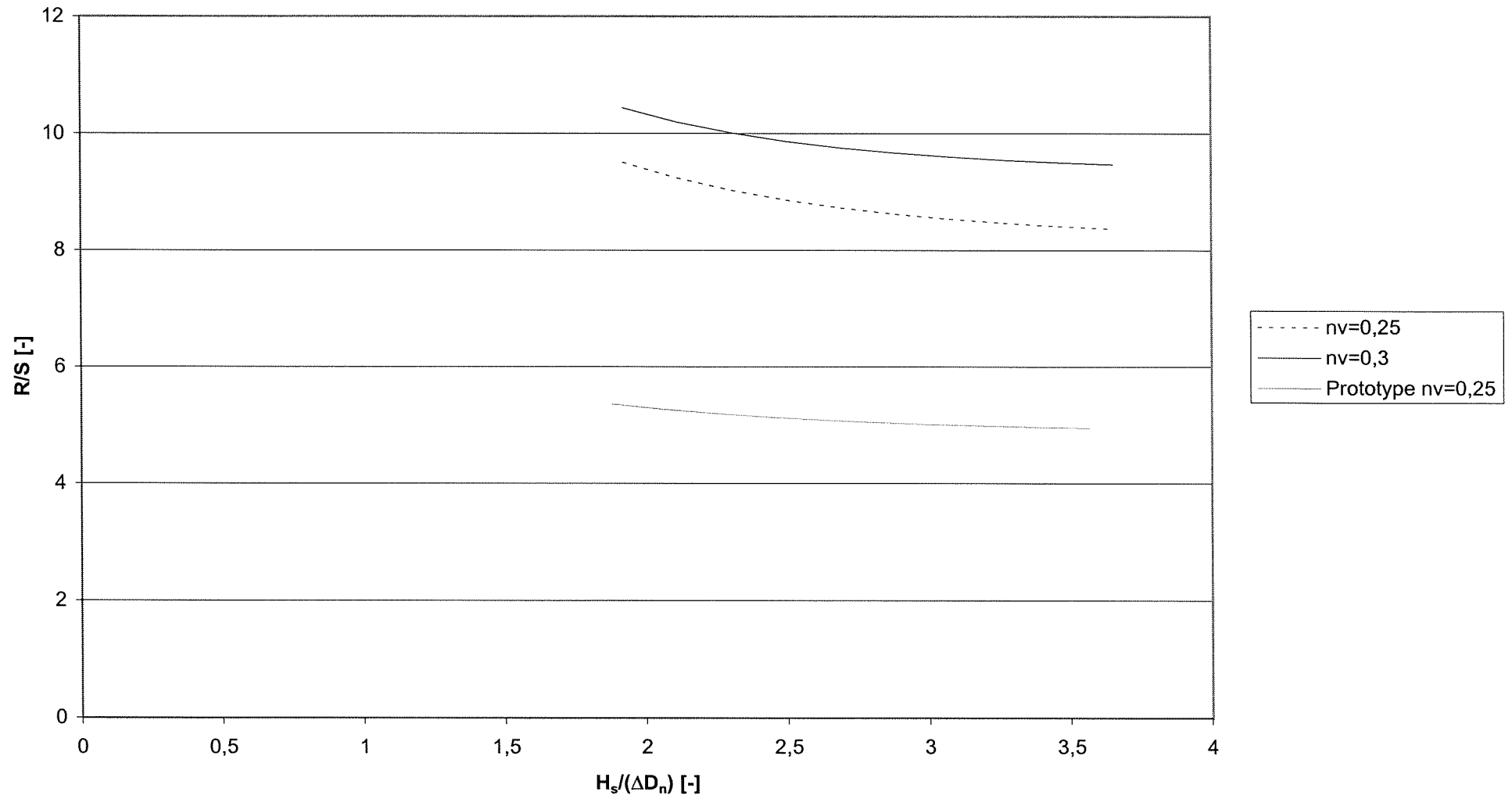
Tabel XI.4: Stabiliteitsberekening voor  $n_v = 0,25$ ; sterkte en belasting

H[m]	$T_{m0}$ [s]	$\phi_w$ [ $10^{-2}$ m]	R [ $10^{-1}$ m]	S [ $10^{-2}$ m]	R/S[-]
0,10	1,13	2,2	2,0	2,1	9,5
0,11	1,18	2,3	2,0	2,1	9,2
0,12	1,24	2,4	2,0	2,2	9,0
0,13	1,29	2,4	2,0	2,2	8,9
0,14	1,34	2,4	2,0	2,3	8,7
0,15	1,39	2,5	2,0	2,3	8,6
0,16	1,43	2,5	2,0	2,3	8,5
0,17	1,48	2,5	2,0	2,4	8,5
0,18	1,52	2,5	2,0	2,4	8,4

Tabel XI.5: Stabiliteitsberekening voor prototype  $n_v = 0,25$ ; sterkte en belasting

H[m]	$T_{m0}$ [s]	$\phi_w$ [m]	R[m]	S[m]	R/S[-]
5	8,0	2,1	10,3	1,9	5,4
5,5	8,4	2,1	10,3	2,0	5,3
6	8,8	2,1	10,3	2,0	5,2
6,5	9,1	2,1	10,3	2,0	5,1
7	9,5	2,2	10,3	2,0	5,1
7,5	9,8	2,2	10,3	2,0	5,0
8	10,1	2,2	10,3	2,1	5,0
8,5	10,4	2,2	10,3	2,1	5,0
9	10,7	2,2	10,3	2,1	5,0

### Vergelijking experimenten met hypothetische golfbreker met betrekking tot oplichting



## **BIJLAGE XII**

### **Berekening inklemming**

Voor de berekening van de inklemming wordt gebruik gemaakt van de vergelijkingen A.5 tot en met A.7. Gerekend wordt in het punt van maximale golfterugloop, omdat hier de minst stabiele situatie optreedt. De resultaten van deze berekening zijn weergegeven in tabel XII.1 en XII.2. In deze berekening is de wrijvingshoek  $\delta$  gelijk gesteld aan  $25^\circ$  en is de gelijkmatig verdeelde belasting  $q$  in het schaalmodel gelijk aan  $40,1 \text{ N/m}$  en in het prototype gelijk aan  $10^5 \text{ N/m}$ .

Tabel XII.1: Berekening van de optredende schuifkracht voor schaalmodel

H[m]	x[m]	$N_{\text{gem}}$ [N/m]	$N_{\text{max}}$ [N/m]	$F_{s,\text{min}}$ [N]	$F_{s,\text{gem}}$ [N]	$F_{s,\text{max}}$ [N]
0,1	0,54	28,2	48,1	0,15	3,40	4,45
0,11	0,55	28,6	48,9	0,15	3,43	4,49
0,12	0,56	29,1	49,7	0,15	3,46	4,52
0,13	0,57	29,6	50,5	0,15	3,49	4,56
0,14	0,57	30,0	51,3	0,15	3,51	4,59
0,15	0,58	30,5	52,1	0,15	3,54	4,63
0,16	0,59	30,9	52,9	0,15	3,57	4,66
0,17	0,60	31,4	53,7	0,15	3,59	4,70
0,18	0,61	31,9	54,5	0,15	3,62	4,73

Tabel XII.2: Berekening van de optredende schuifkracht voor prototype

H[m]	x[m]	$N_{\text{gem}}$ [ $10^5 \text{ N/m}$ ]	$N_{\text{max}}$ [ $10^5 \text{ N/m}$ ]	$F_{s,\text{min}}$ [ $10^5 \text{ N}$ ]	$F_{s,\text{gem}}$ [ $10^5 \text{ N}$ ]	$F_{s,\text{max}}$ [ $10^5 \text{ N}$ ]
5	26,9	0,72	1,23	0,20	4,51	5,89
5,5	27,4	0,73	1,25	0,20	4,54	5,94
6	27,8	0,74	1,27	0,20	4,58	5,99
6,5	28,3	0,76	1,29	0,20	4,62	6,04
7	28,7	0,77	1,31	0,20	4,65	6,08
7,5	29,2	0,78	1,33	0,20	4,69	6,13
8	29,6	0,79	1,35	0,20	4,72	6,18
8,5	30,0	0,80	1,37	0,20	4,76	6,22
9	30,5	0,82	1,39	0,20	4,79	6,27

Vervolgens wordt gebruik gemaakt van de waarden voor de opwaartse kracht en de sterkte gevonden in de berekening in bijlage XI. Deze worden omgerekend van meter naar Newton door te vermenigvuldigen met  $\rho g D^2$ . Bij de sterkte wordt de schuifkracht opgeteld, die in de tabellen XII.1 en XII.2 was berekend. Hierna kan de verhouding tussen de sterkte en de belasting worden berekend. De resultaten van deze berekening zijn weergegeven in de tabellen XII.3 tot en met XII.5.

Tabel XII.3: Berekening van de sterkte/belasting verhouding bij een  $n_v$  van 0,3

H[m]	F <sub>opwaarts</sub> [N]	R[N] (uit bijlage XI)	R <sub>gem</sub> [N]	R <sub>max</sub> [N]	R <sub>gem</sub> /S[-]	R <sub>max</sub> /S[-]
0,1	0,35	3,6	6,9	7,9	19,9	22,9
0,11	0,35	3,6	6,9	7,9	19,5	22,5
0,12	0,36	3,6	6,9	8,0	19,2	22,2
0,13	0,37	3,6	6,9	8,0	19,0	22,0
0,14	0,37	3,6	7,0	8,0	18,9	21,8
0,15	0,37	3,6	7,0	8,1	18,8	21,7
0,16	0,38	3,6	7,0	8,1	18,7	21,6
0,17	0,38	3,6	7,0	8,2	18,7	21,6
0,18	0,38	3,6	7,1	8,2	18,7	21,6

Tabel XII.4: Berekening van de sterkte/belasting verhouding bij een  $n_v$  van 0,25

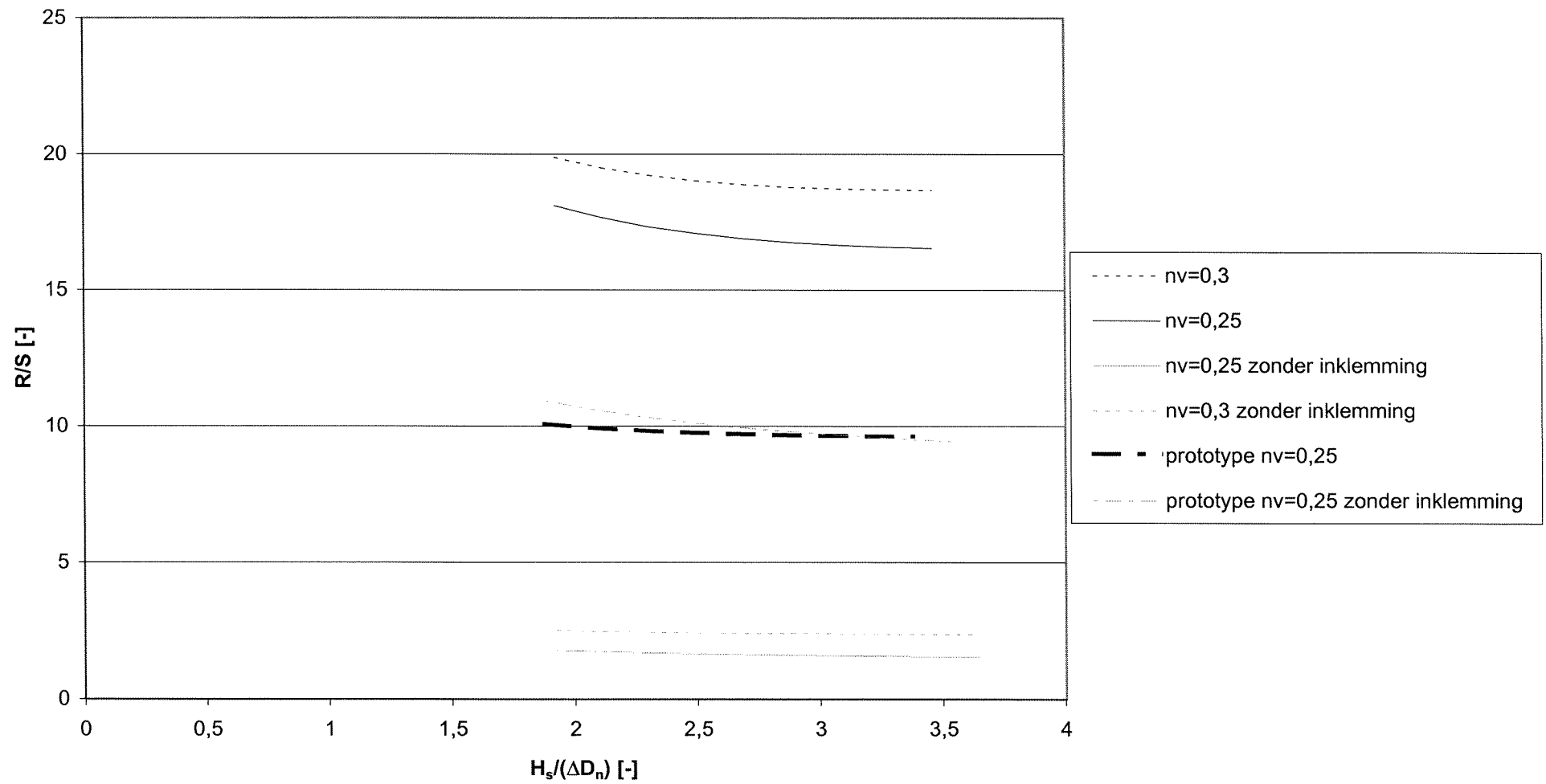
H[m]	F <sub>opwaarts</sub> [N]	R[N] (uit bijlage XI)	R <sub>gem</sub> [N]	R <sub>max</sub> [N]	R <sub>gem</sub> /S[-]	R <sub>max</sub> /S[-]
0,1	0,38	3,6	6,9	7,9	18,1	20,9
0,11	0,39	3,6	6,9	7,9	17,7	20,4
0,12	0,40	3,6	6,9	8,0	17,3	20,0
0,13	0,41	3,6	6,9	8,0	17,1	19,7
0,14	0,42	3,6	7,0	8,0	16,9	19,5
0,15	0,42	3,6	7,0	8,1	16,8	19,4
0,16	0,42	3,6	7,0	8,1	16,7	19,3
0,17	0,43	3,6	7,0	8,2	16,6	19,2
0,18	0,43	3,6	7,1	8,2	16,5	19,1

Tabel XII.5: Berekening van de sterkte/belasting verhouding bij een  $n_v$  van 0,25 (prototype)

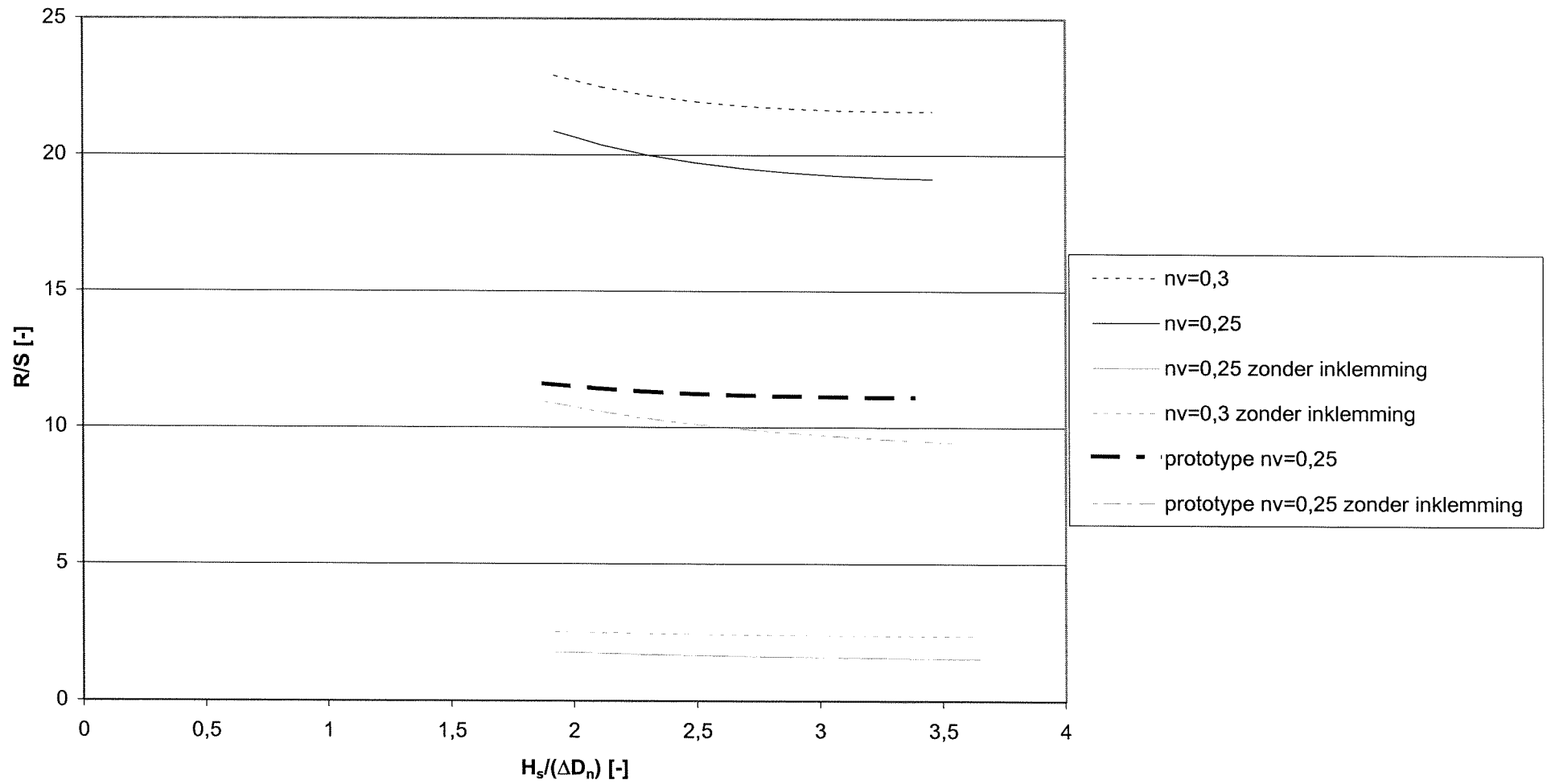
H[m]	F <sub>opwaarts</sub> [ $10^4$ N]	R [ $10^5$ N] (uit bijlage XI)	R <sub>gem</sub> [ $10^5$ N]	R <sub>max</sub> [ $10^5$ N]	R <sub>gem</sub> /S[-]	R <sub>max</sub> /S[-]
5	9,1	4,9	9,2	10,6	10,1	11,6
5,5	9,3	4,9	9,2	10,6	9,9	11,4
6	9,4	4,9	9,3	10,7	9,8	11,3
6,5	9,6	4,9	9,3	10,7	9,8	11,2
7	9,6	4,9	9,4	10,8	9,7	11,2
7,5	9,7	4,9	9,4	10,8	9,7	11,1
8	9,8	4,9	9,4	10,9	9,6	11,1
8,5	9,8	4,9	9,5	10,9	9,6	11,1
9	9,9	4,9	9,5	11,0	9,6	11,1



Vergelijking experimenten met hypothetische golfbreker met betrekking tot oplichten in combinatie met inklemming bij  $F_{s,gem}$



Vergelijking experimenten met hypothetische golfbreker met betrekking tot oplichten in combinatie met inklemming bij  $F_{s,max}$



## **BIJLAGE XIII**

### **Berekening stabiliteit tegen afschuiven**

Voor de berekening van de afschuiving wordt gebruik gemaakt van de vergelijkingen 6.9 en 6.10. De waarde voor  $\phi_w$  wordt per gebied (zie figuur 6.19) gelijk verondersteld aan:

- Gebied I:  $-0,33\phi_w$
- Gebied II:  $0,5\phi_w$
- Gebied III:  $0,67\phi_w$

De verschillende gebieden zijn als volgt begrens:

- Overgang 'armour layer' met teen  $< \text{gebied I} \leq -R_d - \phi_b \tan \alpha \tan \beta$
- $-R_d - \phi_b \tan \alpha \tan \beta < \text{gebied II} \leq -R_d$
- $-R_d < \text{gebied III} < z_1 - R_d$

De waarden voor  $\phi_w$  zijn berekend in bijlage XI. Als gevolg van de opwaartse kracht wordt de wrijvingskracht in gebied II en III gelijk aan 0. De wrijvingshoek wordt gelijk gesteld aan  $25^\circ$  in het geval van  $n_v = 0,25$  en gelijk aan  $40^\circ$  in het geval van  $n_v = 0,3$ . De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in de tabellen XIII.1 tot en met XIII.3.

Tabel XIII.1: Berekening verhouding wrijvingskracht met gewicht voor  $n_v=0,25$

H[m]	$F_{wI}$ [ $10^{-2}$ N]	$F_{w,tot}$ [ $10^{-2}$ N]	$F_{G,tot}$ [ $10^{-2}$ N]	$F_{w,tot}/F_{G,tot}$ [-]
0,1	1,73	0,37	2,67	0,14
0,11	1,77	0,34	2,71	0,13
0,12	1,80	0,31	2,75	0,11
0,13	1,83	0,28	2,79	0,10
0,14	1,86	0,25	2,83	0,09
0,15	1,88	0,22	2,87	0,08
0,16	1,90	0,18	2,91	0,06
0,17	1,92	0,14	2,95	0,05
0,18	1,93	0,11	2,99	0,04
0,19	1,95	0,07	3,03	0,02

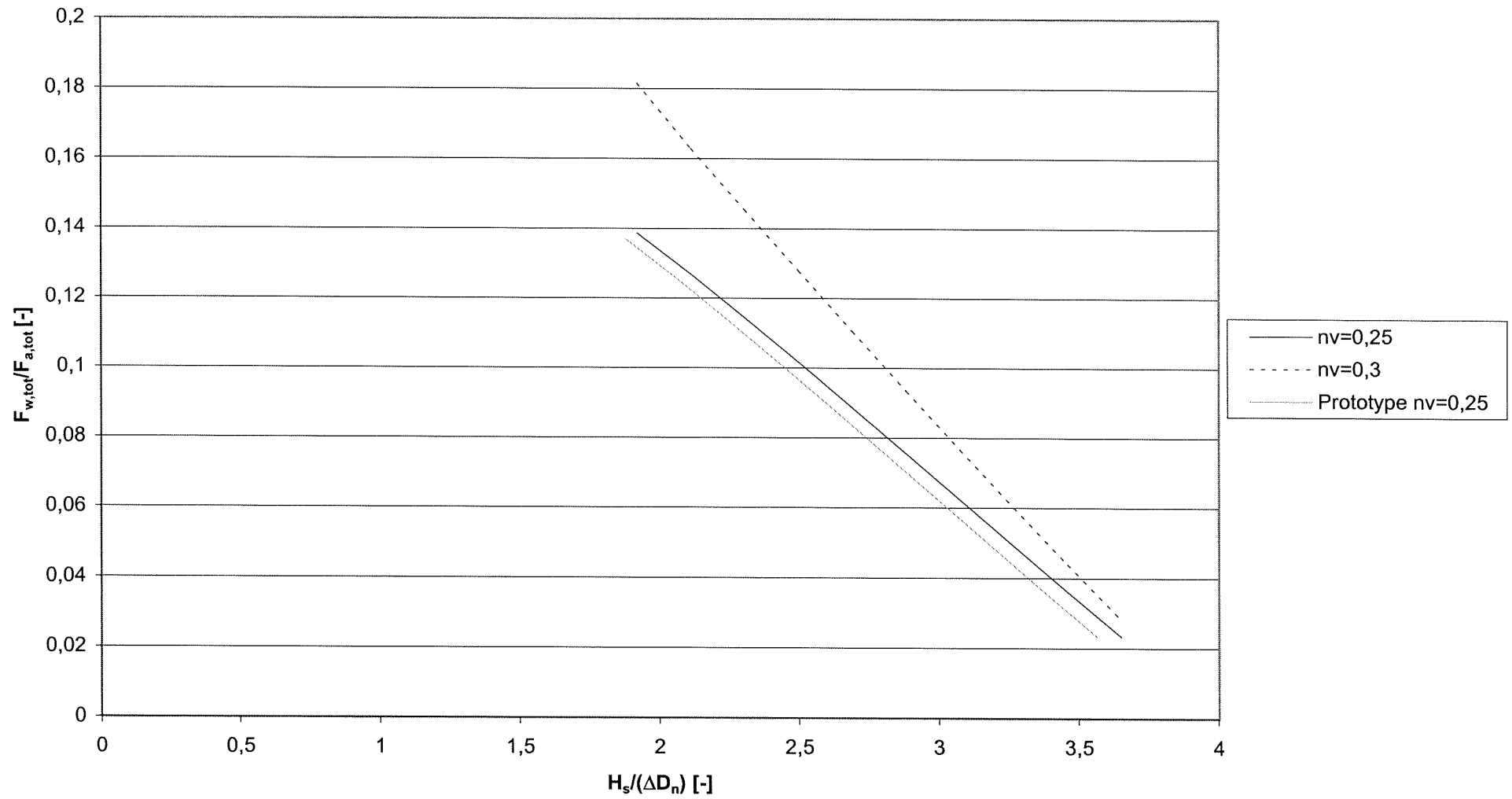
Tabel XIII.2: Berekening verhouding wrijvingskracht met gewicht voor  $n_v=0,3$

H[m]	$F_{wI}$ [ $10^{-2}$ N]	$F_{w,tot}$ [ $10^{-2}$ N]	$F_{G,tot}$ [ $10^{-2}$ N]	$F_{w,tot}/F_{G,tot}$ [-]
0,1	2,27	0,48	2,67	0,18
0,11	2,27	0,44	2,71	0,16
0,12	2,29	0,40	2,75	0,15
0,13	2,31	0,36	2,79	0,13
0,14	2,32	0,31	2,83	0,11
0,15	2,33	0,27	2,87	0,09
0,16	2,34	0,22	2,91	0,08
0,17	2,35	0,18	2,95	0,06
0,18	2,35	0,13	2,99	0,04
0,19	2,35	0,08	3,03	0,03

Tabel XIII.3: Berekening verhouding wrijvingskracht met gewicht voor prototype  $n_v=0,25$

H[m]	$F_{w1}$ [ $10^4$ N]	$F_{w,tot}$ [ $10^4$ N]	$F_{G,tot}$ [ $10^4$ N]	$F_{w,tot}/F_{G,tot}$ [-]
5	0,23	2,44	17,8	0,14
5,5	0,23	2,27	18,1	0,13
6	0,24	2,08	18,4	0,11
6,5	0,24	1,88	18,6	0,10
7	0,25	1,66	18,9	0,09
7,5	0,25	1,43	19,2	0,07
8	0,25	1,20	19,4	0,06
8,5	0,25	0,96	19,7	0,05
9	0,26	0,71	20,0	0,04
9,5	0,26	0,46	20,2	0,02

### Vergelijking experimenten met hypothetische golfbreker met betrekking tot afschuiving





## **BIJLAGE XIV**

### **Berekening stabiliteit tegen roteren bij tetrapoden**

In tabel XIV.1 zijn de gebruikte parameters weergegeven.

Tabel XIV.1: Gebruikte parameters voor stabiliteitsberekening

Parameter	Waarde
C <sub>1</sub> [-]	0,66
C <sub>2</sub> [-]	0,75
C <sub>3</sub> [-]	0,91
C <sub>D</sub> [-]	0,5
C <sub>L</sub> [-]	1
e <sub>1</sub> [m] (hoge plaatsingsdichtheid)	0,013
e <sub>1</sub> [m] (lage plaatsingsdichtheid)	0,014
e <sub>2</sub> [m] (hoge plaatsingsdichtheid)	0,011
e <sub>2</sub> [m] (lage plaatsingsdichtheid)	0,010
l [m]	0,01

Vervolgens is met behulp van de vergelijkingen B.5 tot en met B.10 een berekening uitgevoerd voor een hoge plaatsingsdichtheid, een lage plaatsingsdichtheid en een hoge plaatsingsdichtheid in het geval van een hypothetische golfbreker. De waarde van het hieronder vermelde deel in de stabiliteitsconditie varieert afhankelijk van of er sprake is van negatieve dan wel positieve rotatie.

$$\left[ \frac{1 \pm \frac{e_1}{l} \tan \alpha}{1 - \frac{C_D}{C_L} \frac{C_2}{C_3} \frac{e_1}{l}} \right] \quad (XIV.1)$$

In tabel XIV.2 zijn de waarden voor dit deel uit de stabiliteitsconditie weergegeven. De waarden voor de hypothetische golfbreker zijn hetzelfde.

Tabel XIV.2: Waarden vergelijking XIV.1 in geval van positieve en negatieve rotatie

Plaatsingsdichtheid	Positieve rotatie [-]	Negatieve rotatie [-]
Hoog	4,03	0,28
Laag	4,58	0,15

In de tabellen XIV.3 tot en met XIV.5 zijn de resultaten van deze berekeningen weergegeven. In de berekening wordt gezocht naar de minst stabiele situatie. Het blijkt dat dit het geval is wanneer een negatieve rotatie plaatsvindt. De waarden in de zesde kolom zijn immers kleiner dan in de vijfde kolom. Daarom wordt de verhouding sterkte versus belasting bepaald in het geval van een negatieve rotatie.

Tabel XIV.3: Berekening stabiliteit van een tetrapode versus rotatie (lage plaatsingsdichtheid)

H[m]	U[m/s]	N <sub>L</sub> [-]	N <sub>S</sub> [-]	N <sub>L</sub> * deel pos. rotatie [-]	N <sub>L</sub> *deel neg. rotatie[-]	(N <sub>L</sub> *deel neg. rotatie/ N <sub>S</sub> )[-]
0,05	0,175	22,1	1,0	101,5	3,2	3,3
0,06	0,2	20,3	1,2	93,2	3,0	2,5
0,07	0,225	18,8	1,4	85,9	2,7	2,0
0,08	0,25	17,4	1,6	79,5	2,5	1,6
0,09	0,275	16,1	1,8	74,0	2,4	1,3
0,1	0,3	15,1	2,0	69,0	2,2	1,1
0,11	0,325	14,1	2,2	64,7	2,1	1,0
0,12	0,35	13,3	2,4	60,9	1,9	0,8
0,13	0,375	12,5	2,6	57,4	1,8	0,7
0,14	0,4	11,9	2,8	54,4	1,7	0,6
0,15	0,425	11,3	3,0	51,6	1,7	0,6
0,16	0,45	10,7	3,2	49,1	1,6	0,5
0,17	0,475	10,2	3,4	46,8	1,5	0,4
0,18	0,5	9,8	3,6	44,7	1,4	0,4
0,19	0,525	9,4	3,8	42,8	1,4	0,4

Tabel XIV.4: Berekening stabiliteit van een tetrapode versus rotatie (hoge plaatsingsdichtheid)

H[m]	U[m/s]	N <sub>L</sub> [-]	N <sub>S</sub> [-]	N <sub>L</sub> * deel pos. rotatie [-]	N <sub>L</sub> *deel neg. rotatie[-]	(N <sub>L</sub> *deel neg. rotatie/ N <sub>S</sub> )[-]
0,05	0,175	22,1	1,0	89,3	6,2	6,2
0,06	0,2	20,3	1,2	82,0	5,7	4,8
0,07	0,225	18,8	1,4	75,6	5,2	3,8
0,08	0,25	17,4	1,6	70,0	4,8	3,0
0,09	0,275	16,1	1,8	65,1	4,5	2,5
0,1	0,3	15,1	2,0	60,7	4,2	2,1
0,11	0,325	14,1	2,2	56,9	3,9	1,8
0,12	0,35	13,3	2,4	53,6	3,7	1,6
0,13	0,375	12,5	2,6	50,5	3,5	1,4
0,14	0,4	11,9	2,8	47,8	3,3	1,2
0,15	0,425	11,3	3,0	45,4	3,1	1,1
0,16	0,45	10,7	3,2	43,2	3,0	0,9
0,17	0,475	10,2	3,4	41,2	2,8	0,8
0,18	0,5	9,8	3,6	39,4	2,7	0,8
0,19	0,525	9,4	3,8	37,7	2,6	0,7

Tabel XIV.5: Berekening stabiliteit van een tetrapode versus rotatie in het geval van het prototype (hoge plaatsingsdichtheid)

H[m]	U[m/s]	N <sub>L</sub> [-]	N <sub>S</sub> [-]	N <sub>L</sub> * deel pos. rotatie [-]	N <sub>L</sub> *deel neg. rotatie[-]	(N <sub>L</sub> *deel neg. rotatie/ N <sub>S</sub> )[-]
2,5	1,24	22,1	1,0	89,3	6,2	6,2
3	1,41	20,3	1,2	82,0	5,7	4,8
3,5	1,59	18,8	1,4	75,6	5,2	3,8
4	1,77	17,4	1,6	70,0	4,8	3,0
4,5	1,94	16,1	1,8	65,1	4,5	2,5
5	2,12	15,1	2,0	60,7	4,2	2,1
5,5	2,30	14,1	2,2	56,9	3,9	1,8
6	2,47	13,3	2,4	53,6	3,7	1,6
6,5	2,65	12,5	2,6	50,5	3,5	1,4
7	2,83	11,9	2,8	47,8	3,3	1,2
7,5	3,01	11,3	3,0	45,4	3,1	1,1
8	3,18	10,7	3,2	43,2	3,0	0,9
8,5	3,36	10,2	3,4	41,2	2,8	0,8
9	3,54	9,8	3,6	39,4	2,7	0,8
9,5	3,71	9,4	3,8	37,7	2,6	0,7

### Verhouding sterkte/belasting vs golfhoogte

