

Golfbrekers met een enkele toplaag



Eindrapport

Golfbrekers met een enkele toplaag

Eindrapport

Door

Sujeet Bhageloe

Afstudeercommissie

Prof.ir. K. d'Angremond	Waterbouwkunde
Dr.ir. H.L. Fontijn	Vloeistofmechanica
Dr.ir. M.R.A. van Gent	Waterloopkundig Laboratorium Delft
Dr.ir. J.W. van der Meer	Infram BV
Ir. W.H. Tutuarima	Waterbouwkunde

Advies

Ir. E. Berendsen	Samenwerkingsverband Maasvlakte 2 Varianten
------------------	---

Technische Universiteit Delft, subfaculteit der Civiele Techniek
Sectie Waterbouwkunde

Tetrapoden in een enkele toplaag

Na analyse van de resultaten van de modelproeven zijn de volgende criteria voor Tetrapoden in een enkele toplaag bepaald:

'Bezwijken'	$H_s/\Delta D_n = 1,2$
'Start van schade'	$H_s/\Delta D_n = 1,2$
'Geen schade'	$H_s/\Delta D_n = 0,8$

Na vergelijking van deze criteria met de ontwerpformule voor Tetrapoden in een dubbele toplaag bleek dat, bij de in de modelproeven gebruikte plaatsingsmethode en plaatsingsdichtheid, de elementen in een enkele toplaag, bij 'geen schade', 6,6 keer zwaarder moeten worden uitgevoerd. Per vierkante meter kan dan bijna met de helft van het aantal elementen worden voldaan. Ondanks de grotere en zwaardere elementen kan er toch een betonbesparing van ongeveer 28% gerealiseerd worden. In een enkele toplaag kan echter minder kernmateriaal worden gebruikt om de kruinhoogte en -breedte gelijk te houden aan een toepassing met een dubbele toplaag.

Tetrapoden in een enkele toplaag lijken voordeliger dan in een dubbele toplaag (minder elementen en een kleiner betonverbruik per vierkante meter). De elementen moeten, bij een porositeit van ongeveer 62%, 6,6 keer zwaarder zijn dan bij toepassing in een dubbele toplaag. De kans dat deze grotere elementen breken is waarschijnlijk niet gering. Daarnaast is het nog de vraag of zwaardere elementen wel aanvaardbaar zijn met het oog op het te gebruiken materieel. Verder kan men zich afvragen of het gebruik van kubussen in een enkele toplaag geen betere optie is.

Tijdens het modelonderzoek zijn Tetrapoden in een enkele toplaag zeer regelmatig en open geplaatst. Bij gebruik van een dichtere plaatsing, waarbij per vierkante meter meer elementen worden gebruikt, kan wellicht een hogere stabiliteit worden bereikt door een verhoogde haakweerstand. Een daarmee verkregen hogere stabiliteit, waardoor de elementen lichter dan op dit moment het geval is, kunnen worden uitgevoerd, kan Tetrapoden in een enkele toplaag aantrekkelijker maken.

Voorwoord

Voor u ligt het eindrapport ‘Golfbrekers met een enkele toplaag’ dat in het kader van het afstuderen aan de Technische Universiteit Delft (TUD) is gemaakt. De modelproeven die bij dit onderwerp horen zijn van 10 tot en met 26 maart 1998 gedaan bij WL | delft hydraulics (WL), locatie “De Voorst”. De kosten van de modelproeven, die onder WL speurwerktaarif zijn uitgevoerd, zijn door het Samenwerkingsverband Maasvlakte 2 Varianten (SM2V) gefinancierd. Van dit rapport zijn twee versies verschenen; een WL-versie en een SM2V-versie.

Opbouw van dit rapport

In *Hoofdstuk 1* wordt onder andere het doel van dit onderzoek gegeven. *Hoofdstuk 2* geeft een beschrijving van de aanpak van het modelonderzoek. In *Hoofdstuk 3* worden onder andere de resultaten van de modelproeven gepresenteerd. De resultaten van de modelproeven zijn in *Hoofdstuk 4* vergeleken met de resultaten van modelproeven op golfbrekers met een dubbele toplaag. Conclusies en aanbevelingen staan in *Hoofdstuk 5*. In “*Beschrijving van de proeven*”, achter in het rapport wordt een beschrijving gegeven van de observatie na iedere proef. Foto’s, resultaten van proeven zonder constructie, tabellen en figuren zijn hierna opgenomen.

Conclusies en aanbevelingen alsmede enkele figuren die in dit rapport zijn opgenomen, zijn het resultaat van een beperkt aantal proeven. Resultaten in enkele figuren zijn buiten het geldigheidsgebied van de proeven geïnterpoleerd. De interpolatie is echter wel gebaseerd op interpretatie van eerder werk.

Dit werk is gedaan naar aanleiding van het afstuderen aan de Faculteit Civiele Techniek. Het moet dus ook als zodanig worden behandeld.

Bij deze wil ik met name Johan Koopmans, Leen Tulp, Piet Rorije en Martje Loman bedanken voor hun hulp tijdens de modelproeven en het verblijf in Emmeloord. Verder wil ik het SM2V, WL en de TUD bedanken voor het mogelijk maken van modelproeven.

Sujeet Bhageloe
Delft, juli 1998

Samenvatting

Inleiding

Pogingen om de kosten van stortstenen golfbrekers te verlagen, hebben geleid tot de ontwikkeling van elementen zoals de Accropode en de Core-loc die in een toplaag met een dikte van 1 element kunnen worden gebruikt. Alhoewel het gebruik van deze elementen tot grote kostenverlagingen heeft geleid, blijven de complexe vormen en de bekisting een groot nadeel. Het toepassen van simpele elementen, zoals kubussen, in een enkele toplaag kunnen dit nadeel wegwerken. Het is belangrijk dat een enkele toplaag niet duurder is dan een dubbele toplaag. Daarnaast moeten golfbrekers met elementen in een enkele toplaag ongeveer even sterk en veilig zijn als bij gebruik in een dubbele toplaag. De daarvoor toe te passen criteria zijn echter niet louter theoretisch of rekenkundig vast te stellen. Het doen van modelproeven blijkt onontbeerlijk. Daarom is van november 1997 tot en met juli 1998 een inleidend onderzoek gedaan naar golfbrekers met een enkele toplaag van kubussen, Tetrapoden en breukstenen. In maart 1998 zijn modelproeven gedaan.

Kubussen zijn gekozen omdat deze makkelijk op golfbrekers zijn te plaatsen en vanwege de simpele vorm (lage bekistingskosten, opstapelbaar op de bouwplaats) van de elementen. Tetrapoden kunnen door de grote haakweerstand relatief licht worden uitgevoerd (besparing op materiaal). De complexe vorm is echter een nadeel van dit element. Breukstenen zijn populair in landen met veel bergachtige gebieden, waar dit materiaal voorradig is. In met name deze landen is het gebruik van breukstenen in de toplaag goedkoop.

In verband met de korte tijd waarin de modelproeven moesten worden uitgevoerd, is ervoor gekozen de modellen met een enkele toplaag, wat betreft dimensieloze kentallen, identiek te maken aan de modellen met een dubbele toplaag, beproefd door *Van der Meer* [1986, 1987a].

De modelproeven zijn per element uitgevoerd met 3 verschillende golfsteilheden en met variërende significante golfhoogten en gemiddelde golfperioden. De constructies met een enkele toplaag zijn, in tegenstelling tot de modellen van *Van der Meer*, tussentijds niet hersteld. Dit uit tijdsoverwegingen.

Na een vergelijking tussen de resultaten van de modelproeven op een enkele toplaag en de resultaten van modelproeven op een dubbele toplaag, die samengevat zijn in ontwerpformules (*Van der Meer* [1985, 1986, 1987]) zijn conclusies en aanbevelingen tot stand gekomen die in de volgende paragrafen besproken worden.

Kubussen in een enkele toplaag

Bij overschrijding van $H_s/\Delta D_n = 3,2$ wordt de constructie als bezweken beschouwd. Deze waarde wordt bereikt vanaf 4 verplaatste kubussen, bij gebruik van $D_n = 0,051$ m op een constructie met een breedte van één meter. 'Start van schade' blijkt op te treden bij $H_s/\Delta D_n = 2,8$.

De volgende criteria zijn gevonden voor kubussen in een enkele toplaag:

'Bezwijken'	$H_s/\Delta D_n = 3,2$
'Ernstige schade'	$H_s/\Delta D_n = 3,0$
'Start van schade'	$H_s/\Delta D_n = 2,8$
'Geen schade'	$H_s/\Delta D_n = 2,15$

Uit de resultaten van de modelproeven is gebleken dat kubussen in een enkele toplaag, een zogenaamd bros bezwijkgedrag vertonen; een kleine verhoging van de golfhoogte kan, indien er al schade is, leiden tot meer schade of zelfs tot bezwijken. Vanwege dit gedrag wordt afgeraden te ontwerpen op het zogenaamde 'start van schade' criterium. Het 'geen schade' criterium, dat bereikt wordt bij $H_s/\Delta D_n = 2,15$, is een beter ontwerpcriterium. De veiligheid ten opzichte van 'start van schade' is dan 1,3.

Na vergelijking van deze criteria met de ontwerpformule voor een dubbele toplaag, is gebleken dat bij 'geen schade', de ribben van kubussen in een enkele toplaag meer dan 40% kleiner mogen worden uitgevoerd; het stabiliteitsgetal waarop schade in een enkele toplaag ontstaat ligt namelijk 40% hoger dan bij een dubbele toplaag. De elementen in een enkele toplaag zijn dan bijna 3 keer lichter dan bij een dubbele toplaag. Alhoewel er per vierkante meter, bij een porositeit van ongeveer 28%, meer elementen dan bij een dubbele toplaag moeten worden geplaatst, is de betonbesparing ruim 60%. Bij een enkele toplaag moet echter wel meer (goedkoop) kernmateriaal worden gebruikt om de kruinhoogte en -breedte gelijk te houden aan een toepassing met een dubbele toplaag.

kubussen in een enkele toplaag moeten ongeveer 1,16 keer zwaarder zijn dan Accropoden in de toplaag bij 'geen schade'. Per vierkante meter moeten meer kraanhandelingen worden uitgevoerd en is het betonverbruik 45% groter. In een toplaag met kubussen moet verder meer kernmateriaal worden gebruikt om de kruinhoogte en -breedte gelijk te houden. De kosten voor de bekisting van Accropoden en de speciale plaatsing op de toplaag kunnen kubussen in een enkele toplaag misschien toch goedkoper maken dan Accropoden in de toplaag.

Bij de modelproeven was de porositeit van de constructie met een enkele toplaag kleiner (meer elementen per vierkante meter) dan die van de constructie met een dubbele toplaag. Het stabiliteitsgetal bij 'geen schade' blijkt voor een enkele toplaag een stuk hoger te liggen. Aan de hand van dit feit wordt aangenomen dat de plaatsingsdichtheid een grote invloed op de stabiliteit heeft. Onderzoek naar de invloed van het aantal elementen per vierkante meter is dus nuttig.

Breukstenen in een enkele toplaag

Na modelproeven op breukstenen in een enkele toplaag zijn de volgende criteria vastgesteld:

'Bezwijkken'	$H_v/\Delta D_n = 1,5$
'Start van schade'	$H_v/\Delta D_n = 1,2$
'Geen schade'	$H_v/\Delta D_n = 0,9$

De gevonden criteria zijn vergeleken met de ontwerpformules voor breukstenen in een dubbele toplaag. Na een analyse bleek dat, bij toepassing van 'geen schade', de elementen in een enkele toplaag 1,6 keer groter en 4 keer zwaarder uitgevoerd moeten worden dan bij gebruik in een dubbele toplaag. Bij een porositeit van 33% is de plaatsingsdichtheid ongeveer 80% kleiner dan in een dubbele toplaag. De steenbesparing is slechts 15%. Om de kruinhoogte en -breedte van een enkele toplaag gelijk te houden aan die van een dubbele toplaag, moet meer kernmateriaal worden gebruikt. Alhoewel een kleine besparing op steenverbruik wordt bereikt, worden breukstenen in een enkele toplaag (bij een gewicht van 15 ton of meer) op een helling van 1:1,5 afgeraden omdat grote breukstenen schaars en duur zijn. Een enkele toplaag met een helling van 1:1,5 is daardoor waarschijnlijk duurder dan een dubbele toplaag.

De helling van 1:1,5 bleek tijdens de modelproeven een negatief effect te hebben op de stabiliteit; de elementen hadden de neiging om ten gevolge van het eigen gewicht bijna de helling af te rollen. Het wordt daarom aangeraden om de stabiliteit van breukstenen in een enkele toplaag te testen bij een flauwere helling, 1:2 of flauwer.

De stenen bij de proeven met een enkele toplaag zijn random geplaatst. Uit onderzoek van *Hald et al* [1998] blijkt echter dat breukstenen in een enkele toplaag op een helling van 1:1,5, die ordelijk geplaatst zijn, een hoge stabiliteit hebben. Bij zo'n plaatsing is er geen sprake van een bros bezwijkgedrag, waardoor een veiligheidsfactor op het 'start van schade' criterium waarschijnlijk achterwege kan worden gelaten. De resultaten van *Hald et al* [1998], voor een random plaatsing van breukstenen in een enkele toplaag op een helling van 1:1,5, ondersteunen de resultaten van dit afstudeerwerk.

Algemeen

Bij alle type enkele toplagen is het belangrijk dat ontstane schade zo spoedig mogelijk wordt hersteld in verband met het bros bezwijkgedrag dat de constructies met een enkele toplaag vertonen.

Inhoudsopgave

VOORWOORD.....	III
SAMENVATTING.....	IV
1. INLEIDING	10
1.1 ALGEMEEN.....	10
1.2 PROBLEEMSTELLINGEN	11
1.3 DOELSTELLINGEN.....	11
2. AANPAK VAN HET MODELONDERZOEK.....	12
2.1 HET MODEL.....	12
2.2 GOLFHOOGTEN.....	12
2.3 OPZET EN SCHADE	12
2.4 GOLFSTEILHEDEN.....	14
2.5 NOMINALE DIAMETER	14
2.6 TE REALISEREN MODEL.....	15
3. HET MODELONDERZOEK.....	16
3.1 INLEIDING.....	16
3.2 KUBUSSEN	18
3.3 TETRAPODEN.....	21
3.4 BREUKSTENEN	24
3.5 VEILIGHEIDSFACOR	27
4. VERGELIJKING MET EEN DUBBELE TOPLAAG	36
4.1 INLEIDING.....	36
4.2 KUBUSSEN	36
4.3 TETRAPODEN.....	39
4.4 BREUKSTENEN	41
4.5 ACCROPODEN.....	44
4.6 ONDERLINGE VERGELIJKING.....	46
5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.....	47
5.1 KUBUSSEN	47
5.2 TETRAPODEN.....	48
5.3 BREUKSTENEN	49
5.4 ALGEMEEN.....	49
6. REFERENTIES.....	50

SYMBOLEN

LIJST VAN TABELLEN

LIJST VAN FIGUREN

BESCHRIJVING VAN DE PROEVEN

- A. KUBUSSEN
- B. TETRAPODEN
- C. BREUKSTENEN

FOTO'S

- 01 - 26 KUBUSSEN
- 27 - 40 TETRAPODEN
- 41 - 53 BREUKSTENEN

PROEVEN ZONDER CONSTRUCTIE**TABELLEN**

- 1 RESULTATEN "KUBUSSEN" IN EEN ENKELE TOPLAAG
- 2 RESULTATEN "TETRAPODEN" IN EEN ENKELE TOPLAAG
- 3 RESULTATEN "BREUKSTENEN" IN EEN ENKELE TOPLAAG

FIGUREN

- 1 SCHELDEBAK
- 2, 3 "KUBUSSEN" IN EEN ENKELE TOPLAAG
- 4 "TETRAPODEN" IN EEN ENKELE TOPLAAG
- 5 "BREUKSTENEN" IN EEN ENKELE TOPLAAG

BIJLAGE

- I KUBUSSEN IN EEN DUBBELE TOPLAAG
- II TETRAPODEN IN EEN DUBBELE TOPLAAG
- III BREUKSTENEN IN EEN DUBBELE TOPLAAG
- IV KUBUSSEN IN EEN ENKELE TOPLAAG
- V TETRAPODEN IN EEN ENKELE TOPLAAG
- VI BREUKSTENEN IN EEN ENKELE TOPLAAG
- VII ACCROPODEN

1. Inleiding

1.1 Algemeen

Pogingen om de kosten van stortstenen golfbrekers te verlagen, hebben geleid tot de ontwikkeling van elementen zoals de Core-loc en Accropode, die in een enkele toplaag kunnen worden aangebracht. Bij een juiste plaatsing in de toplaag vormen de elementen een grote eenheid waardoor een grote stabiliteit ontstaat; De hydraulische belasting wordt namelijk over meerdere elementen verdeeld. De individuele elementen kunnen hierdoor relatief licht worden uitgevoerd, hetgeen tot materiaalbesparingen leidt. De complexe vorm is echter een groot nadeel; de bekistingskosten zijn relatief hoog en het kost veel tijd de elementen stabiel te plaatsten. Het kunnen toepassen van traditionele elementen zoals bijvoorbeeld de kubus, in een enkele toplaag kunnen deze nadelen wegwerken. Het is echter belangrijk dat constructies met deze elementen ongeveer even sterk en veilig zijn als bij gebruik in een dubbele toplaag. Daarom is het afgelopen jaar een inleidend onderzoek gedaan naar golfbrekers met een enkele toplaag van kubussen, Tetrapoden en breukstenen.

De kubus is gekozen omdat dit element populair is bij met name Nederlandse aannemers, de fabricagekosten relatief laag zijn (simpele vorm, lage bekistingskosten) en de elementen makkelijk op de constructie geplaatst kunnen worden. Verder zijn kubussen makkelijk stapelbaar, hetgeen handig is op de bouwplaats. Tetrapoden kunnen vanwege de grote haakweerstand relatief licht worden uitgevoerd (besparing op materiaal), maar de complexe vorm is een nadeel. Omdat deze elementen over de hele wereld veel worden toegepast, is besloten toch onderzoek te doen naar de mogelijkheid van Tetrapoden in een enkele toplaag. Het gebruik van breukstenen in de toplaag is populair in landen met veel bergachtige gebieden, waar dit materiaal voorradig is. In met name deze landen en landen met een gematigd golfklimaat is het gebruik van breukstenen in de toplaag goedkoop. De beperkte beschikbaarheid van zeer zware breukstenen, 15 ton en meer, is echter een nadeel.

Het kunnen toepassen van kubussen, Tetrapoden en breukstenen in een enkele toplaag kan grote besparingen op de kosten opleveren. Door van een dubbele naar een enkele toplaag te gaan, wordt op materiaal bespaard. Als de plaatsing verder geen problemen oplevert, wordt er waarschijnlijk ook bespaard op de constructietijd. Golfbrekers met een enkele toplaag moeten natuurlijk minstens zo veilig zijn als traditionele golfbrekers met een dubbele toplaag.

Breukstenen en kubussen kunnen in een enkele toplaag worden aangebracht als het eigen gewicht groter wordt gemaakt dan bij toepassing in een dubbele toplaag. Deze elementen ontlenen hun stabiliteit namelijk aan met name het eigen gewicht. Voor breukstenen kan dit een probleem zijn omdat zeer zware breukstenen (10 tot 15 ton en zwaarder) schaars en dus duur zijn. Indien een golfbreker met breukstenen in de toplaag op zeer hoge golven moet worden ontworpen, wordt daarom in de praktijk eerder overgegaan op een flauwere helling in plaats van op zwaardere stenen.

Tetrapoden ontlenen hun stabiliteit niet alleen aan het eigen gewicht, maar ook aan de zogenaamde haakweerstand. De elementen in de onderste laag ontlenen de haakweerstand niet alleen zijdelings aan elkaar, maar ook aan de elementen in de laag erboven. Bij toepassing van Tetrapoden in een enkele toplaag gaan dus zowel gewicht als haakweerstand verloren. Het toepassen van Tetrapoden in een enkele toplaag met een groter eigen gewicht dan bij toepassing in een dubbele toplaag is een minder groot probleem dan het leveren van dezelfde haakweerstand als in een dubbele toplaag. Voor het modelonderzoek worden Tetrapoden daarom alleen zwaarder gemaakt; De haakweerstand wordt verder niet vergroot. Resultaten van het modelonderzoek moeten uitwijzen in welke mate de overgebleven haakweerstand bijdraagt aan de stabiliteit. Verder worden de Tetrapoden zo dicht mogelijk tegen elkaar aan geplaatst.

Omdat over de stabiliteit van golfbrekers met een enkele toplaag niets bekend is, zijn modelproeven nodig. Deze modelproeven zijn in maart 1998 bij WL | delft hydraulics, locatie "De Voorst", gedaan.

De resultaten van modelproeven op golfbrekers met een enkele toplaag worden vergeleken met de resultaten van modelproeven op kubussen, Tetrapoden en breukstenen in een dubbele toplaag (*Van der Meer* [1985, 1986, 1987a]) (*Bijlage I, II en III*). In *Tabel 1.1* zijn de gegevens van de modellen te zien waarmee de modellen met een enkele toplaag worden vergeleken.

Tabel 1.1 Gegevens van kubussen, Tetrapoden en Breukstenen in een dubbele toplaag

	Kubussen (<i>Van der Meer</i> [1986])	Tetrapoden (<i>Van der Meer</i> [1987a])	breukstenen (<i>Van der Meer</i> [1985])
toplaag	$M = 0,204 \text{ kg}$ $D_n = 0,0443 \text{ m}$ $\cot \alpha = 1,5$ $B_{kruin} = 0,20 \text{ m}$ $R_c = 0,25 \text{ m}$ $\rho_a = 2340 \text{ kg/m}^3$	$M = 0,205 \text{ kg}$ $D_n = 0,0443 \text{ m}$ $\cot \alpha = 1,5$ $B_{kruin} = 0,20 \text{ m}$ $R_c = 0,25 \text{ m}$ $\rho_a = 2360 \text{ kg/m}^3$	$M_{50} = 0,122 \text{ kg}$ $D_{n50} = 0,036 \text{ m}$ $\cot \alpha = 1,5$ $B_{kruin} = 0,20 \text{ m}$ $R_c = 0,25 \text{ m}$ $\rho_a = 2650 \text{ kg/m}^3$
filterlaag	$20 < D_n < 25 \text{ mm}$ $t = 0,06 \text{ m}$	$20 < D_n < 25 \text{ mm}$ $t = 0,06 \text{ m}$	$M_{50} = 0,013 \text{ kg}$ $D_{85}/D_{15} = 2,25$ $t = 0,02 \text{ m}$
teen	$20 < D_n < 25 \text{ mm}$ $B_{teen} = 0,10 \text{ m}$ $d = 0,08 \text{ m}$ $h_t = 0,40 \text{ m}$	$20 < D_n < 25 \text{ mm}$ $B_{teen} = 0,10 \text{ m}$ $d = 0,08 \text{ m}$ $h_t = 0,40 \text{ m}$	geen
kern	$D_{n50} = 0,011 \text{ m}$	$D_{n50} = 0,011 \text{ m}$	$D_{n50} = 0,011 \text{ m}$ $D_{85}/D_{15} = 1,5$
overigen	voortalud 1:30 $h_0 = 0,90 \text{ m}$	voortalud 1:30 $h_0 = 0,90 \text{ m}$	voortalud 1:30 $h_0 = 0,70 - 0,90 \text{ m}$

De volgende probleem- en doelstellingen zijn van toepassing:

1.2 Probleemstellingen

1. Welke stabiliteitscriteria zijn van toepassing op golfbrekers met een enkele toplaag gemaakt van kubussen, breukstenen en Tetrapoden?
2. Wat zijn de voordelen van een enkele toplaag vergeleken met een dubbele toplaag?

1.3 Doelstellingen

1. Het vaststellen van stabiliteitscriteria voor golfbrekers met een enkele toplaag gemaakt van kubussen, Tetrapoden en breukstenen met behulp van modelproeven.
2. Vergelijken van de stabiliteit van een enkele toplaag met de stabiliteit van een dubbele toplaag.

2. Aanpak van het modelonderzoek

2.1 Het model

Modelproeven zijn nodig om de stabiliteit van golfbrekers met een enkele toplaag te kunnen bepalen. De beschikbare tijd waarin de modelproeven op kubussen, Tetrapoden en breukstenen in een enkele toplaag moeten worden uitgevoerd, is echter beperkt (3 weken). Daarom is besloten de modellen met een enkele toplaag, wat betreft dimensieloze kentallen, zo identiek mogelijk te maken aan de modellen met een dubbele toplaag (*Figuur I.1, II.1 en III.1, in de Bijlage*). Op zo een manier is een vergelijking van de resultaten van de modelproeven op een enkele toplaag met de resultaten van modelproeven op een dubbele toplaag mogelijk.

Uit de geteste modellen van *Van der Meer* [1986,1987a] zijn de volgende dimensieloze kentallen bepaald:

$$h_0/h_c = 0,90/0,40 = 2,25 \text{ en}$$

$$h_c/R_c = 0,40/0,25 = 1,6 \text{ met}$$

h_0 is diepwater hoogte

h_c is de waterdiepte bij de teen van de constructie

R_c is de relatieve kruinhoogte.

Verder geldt:

$$h_{kruin} = R_c + h_c$$

h_{kruin} is de hoogte van de kruin boven de onderkant van de teen.

De door *Van der Meer* geteste constructies hadden een helling van 1:1,5 met een voortalud van 1:30. Deze hellingen worden ook gebruikt voor de modellen met een enkele toplaag.

2.2 Golfhoogten

De modelproeven op constructies met een enkele toplaag worden aangevangen met een lage significante golfhoogte. Het is namelijk belangrijk dat de constructies geen schade oplopen na de eerste proef. Het moment waarop start van schade optreedt is niet te bepalen indien er wel sprake is van schade. Na de eerste proef wordt de significante golfhoogte met kleine stappen verhoogd totdat schade ontstaat en later bezwijken optreedt. *Van der Meer* [1985, 1986, 1987a] heeft eventuele schade aan de constructies, na iedere proef, hersteld voordat een volgende proef werd aangevangen. In verband met de korte tijd die beschikbaar is voor de modelproeven met een enkele toplaag, kan dit zogenaamde 'tussentijds herstel' niet worden toegepast.

2.3 Opzet en Schade

2.3.1 Kubussen

Van der Meer [1986] heeft in totaal 24 proeven uitgevoerd op kubussen in een dubbele toplaag met een nominale diameter van 0,0443 meter. De constructie had een porositeit van 33% en er zijn 766 kubussen op ongeveer 1,22 m². Het model had een breedte van 1 meter hetgeen overeenkwam met 22,6 nominale diameters. Het aantal elementen dat over meer dan 2 nominale diameters verplaatst was, na iedere test, gedeeld door het aantal nominale diameters (22,6) dat in een breedte van 1 meter paste, is N_{od} genoemd. $N_{od} = 0$ komt overeen met 'geen schade' en $N_{od} = 2$ (45 verplaatste elementen) is 'bezwijken' genoemd.

2.3.2 Tetrapoden

Van der Meer [1987a] heeft in totaal 19 testen uitgevoerd op Tetrapoden in een dubbele toplaag met een nominale diameter van 0,0443 meter. Het model had een breedte van 1 meter hetgeen overeenkwam met 22,6 nominale diameters. Het aantal elementen dat over meer dan 2 nominale diameters verplaatst was, na iedere test, gedeeld door het aantal nominale diameters (22,6) dat in een breedte van 1 meter pastte, is N_{od} genoemd. $N_{od} = 0$ komt overeen met 'geen schade' en $N_{od} = 1,5$ (34 verplaatste elementen) is 'bezwijken' genoemd.

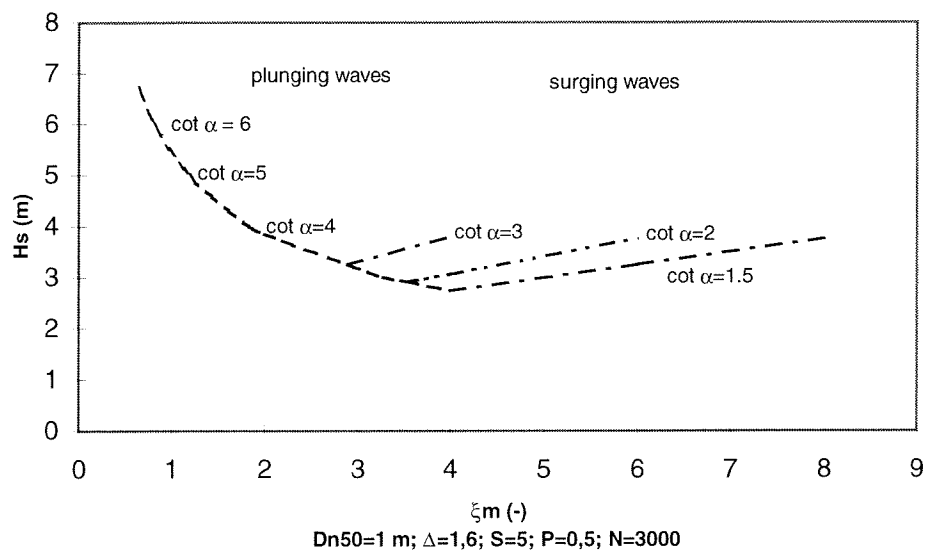
2.3.3 Breukstenen

Van der Meer [1985] heeft 21 proeven uitgevoerd op een modelgolfbreker met een dubbele toplaag van breukstenen. De golfperiode, significante golfhoogte alsmede de helling van de golfbreker werden gevarieerd. Na de proeven zijn zogenaamde schadegetallen (S) opgesteld, die afhankelijk zijn van de helling van de constructie (Tabel 2.1). De waarden van S geven, bij een bepaalde helling, aan of er sprake is van 'start van schade', 'repareerbare schade' of 'bezwijken'. Hoe hoger het schadegetal wordt aangenomen des te hoger de significante golfhoogte, H_s , is waarop mag worden ontworpen.

Tabel 2.1 Invloed van de helling op het schadecriterium

Helling	start 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	2	8-12	17
1:6	2	8-12	17

Verder is de invloed van de breaker parameter, ξ_m , op de toelaatbare significante golfhoogte bepaald voor verschillende hellingen (Figuur 2.1).



Figuur 2.1 Invloed van de breaker parameter op de toelaatbare significante golfhoogte

2.4 Golfsteilheden

Uit de resultaten van de modelproeven van *Van der Meer* [1985, 1986, 1987a] kan de invloed van de golfsteilheid op het stabiliteitsgetal ($H_s/\Delta D_n$) worden bepaald. Uit *Figuur I.3* in de *Bijlage*, blijkt de golfsteilheid, s_{m0} , een grote invloed op de stabiliteit van kubussen in een dubbele toplaag uit te oefenen. Af te lezen is dat minimum stabiliteit bij 'bezwijken' optreedt voor $0,060 < s_{m0} < 0,070$. Voor Tetrapoden in een dubbele toplaag blijkt minimum stabiliteit op te treden voor $0,020 < s_{m0} < 0,030$ bij $N_{od} = 1,5$ (*Figuur II.3* in de *Bijlage*). Uit *Figuur III.3* in de *Bijlage*, is af te lezen dat minimum stabiliteit, voor breukstenen in een dubbele toplaag, optreedt voor $0,015 < s_{m0} < 0,030$ bij $S = 8$.

Het is belangrijk een enkele toplaag te testen op een golfsteilheid waarbij minimum stabiliteit optreedt. Om de invloed van de golfsteilheid op de stabiliteit van een enkele toplaag te kunnen bepalen moet op nog minstens twee andere golfsteilheden worden getest.

Voor de golfsteilheid op diepwater geldt:

$$s_{m0} = 2 * \pi * H_{s0} / (g * (T_{m0})^2) \quad \text{vergelijking 2.1}$$

s_{m0} is de golfsteilheid op diepwater
 H_{s0} is de significante golfhoogte op diepwater
 T_{m0} is de gemiddelde golfperiode op diepwater
 g is de gravitatieconstante (9,81).

Met behulp van *vergelijking 2.1* kan, bij een bekende golfsteilheid en significante golfhoogte op diepwater, de gemiddelde golfperiode op diepwater worden berekend.

2.5 Nominale diameter

Van der Meer [1985, 1986, 1987a] heeft tijdens de modelproeven kubussen en Tetrapoden getest die een gewicht van ongeveer 204 gram hadden. De breukstenen hadden een M_{50} van 122 gram.

Het is de verwachting dat, voor gelijke waarden van het stabiliteitsgetal, de elementen in een enkele toplaag zwaarder moeten worden uitgevoerd dan in een dubbele toplaag. Voor gebruik in een enkele toplaag wordt gekozen voor kubussen en Tetrapoden met een gewicht van ongeveer 292 gram (ook vanwege de beschikbaarheid van deze elementen op het WL). De elementen zijn dan ongeveer 1,42 keer zwaarder dan in een dubbele toplaag. De breukstenen in een enkele toplaag worden getest met een gewicht, M_{50} , van ongeveer 175 gram ($1,42 * 122$ gram).

2.6 Te realiseren model

Getracht wordt het volgende model te realiseren:

Tabel 2.2 Te realiseren toplaag

Kubussen	Tetrapoden	breukstenen
$M = 0,292$ kg	$M = 0,292$ kg	$M_{50} = 0,175$ kg
$D_n = 0,050$ m	$D_n = 0,050$ m	$D_{n50} = 0,0406$ m
$h_0 = 0,72$ m	$h_0 = 0,72$ m	$h_0 = 0,72$ m
$h_c = 0,32$ m	$h_c = 0,32$ m	$h_c = 0,32$ m
$h_{kruin} = 0,52$ m	$h_{kruin} = 0,52$ m	$h_{kruin} = 0,52$ m
$B_{kruin} = 0,16$ m	$B_{kruin} = 0,16$ m	$B_{kruin} = 0,16$ m
$R_c = 0,20$ m	$R_c = 0,20$ m	$R_c = 0,20$ m

Nu het gewicht van de elementen van de toplaag bekend is, kunnen de dimensies van de rest van de golfbreker worden bepaald met behulp van de volgende vuistregels (*Van der Meer* [1993]).

$$\text{Filterlaag: } \frac{1}{25} * M_{toplaag} < M_{filterlaag} < \frac{1}{15} M_{toplaag}$$

$$\text{Teen: } \frac{1}{15} * M_{toplaag} < M_{teen} < \frac{1}{10} M_{toplaag}$$

$$\text{Kern: } D_{n50} = 0,011\text{m}$$

Bij gebruik van deze vuistregels blijft de waarde van de denkbeeldige doorlatendheidsfactor (P) van een dubbele toplaag, gelijk aan die van een enkele toplaag. In *Tabel 2.3* zijn de gegevens gepresenteerd van de te realiseren modellen.

Tabel 2.3 Dimensies modellen met de te realiseren enkele toplaag

	Kubussen	Tetrapoden	breukstenen
Toplaag	$D_n = 0,050$ m $M=0,292$ kg $\Delta = 1,21$	$D_n = 0,050$ m $M=0,292$ kg $\Delta = 1,32$	$D_{n50} = 0,0406$ m $M_{50}=0,175$ kg $\Delta = 1,62$ $D_{85}/D_{15} = 1,2$
Filterlaag	stenen 25-30 mm $t=0,06$ m	stenen 25-30 mm $t=0,06$ m	stenen 25-30 mm $t=0,06$ m
Teen	stenen 25-30 mm $B = 0,08$ m $d = 0,06$ m	stenen 25-30 mm $B = 0,08$ m $d = 0,06$ m	stenen 25-30 mm $B = 0,08$ m $d = 0,06$ m
Kern	$D_{n50} = 0,011$ m $D_{85}/D_{15} = 1,5$	$D_{n50} = 0,011$ m $D_{85}/D_{15} = 1,5$	$D_{n50} = 0,011$ m $D_{85}/D_{15} = 1,5$

3. Het modelonderzoek

3.1 Inleiding

3.1.1 Algemeen

De modelproeven op kubussen, Tetrapoden en breukstenen in een enkele toplaag zijn uitgevoerd in de Scheldebak (*Figuur 1*) van WL I delft hydraulics, locatie "De Voorst". De bak heeft een lengte van 26,4 meter en een breedte van 14 meter. De constructies zijn, op een afstand van 20 meter vanaf het golfschot, tussen muurtjes, die op een afstand van 1 meter van elkaar stonden, gebouwd. Op twee triplex platen zijn de contouren van de golfbrekers afgetekend. De platen zijn tegen de muren bevestigd, zodanig dat ze precies tegen over elkaar stonden. Met behulp van deze schotten kon de golfbreker worden opgebouwd (*Figuur 2* tot en met *Figuur 5*). Nadat een element was getest, hoefde alleen de toplaag verwisseld te worden, zonder de onderliggende lagen of de helling van de constructie aan te passen. Voor de constructie was een voortalud met een helling van 1:30 en een lengte van 8 meter geconstrueerd. Tijdens de proeven is de water diepte op diepwater, h_0 , op 0,73 meter gehouden.

3.1.2 Opzet van het model

De proeven van *Van der Meer* [1986, 1987a] zijn gedaan met 1000 en 3000 golven. Omdat slechts weinig tijd beschikbaar is om de modelproeven op een enkele toplaag uit te voeren, is besloten het aantal golven beperkt te houden tot 1000. Met dit aantal is een vergelijking met een dubbele toplaag mogelijk (deze zijn ook met 1000 golven beproefd). Het is dus niet mogelijk de invloed van het aantal golven op de stabiliteit van een enkele toplaag te bepalen. Aangenomen wordt echter dat als na 1000 golven geen schade is opgetreden, meer golven ook niet tot schade zullen leiden (*Van der Meer* [1986, 1987]). Verder zijn de golven met behulp van een Pierson Moskowitz spectrum gegenereerd omdat dit spectrum ook is gebruikt door *Van der Meer* [1985, 1986, 1987]. Verder is een helling van 1:1,5 toegepast omdat *Van der Meer* [1986, 1987a] deze helling ook heeft gebruikt.

3.1.3 Het proevenprogramma

De modellen zijn getest op 3 verschillende golfsteilheden (een serie proeven had een constante golfsteilheid) en variërende golfhoogten en -perioden. De series werden gestart met een lage golfhoogte en werd per proef, aan de hand van de resultaten van de vorige proef, verhoogd. De golfperiode werd natuurlijk ook groter, zodat de golfsteilheid ongeveer gelijk bleef. Het ingolven is steeds als eerste proef in de serie meegenomen. Tenslotte is geprobeerd het aantal proeven per element zo beperkt mogelijk gehouden (9 tot 12).

3.1.4 Bepalen van de golfhoogte

Met behulp van 4 golfhoogtemeters (*GHM*), 2 keer een paar, is de golfhoogte op diep water bepaald (*Figuur 1*). De gemiddelde significante golfhoogte van deze golfhoogtemeters is aangeduid als de significante golfhoogte op diep water, H_{s0} . Voor het bepalen van de golfhoogten bij de constructie is in eerste instantie uitgegaan van een zogenaamde 2-puntsmeting. Eén golfhoogtemeter is vrijwel op de teen van de constructie geplaatst en de ander op een bepaalde afstand daar vandaan. Nadat 14 proeven uitgevoerd waren, is overgegaan op de zogenaamde 3-puntsmeting. Eén golfhoogtemeter is op ongeveer een halve golflengte afstand vanaf het snijpunt van het waterspiegel met het talud van de constructie geplaatst. De tweede golfhoogtemeter is een bepaalde afstand, *, verder geplaatst. De derde golfhoogtemeter is op een afstand $1,5*$ van de tweede golfhoogtemeter geplaatst.

Omdat er onduidelijkheid bestaat over de betrouwbaarheid van zowel de 2-punts-, als de 3-puntsmeting zijn 22 proeven overgedaan zonder constructie (zie *Proeven zonder constructie*). Er is gebruik gemaakt van de zogenaamde 3-puntsmeting waarbij de eerste golfhoogtemeter geplaatst is op de plek waar oorspronkelijk de teen van de constructie stond. De gemiddelde significante golfhoogte van deze 3 golfhoogtemeters kan niet als de significante golfhoogte bij de constructie worden aangeduid omdat de proeven met slechts 500 golven zijn gedaan. Een relatie tussen de golfhoogte op diep water en de golfhoogte bij de constructie kan echter wel worden gelegd omdat de significante

golfhoogte op diepwater ook is gemeten tijdens de proeven zonder constructie (zie *Proeven zonder constructie*, bij de *Bijlagen*). Deze relatie is gebruikt om de uiteindelijke significante golfhoogte bij de constructie, H_s , te kunnen bepalen.

3.1.5 Afstand tussen de golfhoogtemeters

De afstand tussen de golfhoogtemeters is afhankelijk van de piekperiode (T_p) waarmee getest wordt; bij een langere piekperiode moet de afstand tussen de golfhoogtemeters groter zijn dan bij een kortere periode. Een deel van het gegenereerde spectrum wordt niet geregistreerd als de afstand tussen de golfhoogtemeters te klein is. In *Beschrijving van de proeven* zijn de posities van de golfhoogtemeters voor de proeven terug te vinden.

3.1.6 Schade

De toplaag modellen zijn in kleurenbanden opgebouwd. Alleen elementen die tot buiten de eigen kleurenband zijn verplaatst worden meegeteld bij het bepalen van schade. Een serie proeven bestaat uit 2 tot 8 proeven met dezelfde range in golfsteilheid op diep water maar met verschillende golfhoogten en golfperioden. De constructies zijn tot bezwijken beproefd. Het profiel is pas hersteld na een serie proeven met dezelfde golfsteilheid.

3.2 Kubussen

3.2.1 Plaatsing

Er is gebruik gemaakt van kubussen met een gemiddeld gewicht van ongeveer 285 gram, zie *Bijlage IV*, een nominale diameter van 0,051 meter en een relatieve dichtheid van 1,21. Kubussen zijn niet alleen op de vlakken maar ook op de hoeken en ribben geplaatst, zodanig dat op het oog een random plaatsing ontstond. Getracht is de porositeit van de constructie laag te houden omdat verwacht werd dat dit tot een hoge stabiliteit zou leiden. Er zijn in totaal 275 kubussen op 1 m² geplaatst. De plaatsing van de kubussen op het model leverde verder geen problemen op en zag er als volgt uit: (*Foto 3*).

Laag 1: 55 oranje kubussen (bij de teen)

Laag 2: 55 blauwe kubussen

Laag 3: 55 grijze kubussen

Laag 4: 55 oranje kubussen

Laag 5: 55 blauwe kubussen

Een laag was ongeveer 3 tot 4 kubussen breed. De opzet van het model is te zien in *Figuur 2* en *3*.

3.2.2 Plaatsingsdichtheid

Het volume van de toplaag is niet gemeten. Het volume wordt geschat op 0,05 m³ (*Bijlage IV.2*). Er zijn in totaal 275 kubussen geplaatst met een gezamenlijk volume van 0,0365 m³ (275*0,051³). De equivalente laagdikte van het beton is dus 3,6 cm. De porositeit van de toplaag met kubussen is ongeveer 0,28 ((0,05-0,0365)/0,05). Per m² zijn 275 (275/ 1 m²) kubussen geplaatst (*Bijlage IV.3*).

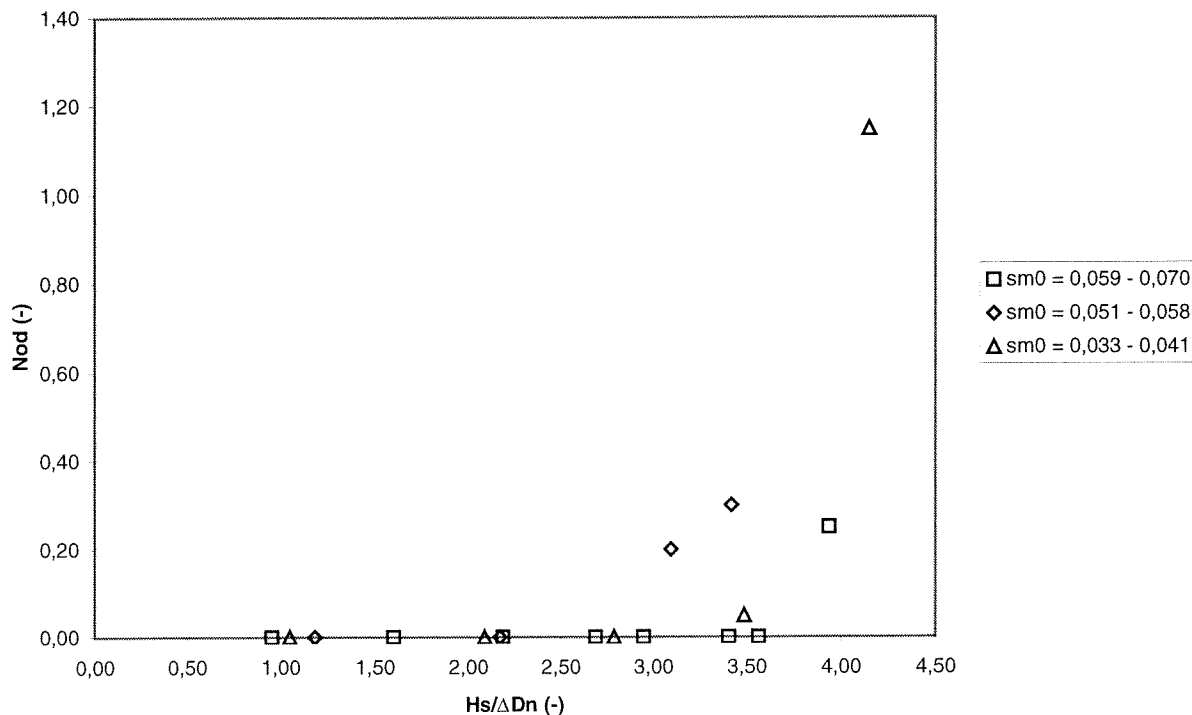
3.2.3 Testprogramma

Kubussen in een enkele toplaag zijn als eerste getest met een serie waarvan de golfsteilheid op diep water varieerde tussen de 0,060 en 0,070. De volgende serie had een golfsteilheid tussen de 0,045 en 0,058. Getracht is de laatste serie proeven op kubussen uit te voeren met $0,030 < s_{m0} < 0,040$. De consequentie hiervan was wel dat de constructie niet op kleine golfsteilheden is getest. Het testprogramma op kubussen in een enkele toplaag is er uiteindelijk als volgt uit komen te zien.

Tabel 3.1 Testprogramma "kubussen" in een enkele toplaag

$s_{m0} = 0,059 - 0,070$		$s_{m0} = 0,045 - 0,058$		$s_{m0} = 0,033 - 0,041$	
H_{s0} (m)	T_{m0} (s)	H_{s0} (m)	T_{m0} (s)	H_{s0} (m)	T_{m0} (s)
0,069	0,85	0,060	0,83	0,070	1,04
0,105	1,03	0,075	0,91	0,120	1,41
0,138	1,22	0,129	1,28	0,160	1,63
0,168	1,27	0,187	1,46	0,199	1,96
0,184	1,32	0,200	1,57	0,238	2,10
0,214	1,40	0,208	1,62		
0,245	1,56				
0,270	1,64				

De resultaten van deze proeven zijn te vinden in *Tabel 1* en *Figuur 3.1*. Zie *Beschrijving van de proeven A*, achter in dit rapport, voor een beschrijving van de observatie na elke proef.



Figuur 3.1 Schadeverloop kubussen in een enkele toplaag bij verschillende golfsteilheden

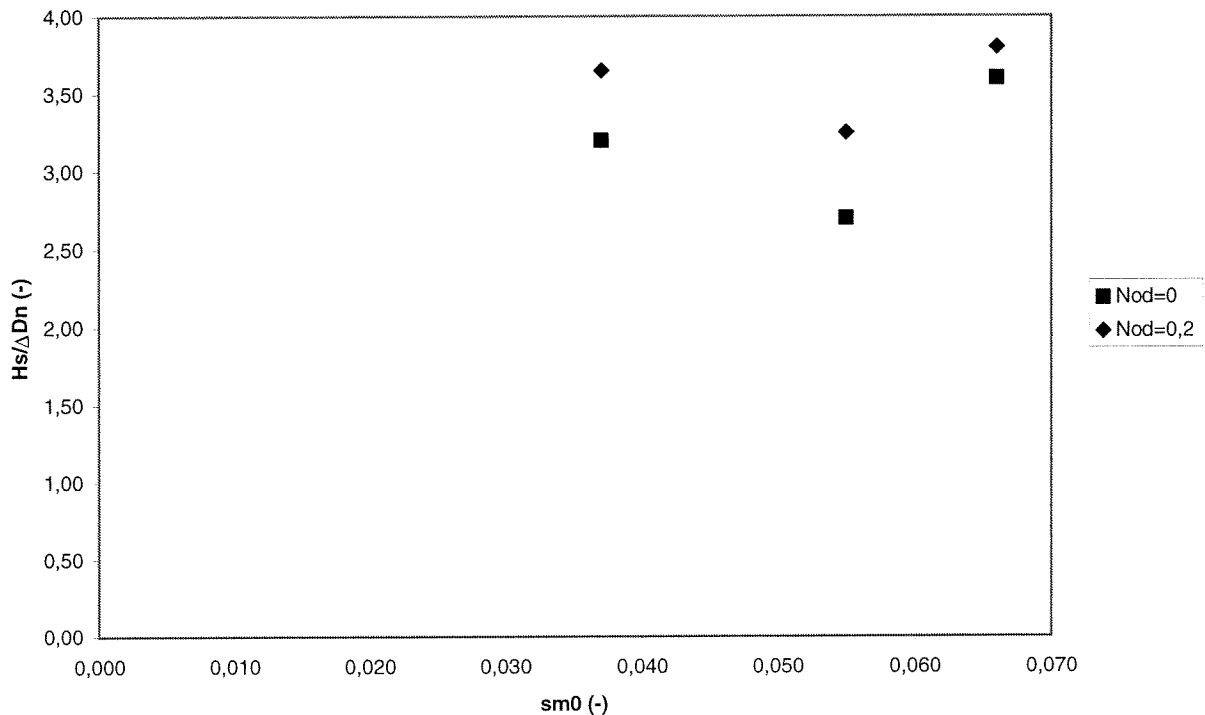
3.2.4 Analyse van de resultaten

Kubussen die uit het model worden geslagen, rollen vrijwel meteen naar de bodem van de bak. Hierdoor speelde de breedte van de kleurenbanden geen rol meer. Het herstel van het model bij geringe schade is een kwestie van bijplaatsen van kubussen boven *SWL*. Kubussen die onder aan de constructie liggen, kunnen eventueel worden gebruikt. Tijdens een serie proeven is de golfbreker overigens niet hersteld. Schade ontstaat in het algemeen onder *SWL*. Gaten die ontstaan door weggeslagen kubussen worden door zakking opgevuld door andere kubussen. Dit leidt tot een dichtere pakking in de lagen beneden *SWL* en een lossere pakking daarboven.

Vanaf 5 tot 6 weggeslagen kubussen liggen de elementen in de lagen boven *SWL* zo los van elkaar dat de golfbreker kort hierna bezwijkt. Het aantal van 5 tot 6 kubussen komt overeen met een N_{od} -waarde tussen de 0,25 en 0,30. Als 'bezwijk' criterium wordt een waarde van 0,2 (4 verplaatste kubussen) gekozen, omdat deze waarde enigszins veiliger is

Uit *Figuur 3.1* blijkt dat kubussen in een enkele toplaag zeer stabiel zijn. Er sprake is van een progressief bezwijkgedrag op het moment dat enig schade is opgetreden; bij een kleine verhoging van het stabiliteitsgetal ($H_s/\Delta D_n$) kan al 'bezwijken' optreden. Aan de hand van visuele waarnemingen kan worden gesteld dat overschrijding van $N_{od} = 0,2$ tot bezwijken van de constructie leidt. Hier hoort een stabiliteitsgetal bij van ongeveer 3,2. Verder kan aan de hand van *Figuur 3.1* worden vastgesteld dat 'start van schade' optreedt bij een stabiliteitsgetal van rond de 2,8. Het is echter niet veilig om op deze waarde te ontwerpen, in verband met het bros bezwijkgedrag van de constructie. Op de waarde van 2,8 moet dus een veiligheidsfactor worden toegepast. De grote van deze veiligheidsfactor wordt in *Paragraaf 3.5* bepaald.

Met behulp van *Figuur 3.1* kan de invloed van de golfsteilheid op de stabiliteit worden bepaald. Deze blijkt een grote invloed op de stabiliteit te hebben (*Figuur 3.2*). Minimum stabiliteit treedt waarschijnlijk op bij een golfsteilheid tussen 0,040 en 0,060.



Figuur 3.2 De invloed van de golfsteilheid op de stabiliteit

Opgemerkt dient te worden dat de modelproeven een momentopname zijn. De schadekrommen die tijdens de proeven zijn gevonden, kunnen in feite iets verschillen met eventuele modelproeven op een later tijdstip.

3.2.5 Samenvattend

- Plaatsing van de kubussen op het model levert weinig problemen op.
- Er zijn 275 kubussen per vierkante meter geplaatst.
- De porositeit van de toplaag was ongeveer 0,28.
- De golfsteilheid heeft een grote invloed op de stabiliteit.
- Minimum stabiliteit treedt waarschijnlijk op bij s_{m0} tussen 0,040 en 0,060.
- 'Start van schade' ($H_s/\Delta D_n = 2,8$) ontstaat in de lagen onder SWL.
- Overschrijding van $N_{od} = 0,2$ ($H_s/\Delta D_n > 3,2$) leidt tot bezwijken van de constructie.

Bij de toegepaste plaatsing- en ontwerpmethodologie is het toepassen van kubussen in een enkele toplaag zeer goed mogelijk. Onderzoek naar de invloed van het aantal kubussen per vierkante meter op de stabiliteit wordt aangeraden.

3.3 Tetrapoden

3.3.1 Plaatsing

Er is gebruik gemaakt van Tetrapoden met een gewicht van ongeveer 284 gram, zie *Bijlage V*, een nominale diameter van 0,050 meter en een relatieve dichtheid van 1,32. Het kostte veel tijd de elementen stabiel en regelmatig te plaatsen omdat de filterlaag niet helemaal vlak was. Een zeer vlakke filterlaag, hetgeen moeilijk is te realiseren, zou de plaatsingstijd hebben verkort. Alle Tetrapoden zijn op de drie poten geplaatst met om en om één poot wijzend naar voren en één wijzend naar achteren, waardoor een regelmatige plaatsing ontstond. Op ongeveer 1 vierkante meter zijn 196 Tetrapoden geplaatst. De plaatsing van de Tetrapoden zag er als volgt uit (*Foto 27*):

Laag 1: 56 gele Tetrapoden (bij de teen)

Laag 2: 56 rode Tetrapoden

Laag 3: 56 bruine Tetrapoden (vanaf SWL)

Laag 4: 28 blauwe Tetrapoden (begin kruin)

Lagen 1 tot en met 3 zijn 4 Tetrapoden breed en laag 4 is 2 Tetrapoden breed. De opzet van het model is te zien in *Figuur 4*.

3.3.2 Plaatsingsdichtheid

Het volume van de toplaag is ongeveer $0,064 \text{ m}^3$ (*Bijlage V.2*). Er zijn in totaal 196 Tetrapoden geplaatst met een gezamenlijk volume van $0,0245 \text{ m}^3$ ($196 \cdot 0,050^3$). De fictieve porositeit van de toplaag met Tetrapoden bedraagt dus ongeveer 0,62 ($(0,064 - 0,0245) / 0,064$). De equivalente beton laagdikte is 0,019 ($(1 - 0,62) \cdot 0,05$). Dit is ongeveer 50% minder dan bij de proeven met kubussen. Per m^2 zijn ongeveer 196 ($196 / 1 \text{ m}^2$) Tetrapoden geplaatst (*Bijlage V.3*)

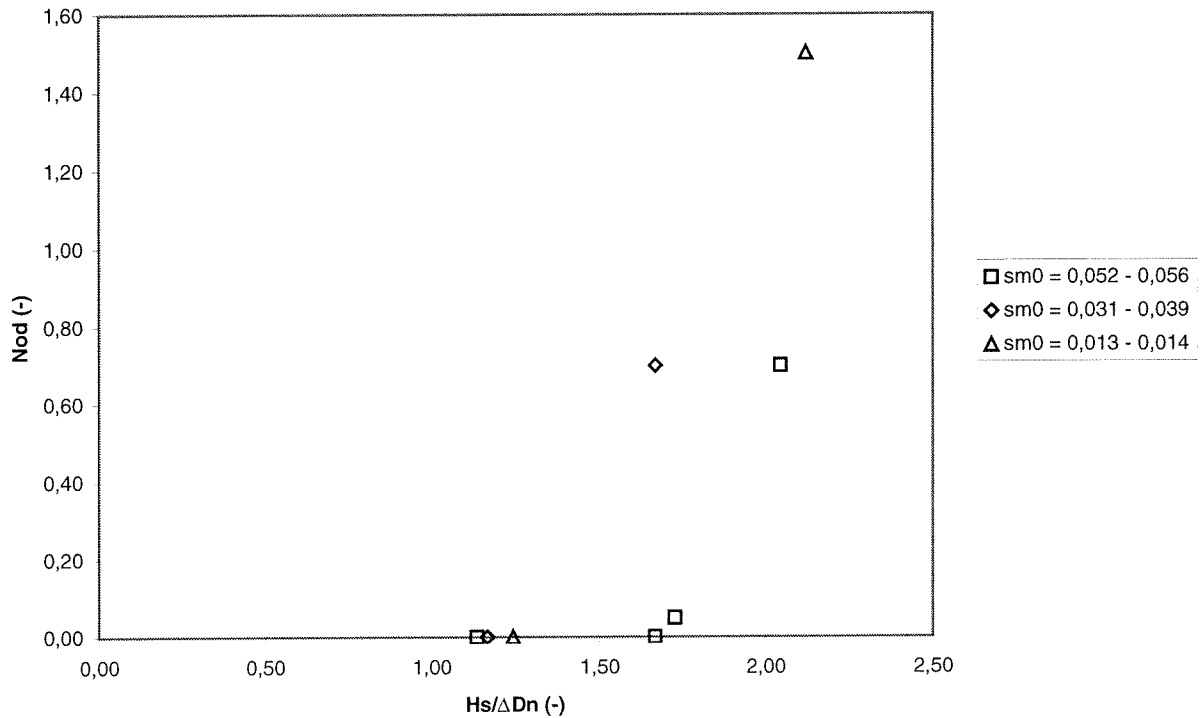
3.3.3 Testprogramma

De constructie is op de volgende drie golfsteelheden, s_{m0} , getest.

Tabel 3.2 Testprogramma "Tetrapoden" in een enkele toplaag

$s_{m0} = 0,052 - 0,056$		$s_{m0} = 0,031 - 0,039$		$s_{m0} = 0,013 - 0,014$	
H_{s0} (m)	T_{m0} (s)	H_{s0} (m)	T_{m0} (s)	H_{s0} (m)	T_{m0} (s)
0,077	0,96	0,082	1,16	0,068	1,86
0,112	1,13	0,100	1,44	0,096	2,07
0,117	1,20				
0,134	1,28				

De resultaten zijn na te zien in *Tabel 2* en *Figuur 3.3*. Zie *Beschrijving van de proeven B* voor een beschrijving van de observatie na elke proef.



Figuur 3.3 Schadeverloop Tetrapoden in een enkele toplaag bij verschillende golfsteilheden

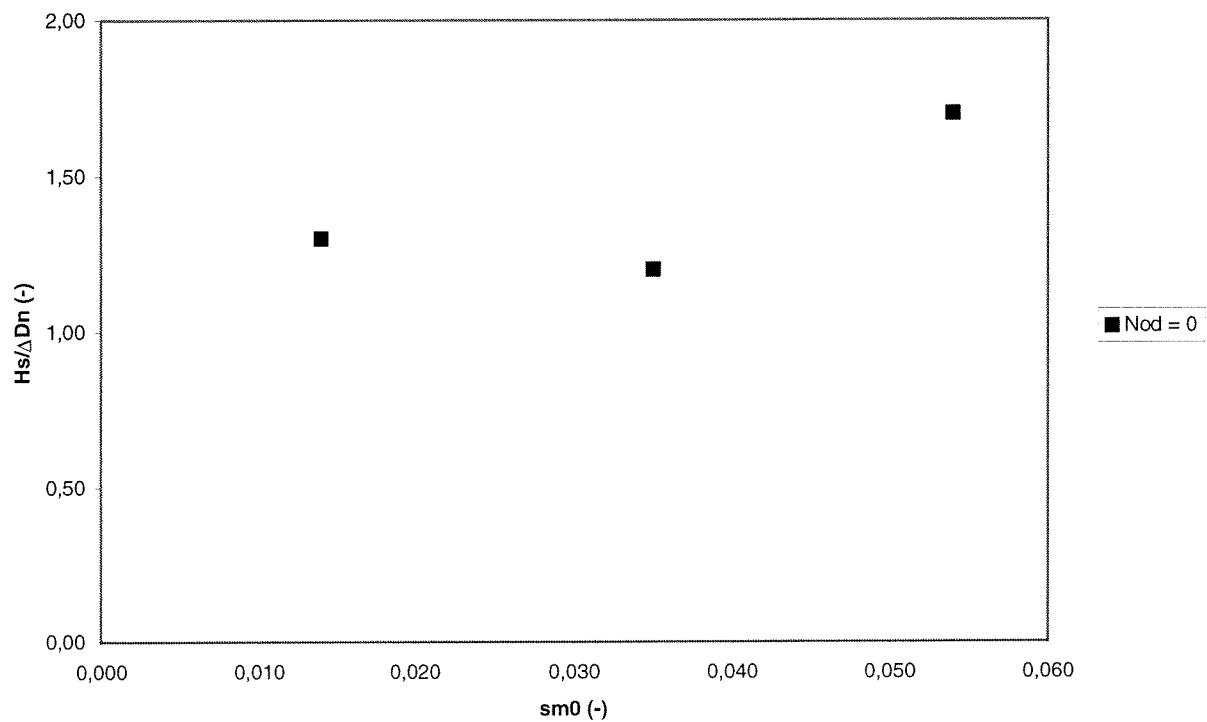
3.3.4 Analyse van de resultaten

Schade begint rond *SWL*. Weggeslagen elementen blijven op de laag eronder liggen en vormen zo een vrij stabiele dubbele laag (Foto 33). Deze dubbele laag lijkt in zijn geheel niet op een dubbele toplaag zoals deze in de praktijk wordt geplaatst. Herstellen van schade is in principe een zaak van bij plaatsen van elementen boven *SWL*. Eerder weggeslagen elementen kunnen niet worden gebruikt omdat deze een belangrijke rol in de stabiliteit onder *SWL* spelen. Tijdens een serie proeven is schade tussentijds niet hersteld.

Uit Figuur 3.3 blijkt dat Tetrapoden in een enkele toplaag erg instabiel zijn. 'Start van schade' treedt op bij een stabiliteitsgetal ($H_s/\Delta D_n$) van ongeveer 1,2. Het bepalen van het 'bezwijk' criterium is erg lastig omdat na verplaatsing van enkele elementen de golfbreker vrij snel bezwijkt (progressief of bros bezwijkgedrag). Het criterium 'start van schade' kan daarom het best ook als 'bezwijk' criterium worden gehanteerd.

Het 'start van schade' criterium is geen goed ontwerpcriterium vanwege het bros bezwijkgedrag. Het is beter om voor het ontwerp een zogenaamd 'geen schade' criterium vast te stellen die gevonden wordt door op het 'start van schade' criterium een veiligheidsfactor toe te passen. De veiligheidsfactor wordt in Paragraaf 3.5 berekend.

Aan de hand van Figuur 3.3 kan de invloed van de golfsteilheid op de stabiliteit worden bepaald (Figuur 3.4). Minimum stabiliteit treedt waarschijnlijk op bij s_{m0} tussen 0,020 en 0,045.



Figuur 3.4 De invloed van de golfsteilheid op de stabiliteit bij zowel 'start van schade' als 'bezwijken'

3.3.5 Samenvattend

- Per m² zijn ongeveer 196 Tetrapoden geplaatst.
- De porositeit van de toplaag was ongeveer 0,62.
- 'Start van schade' ($H_s/\Delta D_n = 1,2$) treedt rond SWL op.
- Het 'bezwijk' criterium is hetzelfde als het criterium voor 'start van schade'.
- Onder SWL ontstaat bij schade een stabiele "dubbele" toplaag.
- Minimum stabiliteit treedt waarschijnlijk op bij $0,020 \leq s_{m0} \leq 0,045$.

Het toepassen van Tetrapoden in een enkele toplaag, met een plaatsingsdichtheid zoals hier gebruikt, wordt afgeraden omdat de elementen al instabiel zijn bij kleine golfhoogten. Meer elementen per vierkante meter kan wellicht een grotere stabiliteit tot gevolg hebben. Het zelfde geldt voor een andere plaatsingsmethode.

3.4 Breukstenen

3.4.1 Plaatsing

Er is gebruik gemaakt van breukstenen met een M_{50} van 176 gram, zie *Bijlage VI.1*, een breedte van 1,22 en een relatieve dichtheid van 1,62. Om de plaatsing te vergemakkelijken is een kist, zonder bodem, met de afmetingen 1*0,33 m gemaakt, waarin de breukstenen met de hand werden gestort; Een random plaatsing ontstond. Verder is ervoor gezorgd dat de toplaag enkel werd aangebracht. Op 1 vierkante meter zijn in totaal 342 breukstenen geplaatst. De plaatsing kostte niet veel tijd en zag er als volgt uit (*Foto 41 en 42*):

Laag 1: 98 rode breukstenen (bij de teen)

Laag 2: 96 blauwe breukstenen (halverwege SWL)

Laag 3: 148 witte breukstenen (halverwege begin kruin)

De lagen 1 en 2 zijn 6 à 7 breukstenen breed. Laag 3 is 9 à 10 breukstenen breed. De opzet van het model is te zien in *Figuur 5*.

3.4.2 Plaatsingsdichtheid

Het volume van de toplaag is ongeveer $0,033 \text{ m}^3$ (*Bijlage VI.2*). Er zijn in totaal 342 breukstenen geplaatst met een gezamenlijk volume van $0,0223 \text{ m}^3$ ($342 \cdot 0,0406^3$). De porositeit van de toplaag met breukstenen is ongeveer 0,33 ($(0,033 - 0,0223) / 0,033$). Per m^2 zijn 342 ($342 / 1 \text{ m}^2$) breukstenen geplaatst (*Bijlage VI.3*). De equivalente steen dikte was ongeveer 0,027 m ($(1 - 0,33) \cdot 0,0406$). Dit komt ongeveer overeen met de laagdikte van de tetrapoden maar is toch significant kleiner dan de laagdikte van kubussen.

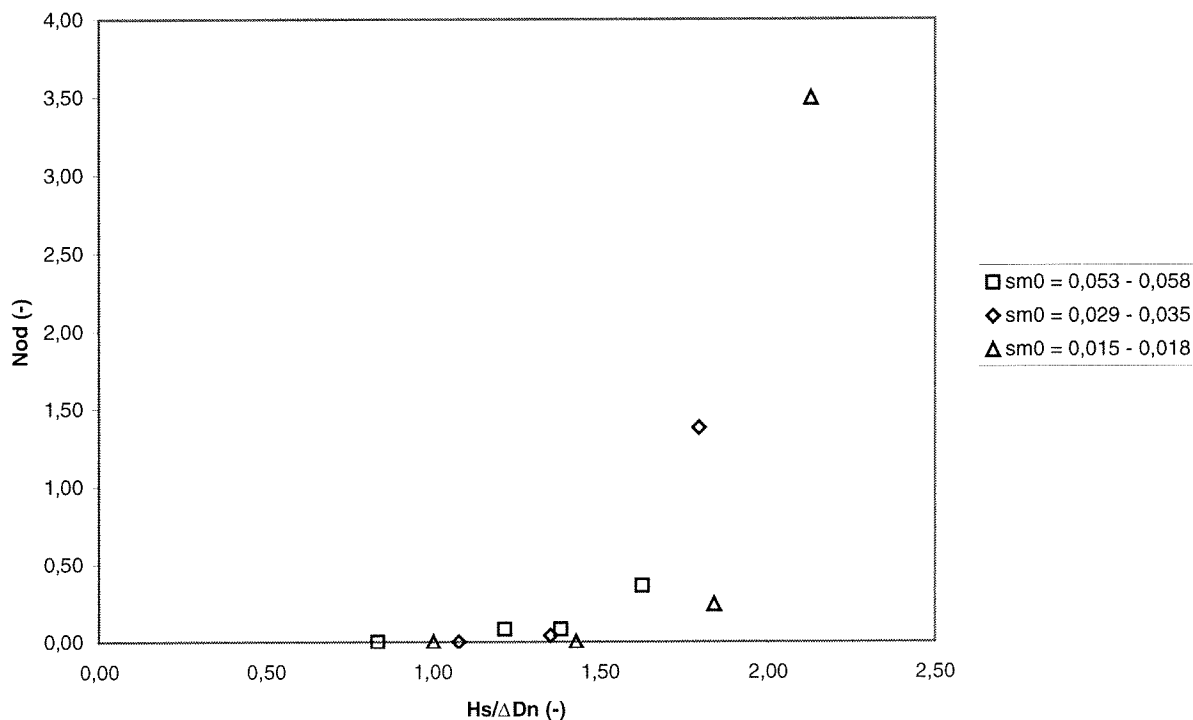
3.4.3 Testprogramma

De constructie is op de volgende drie golfsteilheden, s_{m0} , getest, zie *Tabel 3.3*.

Tabel 3.3 Testprogramma "breukstenen" in een enkele toplaag

$s_{m0} = 0,053 - 0,058$		$s_{m0} = 0,029 - 0,035$		$s_{m0} = 0,015 - 0,018$	
H_{s0} (m)	T_{m0} (s)	H_{s0} (m)	T_{m0} (s)	H_{s0} (m)	T_{m0} (s)
0,060	0,84	0,071	1,24	0,059	1,44
0,085	0,98	0,088	1,26	0,078	1,73
0,096	1,03	0,109	1,42	0,098	2,01
0,105	1,13			0,108	2,12

De resultaten zijn na te zien in *Tabel 3* en *Figuur 3.5*. Zie *Beschrijving van de proeven C* voor een beschrijving van de observatie na elke proef.



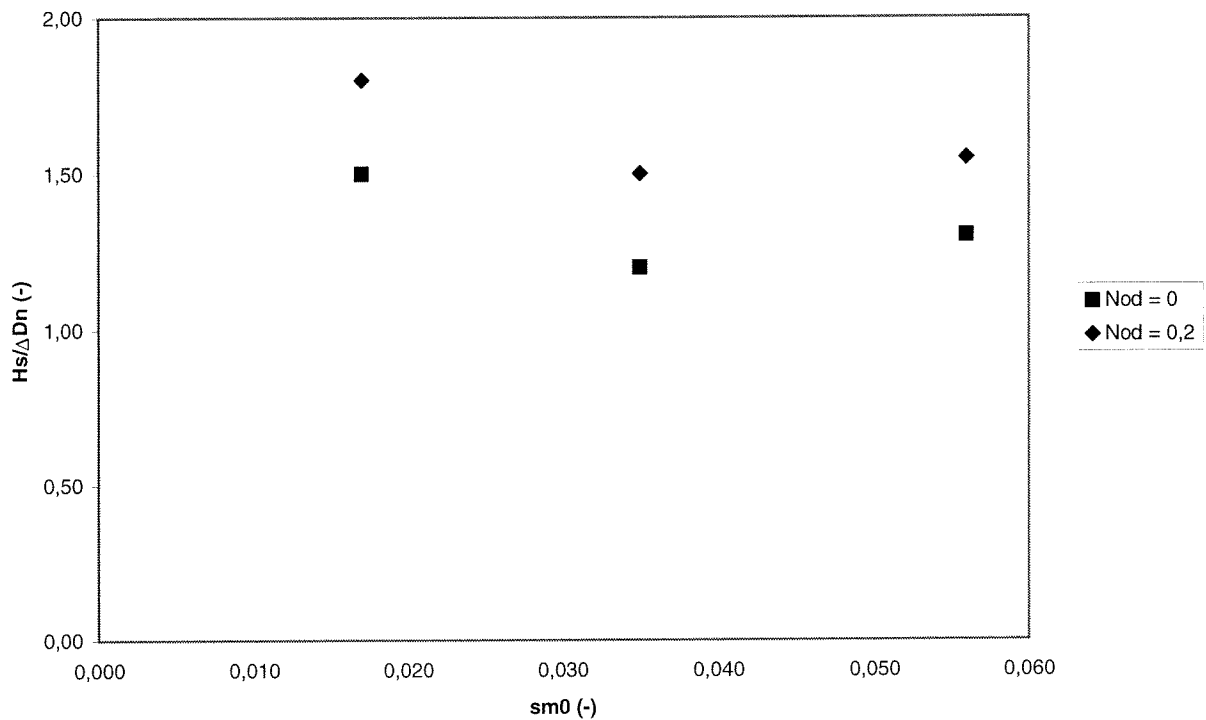
Figuur 3.5 Schadeverloop breukstenen in een enkele toplaag bij verschillende golfsteilheden

3.4.4 Analyse van de resultaten

Op een helling van 1:1,5 hebben de elementen de neiging om ten gevolge van het eigen gewicht naar beneden te glijden. De plaatsing van de elementen wordt hierdoor bemoeilijkt. Start van schade treedt op rond SWL. De breukstenen die als eerste worden weggeslagen, blijven op de laag eronder of op de teen van de constructie liggen. Enkel worden uiteindelijk ook daarvandaan verplaatst. De golfbreker bezwijkt vrij snel nadat ongeveer 6 breukstenen zijn verplaatst. In bezwijk toestand liggen veel elementen op de teen van de constructie. Uit *Figuur 3.5* blijkt dat breukstenen in een enkele toplaag niet stabiel zijn; schade ontstaat al bij kleine waarden van het stabiliteitsgetal.

Het aantal van 6 verplaatste breukstenen komt overeen met een N_{od} -waarde van 0,24. Het 'bezwijk' criterium wordt derhalve bepaald op $N_{od} = 0,2$, omdat deze waarde enigszins veiliger is. Hier hoort een stabiliteitsgetal bij van 1,5. 'Start van schade' wordt op $N_{od} = 0$ gesteld (nog geen verplaatste elementen). De stabiliteitswaarde ($H_s/\Delta D_n$) die hierbij hoort is ongeveer 1,2 (zie *Figuur 3.5*). Doordat er sprake is van een bros bezwijkgedrag is het niet aan te raden om op het 'start van schade' criterium te ontwerpen. Door op het 'start van schade' criterium een veiligheidsfactor toe te passen, kan een 'geen schade' criterium worden berekend waarop ontworpen kan worden. Deze veiligheidsfactor wordt in *Paragraaf 3.5* berekend.

Aan de hand van *Figuur 3.5* kan de invloed van de golfsteilheid op de stabiliteit worden bepaald (*Figuur 3.6*). De golfsteilheid blijkt een redelijke invloed op de stabiliteit te hebben en minimum stabiliteit blijkt op te treden bij proeven met s_{m0} tussen 0,030 en 0,040.



Figuur 3.6 De invloed van de golfsteilheid op de stabiliteit

3.4.5 Samenvattend

- De toegepaste helling werkt de stabiliteit tegen.
- Per m² zijn ongeveer 340 breukstenen geplaatst.
- De porositeit van de toplaag was ongeveer 0,33.
- 'Start van schade' ($H_s/\Delta D_n = 1,2$) treedt rond *SWL* op.
- Onder *SWL* ontstaat bij schade een dubbele toplaag.
- Minimum stabiliteit treedt op bij proeven met $0,035 \leq s_{m0} \leq 0,040$.
- Het 'bezwijk' criterium mag op $N_{od} = 0,2$ worden gesteld ($H_s/\Delta D_n = 1,5$). Overschrijding van deze waarde leidt tot bezwijken.

Breukstenen in een enkele toplaag bij een helling van 1:1,5 worden afgeraden omdat de elementen de neiging hebben de helling af te glijden ten gevolge van het eigen gewicht. Het toepassen van stortstenen in een enkele toplaag met een flauwere helling kan wellicht nog zinvol zijn.

3.5 Veiligheidsfactor

Bij toepassing van kubussen, Tetrapoden en breukstenen in een enkele toplaag moet rekening worden gehouden met een bros bezwijkgedrag; nadat schade is opgetreden, leidt een kleine verhoging van de golfhoogte snel tot meer schade en soms zelfs tot bezwijken. Hierom wordt afgeraden te ontwerpen op de aangegeven 'start van schade' criteria voor de verschillende elementen. Een kleine misrekening in de golfhoogte kan immers desastreuze gevolgen hebben. Door op het 'start van schade' criterium een veiligheidsfactor toe te passen, kan een zogenaamd 'geen schade' criterium worden berekend waarop veilig kan worden ontworpen. De hoogte van die veiligheidsfactor wordt in deze paragraaf berekend.

Kubussen

'Bezwijken' $H_s/\Delta D_n > 3,2$

'Start van schade' $H_s/\Delta D_n = 2,8$

Een vuistregel voor de standaarddeviatie van de dichtheid van het beton (ρ_s) is ongeveer 3% van het gemiddelde. De standaarddeviatie van de dichtheid van water (ρ_w) is ongeveer 1% van het gemiddelde. (CIAD projectgroup [1985]. In een onwaarschijnlijk geval is de dichtheid van het beton 4% minder en de dichtheid van het water 1% hoger. In dat geval wijkt de standaarddeviatie van de relatieve dichtheid (Δ) 4% af van het gemiddelde. Van der Meer en Pilarczyk [1987] nemen een afwijking van 3% aan.

De standaarddeviatie van de nominale diameter voor betonnen elementen is volgens CIAD project group [1985] 2% van het gemiddelde bij gebruik van een nominale diameter van 1,69 meter. Van der Meer en Pilarczyk [1987] geven 3% bij een nominale diameter van 1 meter.

CIAD project group [1985] en Van der Meer en Pilarczyk [1987] gebruiken voor de onzekerheid van de golfhoogte een zogenaamde Weibull verdeling. Gekozen wordt om de standaarddeviatie van de significante golfhoogte op 15% van het gemiddelde te kiezen. De keuze van deze waarde is arbitrair en hangt in de praktijk af van de betrouwbaarheid van de beschikbare gegevens.

In een onwaarschijnlijk geval is de golfhoogte 15% hoger, de relatieve dichtheid 4% lager en de nominale diameter 2% lager. Het stabiliteitsgetal is dan 1,22 keer groter. Door deze waarde als veiligheidsfactor op het 'start van schade' criterium te gebruiken, wordt de kans op overschrijding gering. Bij gebruik van een veiligheidsfactor van 1,3 komt het 'geen schade' criterium op $H_s/\Delta D_n = 2,15$ te liggen (2,8/1,3). De significante golfhoogte die hierbij hoort is 0,13 m (2,15*1,21*0,051).

Tabel 3.5 Gemiddelden en standaardafwijkingen van de parameters van kubussen

Parameter	Verdeling	Gemiddelde (μ)	Standaarddeviatie (σ)
H_s (m)	normaal	0,13	0,0199
Δ (-)	normaal	1,21	0,0484
D_n (m)	normaal	0,051	0,0010
K (-)	normaal	2,8	0,196

K is de sterkte. Deze parameter wordt normaal verdeeld geacht en heeft de als waarde 2,8 ('start van schade' criterium). Deze waarde is bepaald in Paragraaf 3.2. De standaarddeviatie van deze waarde kan in principe rechtstreeks uit de modelproeven worden bepaald. Deze waarde wordt dan gebaseerd op slechts 3 punten, hetgeen niet bevorderlijk is voor de betrouwbaarheid. In de praktijk wordt vaak uitgegaan van een standaarddeviatie van ongeveer 7% van het gemiddelde. Deze waarde is daarom ook in dit onderzoek gebruikt.

Voor een betrouwbare constructie geldt dat de sterkte altijd groter is dan de belasting. De betrouwbaarheidsfunctie ziet er in dit geval als volgt uit:

$$Z = K - H_s/\Delta D_n \text{ en } Z > 0$$

K is de sterkte

$H_s/\Delta D_n$ is de belasting

Een zogenaamde Niveau II AFDA berekening wordt uitgevoerd om de veiligheid van de veiligheidsfactor te bepalen. Voor het gemiddelde van de betrouwbaarheidsfunctie geldt:

$$\mu_z = 2,8 - (0,13/(1,21*0,051)) = 0,65$$

Voor de standaarddeviatie van de betrouwbaarheidsfunctie geldt:

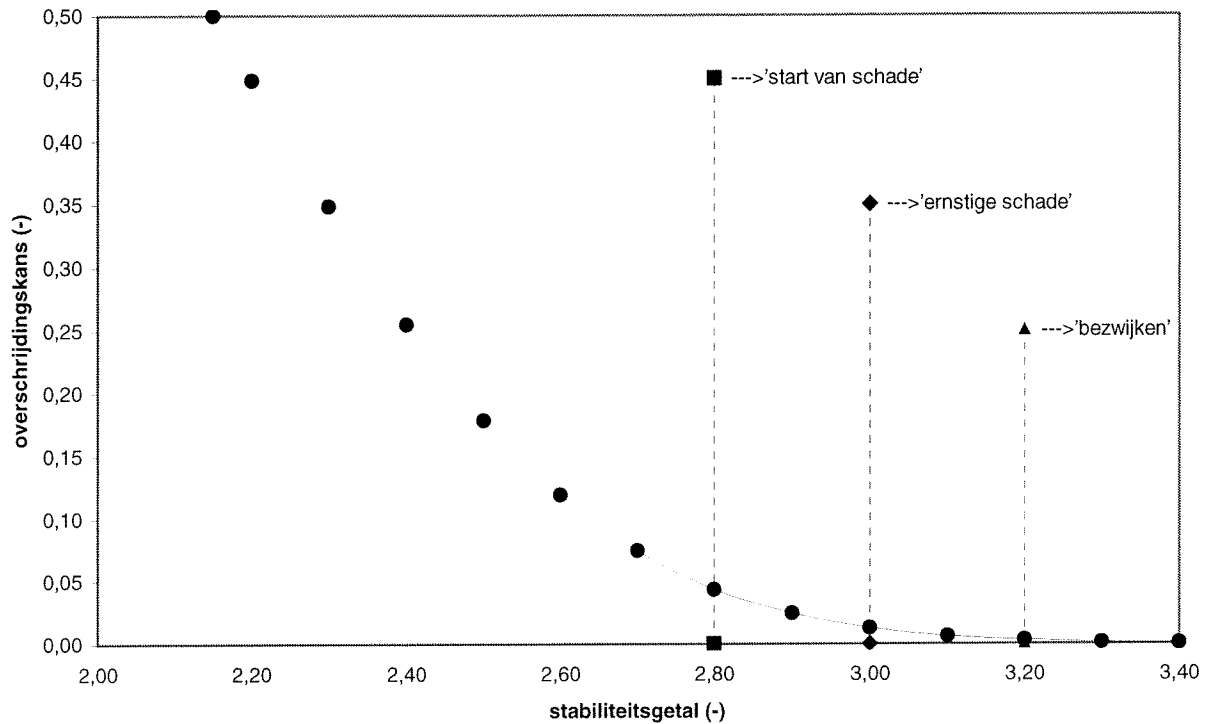
Tabel 3.6 Niveau II berekening voor kubussen

X	σ_x	$\delta Z/\delta X$	$((\delta Z/\delta X) * \sigma_x)^2$
H_s (m)	0,0199	$-1/(\Delta D_n)$	0,104
Δ (-)	0,0484	$H_s/(2\Delta^2 D_n)$	$1,85*10^{-3}$
D_n (m)	0,0026	$H_s/(2\Delta D_n^2)$	$0,46*10^{-3}$
K (-)	0,196	1	$38,42*10^{-3}$
			$\sigma_z^2 = 0,145$

$$\sigma_z = 0,38 \quad \beta = \mu_z/\sigma_z = 1,71 \quad \Phi(-1,71)^1 = 0,0436$$

Bij keuze van $H_s/\Delta D_n = 2,15$ als 'geen schade' criterium is de kans dat het stabiliteitsgetal groter is dan 2,8 ('start van schade') nog geen 4,5%. Indien een kans kleiner dan 5% acceptabel wordt geacht, is een veiligheidsfactor van 1,3 voldoende. De veiligheidsfactor op het 'bezwijk' criterium is, bij keuze van het 'geen schade' criterium op 2,15, ongeveer 1,5. De kans op overschrijding is 0,29%. Deze kans lijkt acceptabel. De overschrijdingskans is in *Figuur 3.7* in een grafiek uitgezet.

¹ zie tabel voor de standaardnormale verdeling
Eindrapport



Figuur 3.7 Overschrijdingskans "kubussen" in een enkele toplaag

Opgemerkt moet worden dat de onzekerheid in de golfhoogte arbitrair is. De ontwerper kan met behulp van de bovenstaande berekening zelf een veiligheidsfactor berekenen indien hij met grotere onzekerheden te maken krijgt.

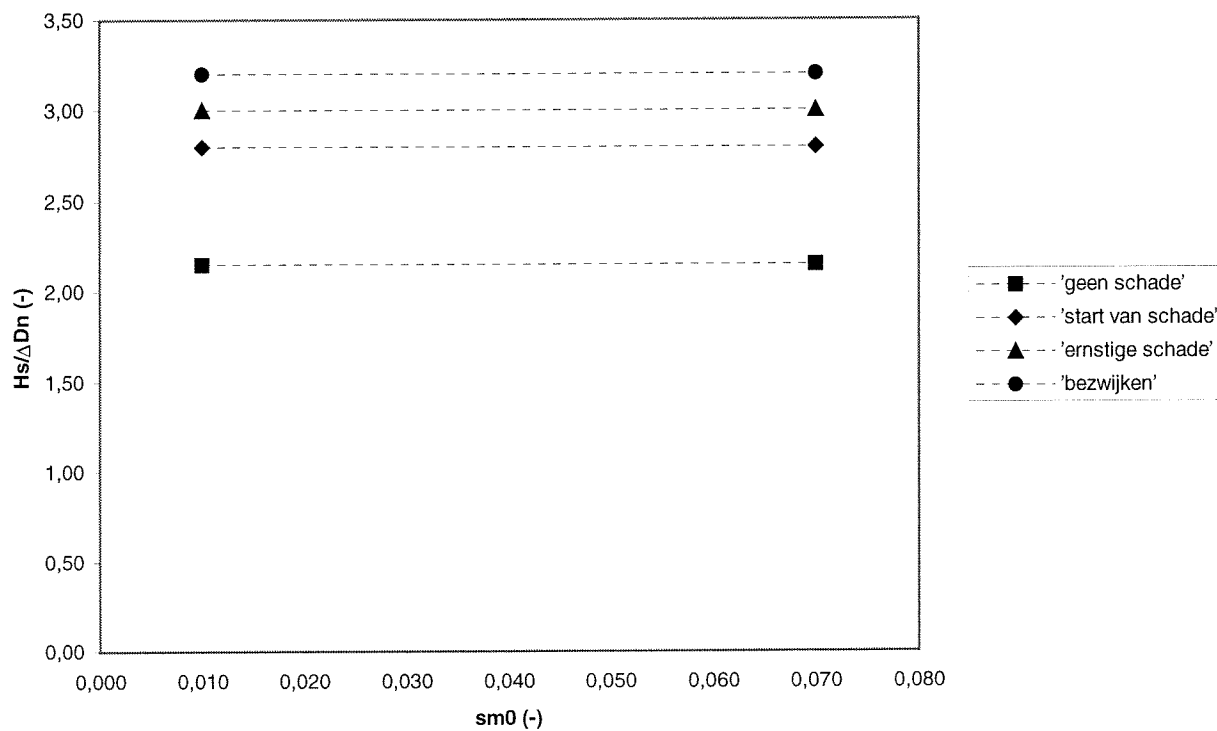
De invloed van de golfperiode is niet meegenomen in deze berekening. Dit is gerechtvaardigd omdat de gekozen waarde voor het 'start van schade' criterium rond de waarde van minimum stabiliteit ligt (zie Figuur 3.2). De invloed van de golfsteilheid is dus al enigszins meegenomen in de waarde van het 'start van schade' criterium. De laagste waargenomen stabiliteit hoeft echter nog niet het absolute minimum te zijn; niet alle golfsteilheden zijn beproefd.

De invloed van de helling op de stabiliteit is niet onderzocht. *Van der Meer en Pilarczyk* [1987] gaan uit van een afwijking van 0,15 op een helling van 1:3. Deze afwijking komt overeen met 5% van het gemiddelde.

Verder is de invloed van het aantal golven niet meegenomen. In de eerste plaats kan dat niet omdat alle proeven zijn uitgevoerd met 1000 golven. In de tweede plaats is uit eerder onderzoek op een dubbele toplaag gebleken dat als geen schade optreedt bij 1000 golven, meer golven ook niet tot schade leiden (*Van der Meer* [1986, 1987]). Er is daarom aangenomen dat de minimum stabiliteit bij 1000 golven is bereikt.

Tenslotte dient opgemerkt te worden dat geen rekening is gehouden met andere faalmechanismen, zoals schade door verzakking, een slecht gedimensioneerde filter- c.q. kernlaag, aanvaring door schepen enzovoort. Dit leidt tot grotere faalkansen dan de hier berekende waarden.

De criteria die van toepassing zijn voor kubussen in een enkele toplaag zijn weergegeven in *Figuur 3.8*. Een ontwerp kan het best op het zogenaamde 'geen schade' criterium worden gebaseerd.



Figuur 3.8 Ontwerpcriteria voor kubussen in een enkele toplaag

Tetrapoden

‘Bezwijken’ $H_s/\Delta D_n > 1,2$
 ‘Start van schade’ $H_s/\Delta D_n = 1,2$

Het ‘geen schade’ criterium komt op $H_s/\Delta D_n = 0,8$ te liggen als een veiligheidsfactor van 1,5 op het ‘bezwijk’ criterium wordt toegepast.

Tabel 3.7 Gemiddelden en standaardafwijkingen van de parameters van Tetrapoden

Parameter	Verdeling	Gemiddelde (μ)	Standaarddeviatie (σ)
H_s (m)	normaal	0,0528	$7,92 \cdot 10^{-3}$
Δ (-)	normaal	1,32	$52,8 \cdot 10^{-3}$
D_n (m)	normaal	0,05	$1,0 \cdot 10^{-3}$
K (-)	normaal	1,2	0,084

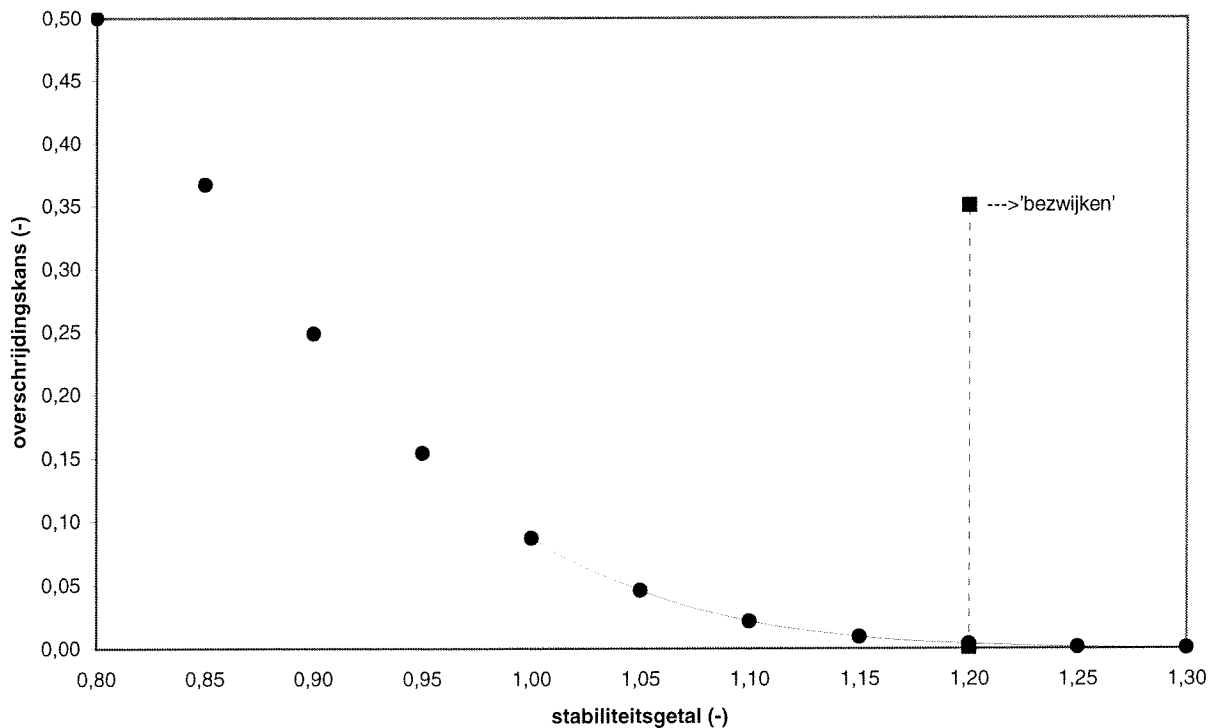
Het gemiddelde van de betrouwbaarheidsfunctie is 0,4. Voor de standaarddeviatie geldt:

Tabel 3.8 Niveau II berekening voor Tetrapoden

X	σ_x	$\delta Z/\delta X$	$((\delta Z/\delta X) * \sigma_x)^2$
H_s (m)	$7,92 \cdot 10^{-3}$	$-1/(\Delta D_n)$	$144 \cdot 10^{-4}$
Δ (-)	$52,8 \cdot 10^{-3}$	$H_s/(2\Delta^2 D_n)$	$2,65 \cdot 10^{-4}$
D_n (m)	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$H_s/(2\Delta D_n^2)$	$0,64 \cdot 10^{-4}$
K (-)	1,2	1	$70,56 \cdot 10^{-4}$
			$\sigma_z^2 = 0,0218$

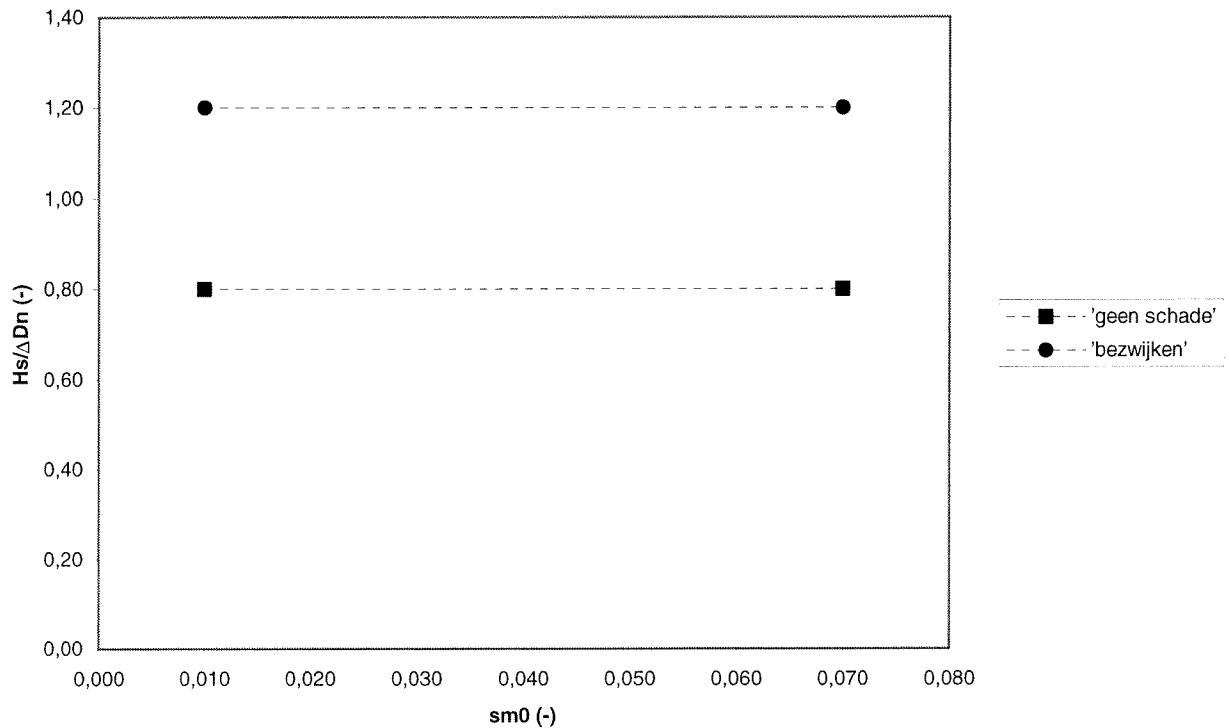
$\sigma_z = 0,15$ $\beta = \mu_z/\sigma_z = 2,71$ $\Phi(-2,71) = 0,00336$

Bij keuze van $H_s/\Delta D_n = 0,8$ als ‘geen schade’ criterium is de kans dat het stabiliteitsgetal groter is dan 1,2 (‘start van schade’) slechts 0,34%. De overschrijdskans is uitgezet in *Figuur 3.9*.



Figuur 3.9 Overschrijdskans” Tetrapoden” in een enkele toplaag

In *Figuur 3.10* zijn de verschillende criteria, die van toepassing zijn op Tetrapoden in een enkele toplaag, in een grafiek uitgezet.



Figuur 3.10 Ontwerpcriteria voor Tetrapoden in een enkele toplaag

Breukstenen

'Bezwijken' $H_s/\Delta D_n > 1,5$

'Start van schade' $H_s/\Delta D_n = 1,2$

De standaarddeviatie van de dichtheid van het steen (ρ_s) is ongeveer 5% van het gemiddelde. De standaarddeviatie van de dichtheid van water (ρ_w) is ongeveer 1% van het gemiddelde. (CIAD projectgroup [1985]). In een onwaarschijnlijk geval is dichtheid van het breuksteen 5% minder en de dichtheid van het water 1% hoger. In dat geval wijkt de standaarddeviatie van de relatieve dichtheid (Δ) 6% af van het gemiddelde

De standaarddeviatie van de nominale diameter voor breuksteen is volgens CIAD projectgroup [1985] 5% van het gemiddelde bij gebruik van een nominale diameter van 1,69 meter.

In een onwaarschijnlijk geval is de significante golfhoogte 15% hoger, de relatieve dichtheid 6% lager en de 50% diameter 5% kleiner. Het stabiliteitsgetal is dan 1,26 keer groter dan verwacht. Het is dus logisch om deze afwijking als veiligheidsfactor mee te nemen bij een ontwerp.

Het 'geen schade' criterium komt op $H_s/\Delta D_n = 0,9$ te liggen als een veiligheidsfactor van 1,3 op het 'start van schade' criterium wordt toegepast.

Tabel 3.9 Gemiddelden en standaardafwijkingen van de parameters van breukstenen

Parameter	Verdeling	Gemiddelde (μ)	Standaarddeviatie (σ)
H_s (m)	normaal	0,059	$8,85 \cdot 10^{-3}$
Δ (-)	normaal	1,615	$96,9 \cdot 10^{-3}$
D_n (m)	normaal	0,0406	$2,03 \cdot 10^{-3}$
K (-)	normaal	1,2	0,084

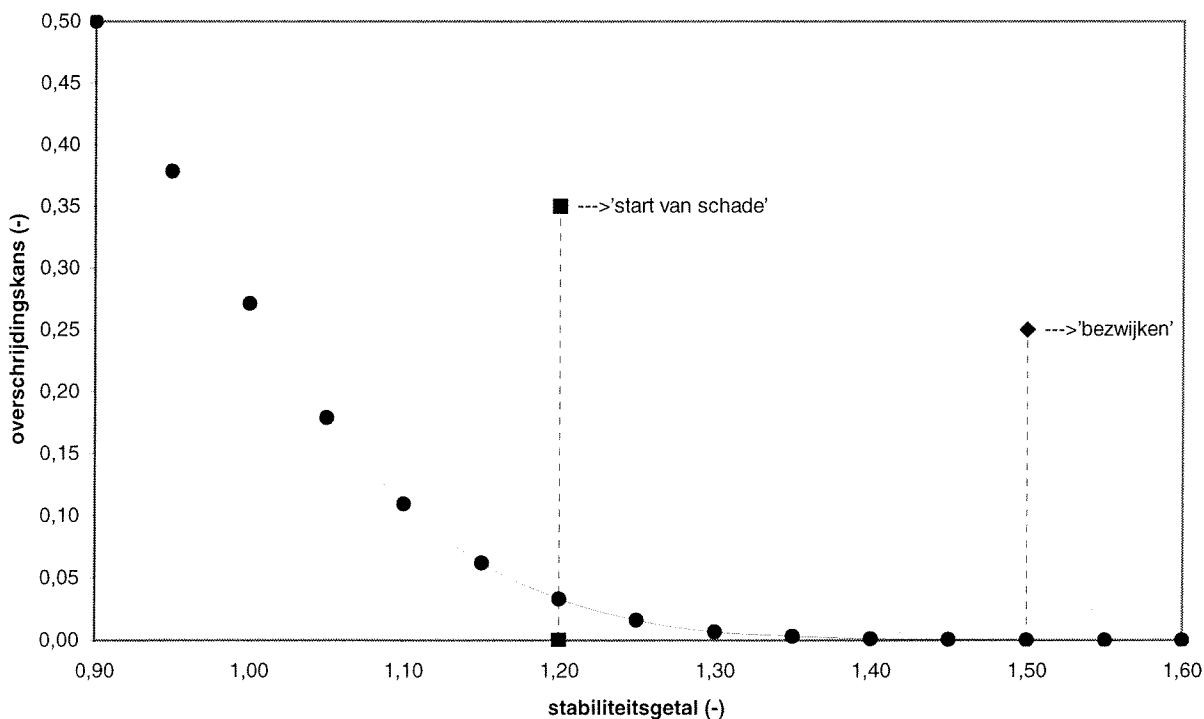
Het gemiddelde van de betrouwbaarheidsfunctie is 0,3. Voor de standaarddeviatie geldt:

Tabel 3.10 Niveua II berekening voor breukstenen

X	σ_x	$\delta Z / \delta X$	$((\delta Z / \delta X) * \sigma_x)^2$
H_s (m)	$8,85 \cdot 10^{-3}$	$-1/(\Delta D_n)$	$182,25 \cdot 10^{-4}$
Δ (-)	$64,6 \cdot 10^{-3}$	$H_s / (2\Delta^2 D_n)$	$7,29 \cdot 10^{-4}$
D_n (m)	$2,03 \cdot 10^{-3}$	$H_s / (2\Delta D_n^2)$	$5,06 \cdot 10^{-4}$
K (-)	0,084	1	$70,56 \cdot 10^{-4}$
			$\sigma_z^2 = 0,0265$

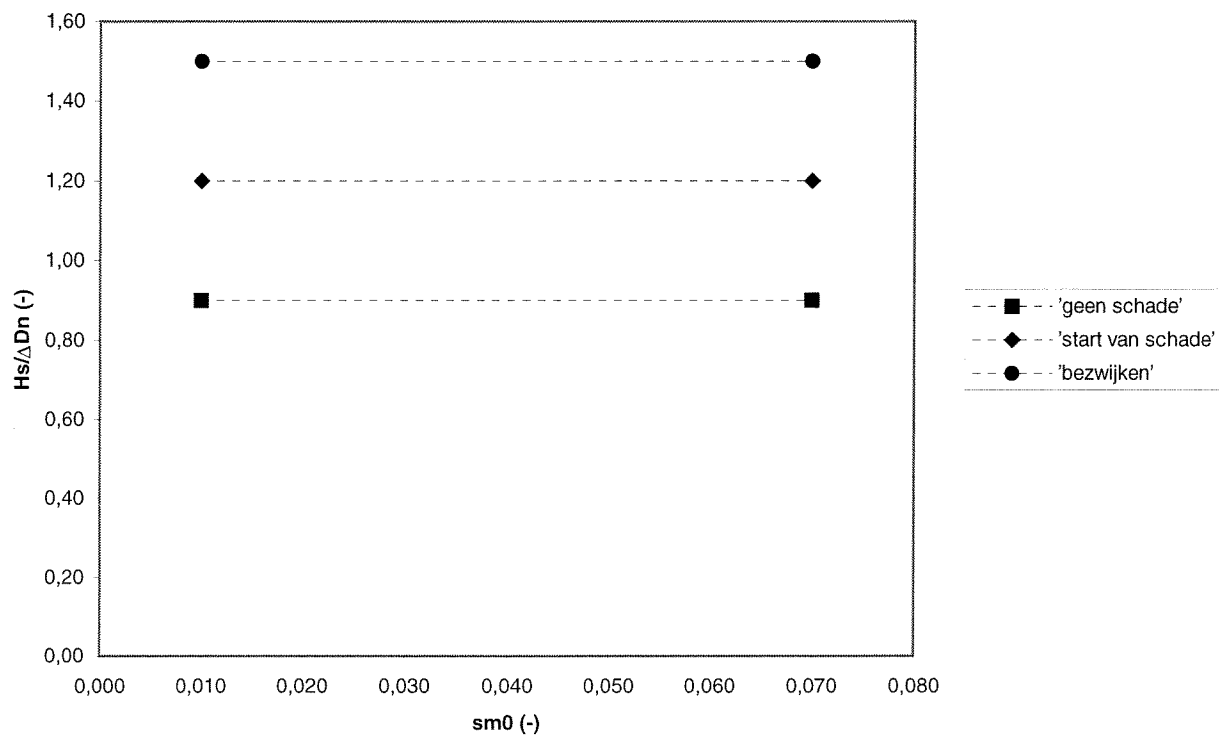
$$\sigma_z = 0,16 \quad \beta = \mu_z / \sigma_z = 1,84 \quad \Phi(-1,84) = 0,033$$

Bij keuze van $H_s / \Delta D_n = 0,9$ als ‘geen schade’ criterium is de kans dat het stabiliteitsgetal groter is dan 1,2 (‘start van schade’) 3,3%. Indien een kans kleiner dan 5% acceptabel wordt geacht, is een veiligheidsfactor van 1,3 voldoende. De veiligheidsfactor op het ‘bezwijk’ criterium is 1,67, als het ‘geen schade’ criterium op $H_s / \Delta D_n = 0,9$ wordt gesteld. De kans dat het ‘bezwijk’ criterium wordt overschreden bij ontwerp op het ‘geen schade’ criterium is praktisch nul. Deze waarden lijken dus acceptabel. De overschrijdingskans is uitgezet in *Figuur 3.11*.



Figuur 3.11 Overschrijdingskans “breukstenen” in een enkele toplaag

De verschillende criteria die van toepassing zijn op breukstenen in een enkele toplaag zijn weergegeven in *Figuur 3.12*.



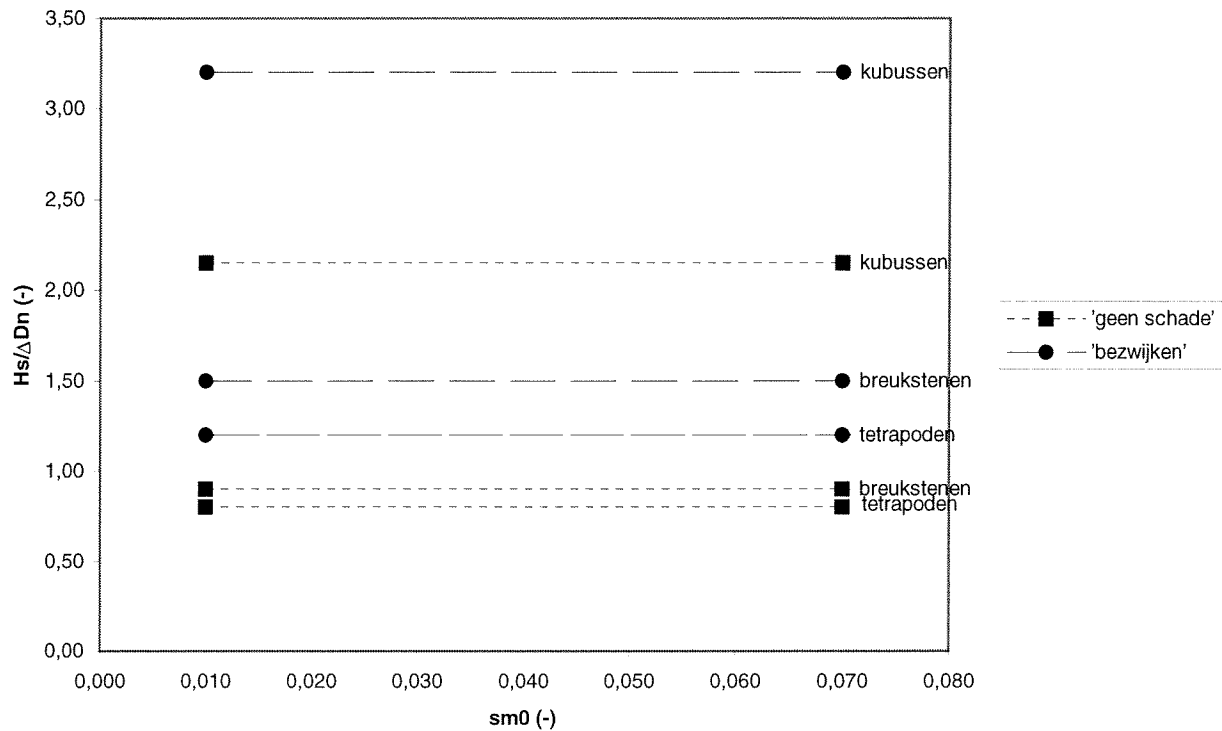
Figuur 3.12 Ontwerpcriteria voor breukstenen in een enkele toplaag

De volgende overschrijdingskansen zijn met behulp van de Niveau II AFDA methode berekend.

Tabel 3.11 Kans op overschrijding van de verschillende criteria ten opzichte van het 'geen schade' criterium

	'bezwijken'	'start van schade'
Kubussen	0,29%	4,4%
Tetrapoden	0,34%	0,3%
Breukstenen	0,01%	3,3%

De kans dat 'start van schade' optreedt is niet groot. Het is echter belangrijk dat indien er toch schade ontstaat deze zo spoedig mogelijk wordt hersteld in verband met het bros bezwijkgedrag.



Figuur 3.13 Vergelijking van de criteria voor kubussen, Tetrapoden en breukstenen in een enkele toplaag

In Figuur 3.13 zijn de ontwerpcriteria voor de verschillende elementen in een enkele toplaag in een grafiek uitgezet. Kubussen in een enkele toplaag blijken het meest stabiel te zijn. Het 'geen schade' criterium voor dit element ligt ongeveer 30% hoger dan het 'bezwijk' criterium voor breukstenen in een enkele toplaag. Een vergelijking tussen een dubbele toplaag met een enkele toplaag wordt in de volgende hoofdstuk gemaakt.

Het 'geen schade' criterium, dat voor de verschillende elementen is bepaald, is te gebruiken voor een deterministisch ontwerp. Dit criterium is op dit moment slechts een indicatie. Voor een volledig probabilistisch ontwerp is het aan te raden de Niveau II berekening over te doen met de juiste verdelingen, uitgaande van het 'start van schade' criterium.

4. Vergelijking met een dubbele toplaag

4.1 Inleiding

Van der Meer [1985, 1986, 1987] heeft, na modelproeven op golfbrekers met een dubbele toplaag, ontwerpformules gemaakt. Deze ontwerpformules worden in dit hoofdstuk gebruikt om een dubbele toplaag met een enkele toplaag te vergelijken. De ontwerpformules voor een dubbele toplaag zijn gebaseerd op modelproeven waarbij na iedere proef herstel van het profiel plaats vond. Tijdens de modelproeven met een enkele toplaag heeft tussentijds herstel van het profiel niet plaatsgevonden. De ontwerpformules voor een dubbele toplaag kunnen wel gebruikt worden om proeven zonder tussentijds herstel te simuleren (*Bijlage I.3, II.3 en Bijlage III.3*).

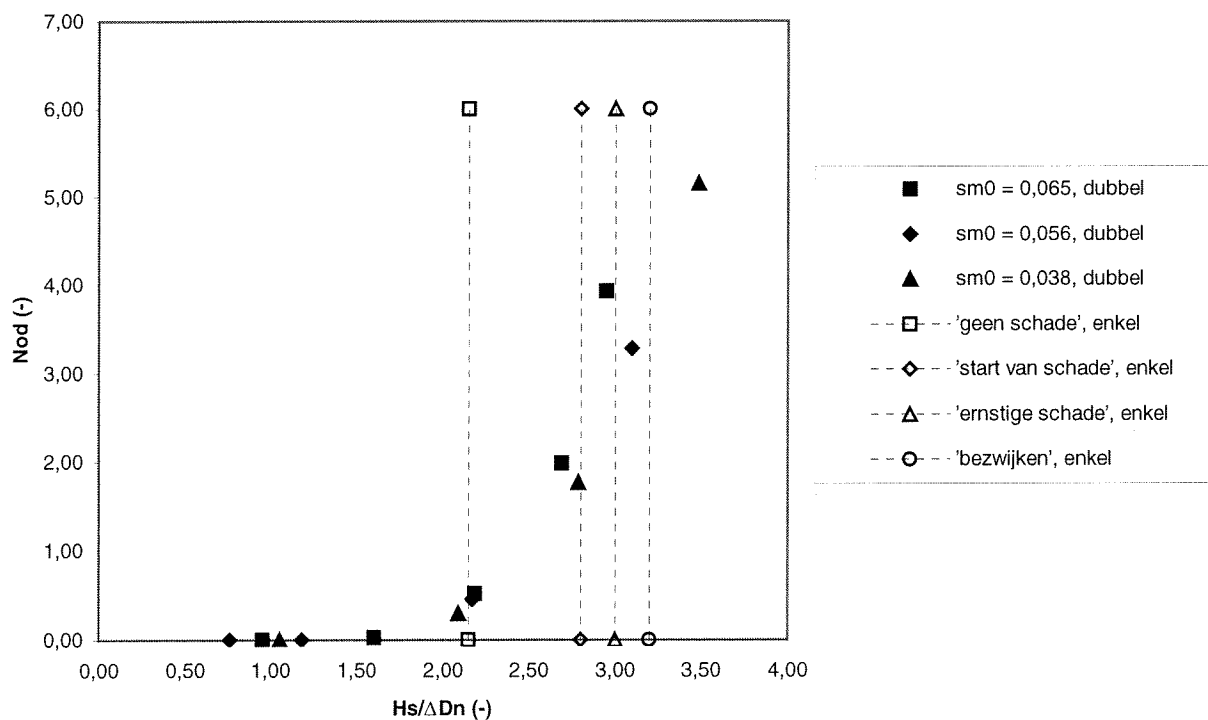
4.2 Kubussen

4.2.1 Prestatie

De volgende ontwerpformule is van toepassing op kubussen in een dubbele toplaag (Van der Meer [1986])

$$\frac{H_s}{\Delta D_n} = \left(6,7 \frac{N_{od}^{0,4}}{N^{0,3}} + 1,0 \right) s_{m0}^{-0,1} \quad \text{vergelijking 4.1}$$

Met behulp van deze formule zijn proeven met een dubbele toplaag ($D_n = 0,051$ m) zonder herstel van profiel gesimuleerd. De resultaten hiervoor, tezamen met de ontwerpcriteria voor een enkele toplaag, zijn te zien in *Figuur 4.1*.



Figuur 4.1 Vergelijking van de stabiliteit tussen een enkele en een dubbele toplaag van kubussen

'Geen schade' (zie *Figuur 4.1*)

Enkele toplaag ('geen schade')	$H_s/\Delta D_n = 2,15$
Dubbele toplaag ($N_{od} = 0$)	$H_s/\Delta D_n = 1,5$

De waarden van het stabiliteitsgetal liggen voor een enkele toplaag ongeveer 43% hoger. Het is misschien beter het 'geen schade' criterium voor een enkele toplaag te vergelijken met $N_{od} = 0,2$ à $0,3$ (start van schade) voor een dubbele toplaag. Een dubbele toplaag heeft namelijk minder last van progressief bezwijken. Indien dit gedaan wordt, blijkt dat de waarden van het stabiliteitsgetal nagenoeg gelijk zijn.

'Bezwijken' (zie *Figuur 4.1*)

Enkele toplaag ('bezwijken')	$H_s/\Delta D_n = 3,2$
Dubbele toplaag ($N_{od} = 2,0$)	$H_s/\Delta D_n = 2,8$

De waarden van het stabiliteitsgetal liggen voor een enkele toplaag ongeveer 14% hoger.

Hierna wordt een vergelijking in materiaalverbruik gemaakt tussen kubussen in een enkele en in een dubbele toplaag, omdat kubussen in een enkele toplaag zeer stabiel blijken te zijn.

4.2.2 Materiaal

Bij 'geen schade' blijkt het stabiliteitsgetal voor een enkele toplaag ongeveer 43% hoger te liggen. Om een goede vergelijking in materiaalverbruik te kunnen maken, moet de nominale diameter in een dubbele toplaag 43% hoger zijn; alleen dan is de significante golfhoogte die op de constructies toelaatbaar is, gelijk. *Van der Meer* [1993] geeft de volgende formule om het aantal elementen per vierkante meter uit te kunnen rekenen.

$$N_a = n k_t (1-n_v) (D_n)^{-2} \quad \text{vergelijking 4.2}$$

- N_a = aantal elementen per vierkante meter
- n = aantal lagen
- k_t = laagcoëfficiënt
- n_v = volumetrische porositeit

Voor het betonverbruik geldt:

$$\text{Betonverbruik} = C = N_a * D_n^3 \quad \text{vergelijking 4.3}$$

Voor kubussen geldt:

Tabel 4.1 Materiaalverbruik kubussen in de toplaag bij 'geen schade'

	n	k_t (-)	n_v (-)	D_n (m)	M (kg)	N_a (m ⁻²)	C (m ³ /m ²)
dubbel	2	1,10	0,37	$1,43 * D_n$	$2,92 * M$	$0,675 * D_n^{-2}$	$1,99 * D_n^3 / D_n^2$
enkel	1	1,10	0,28	D_n	M	$0,792 * D_n^{-2}$	$0,79 * D_n^3 / D_n^2$

De waarden voor k_t en n_v voor een dubbele toplaag komen uit de *SPM* [1984]. De waarde van de laagcoëfficiënt voor een enkele toplaag is aangenomen en de waarde van de volumetrische porositeit is berekend in *Paragraaf 3.2.2*. D_n en M staan voor de nominale diameter en de massa van een toplaag element.

Uit Tabel 4.1 blijkt dat in een enkele toplaag meer elementen per vierkante meter moeten worden geplaatst, maar dat deze elementen ongeveer 3 keer minder zwaar zijn dan in een dubbele toplaag. De betonbesparing per vierkante meter is ongeveer 60%. Omdat de dikte van een dubbele toplaag groter is dan die van een enkele toplaag moet, voor een gelijke kruinhoogte, en -breedte, in een enkele toplaag meer kernmateriaal worden gebruikt. De dikte van een enkele toplaag is ongeveer $(D_n/0,9=) 1,11*D_n$. De dikte van een dubbele toplaag is ongeveer $2*1,43*D_n=2,86*D_n$. Het verschil hiertussen, $1,75*D_n$, bestaat uit extra kernmateriaal.

Tabel 4.2 Vergelijking materiaalverbruik tussen een dubbele en een enkele toplaag van kubussen

	M (kg)	D_n (m)	N_a (m ⁻²)	C (m ³ /m ²)	Extra kernmateriaal (m ³ /m ²)
dubbele toplaag	$2,92*M$	$1,43*D_n$	$0,675*D_n^{-2}$	$1,99*D_n^3/D_n^2$	-
enkele toplaag	M	D_n	$0,792*D_n^{-2}$	$0,79*D_n^3/D_n^2$	$1,75*D_n$

4.2.3 Samenvattend

Bij gelijke waarden van het stabiliteitsgetal voor het 'geen schade' criterium voor kubussen in een enkele en in een dubbele toplaag moeten de elementen 2,9 keer lichter en 1,4 keer kleiner worden uitgevoerd. De kranen moeten echter ongeveer 15% meer elementen per vierkante meter plaatsen. Omdat de kubussen in een enkele toplaag kleiner zijn, wordt ondanks de grotere plaatsingsdichtheid, een aanzienlijke besparing op het betonverbruik (60%) bereikt. Daartegenover staat wel dat iets meer kernmateriaal moet worden gebruikt voor een gelijke kruinhoogte en -breedte.

4.2.4 Plaatsingsdichtheid haalbaar?

Opgemerkt dient te worden dat de plaatsingsdichtheid van kubussen in een enkele toplaag een stuk groter is dan voor een dubbele toplaag. Het is echter nog de vraag of een grote plaatsingsdichtheid, zoals gerealiseerd in het model, in de praktijk haalbaar is. Indien dit niet het geval is, is het aanneembaar dat de elementen veel minder stabiel zijn dan uit de modelproeven is gebleken. Daarom is het wellicht beter de elementen in een enkele toplaag, verder onderzoek afwachtende, net zo zwaar uit te voeren als in een dubbele toplaag het geval zou zijn geweest. Het materiaal verbruik komt er dan als volgt uit te zien:

Tabel 4.3 Materiaalverbruik kubussen in de toplaag bij gelijk gewicht

	n	k_t (-)	n_v (-)	D_n (m)	M (kg)	N_a (m ⁻²)	C (m ³ /m ²)
dubbel	2	1,10	0,37	D_n	M	$1,386 * D_n^{-2}$	$1,386 * D_n^3 / D_n^2$
enkel	1	1,10	0,37	D_n	M	$0,693 * D_n^{-2}$	$0,693 * D_n^3 / D_n^2$

De betonbesparing voor een enkele toplaag blijkt toch nog 50% te zijn. Bij gebruik van deze toplaag is, voor een gelijke kruinhoogte en -breedte, meer kernmateriaal nodig (ongeveer $0,9*D_n$).

4.3 Tetrapoden

4.3.1 Prestatie

De volgende ontwerpformule is van toepassing op Tetrapoden in een dubbele toplaag (Van der Meer [1987a]).

$$\frac{H_s}{\Delta D_n} = \left(3,75 \frac{N_{od}^{0,5}}{N^{0,25}} + 0,85 \right) s_{mo}^{-0,2} \quad \text{vergelijking 4.4}$$

Met behulp van deze formule zijn proeven met een dubbele toplaag ($D_n = 0,05$ m) zonder herstel van profiel gesimuleerd. De resultaten hiervoor, tezamen met de ontwerpcriteria voor een enkele toplaag, zijn te zien in *Figuur 4.2*.

Voor de stabiliteit geldt:

'Geen schade' (zie *Figuur 4.2*)

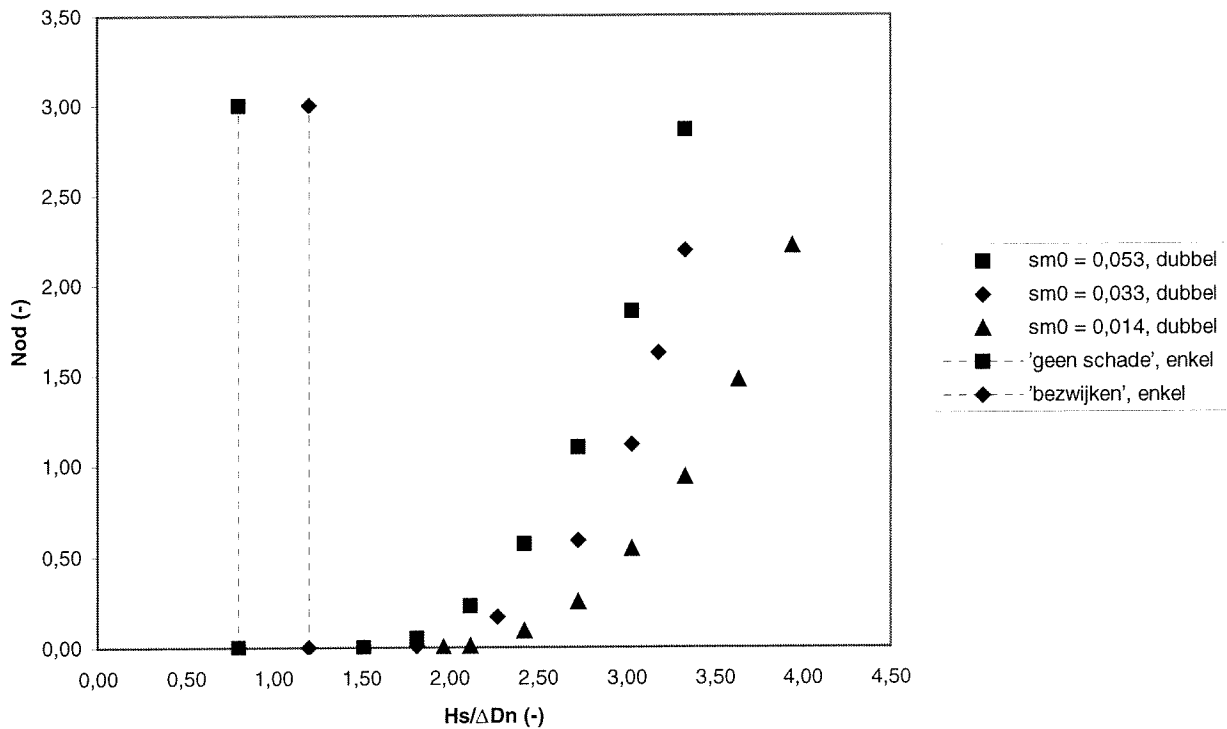
Enkele toplaag (*geen schade*) $H_s/\Delta D_n = 0,8$
 Dubbele toplaag ($N_{od} = 0$) $H_s/\Delta D_n = 1,5$

De waarden van het stabiliteitsgetal liggen voor een enkele toplaag 47% lager.

'Bezwijken' (zie *Figuur 4.2*)

Enkele toplaag (*bezwijken*) $H_s/\Delta D_n = 1,2$
 Dubbele toplaag ($N_{od} = 1,5$) $H_s/\Delta D_n = 3,0$

De waarden van het stabiliteitsgetal liggen voor een enkele toplaag 60% lager.



Figuur 4.2 Vergelijking van de stabiliteit tussen een enkele en een dubbele toplaag van Tetrapoden

4.3.2 Materiaalverbruik

De nominale diameter van de elementen in een enkele toplaag moeten ongeveer 1,88 keer groter zijn dan elementen in een dubbele toplaag, bij een gelijke toelaatbare significante golfhoogte. Hieruit volgt dat de massa van de elementen ongeveer 6,6 keer zwaarder zijn in een enkele toplaag. Met behulp van *vergelijking 4.2 en 4.3* kan *Tabel 4.4* worden gemaakt.

Tabel 4.4 Materiaalverbruik Tetrapoden in de toplaag

	n	k_t (-)	n_v (-)	D_n (m)	M (kg)	N_a (m ⁻²)	C (m ³ /m ²)
dubbel	2	1,04	0,50	D_n	M	$1,04 * D_n^{-2}$	$1,04 * D_n^3 / D_n^2$
enkel	1	1,04	0,62	$1,88 * D_n$	$6,6 * M$	$0,11 * D_n^{-2}$	$0,741 * D_n^3 / D_n^2$

De waarden voor k_t en n_v voor een dubbele toplaag komen uit de *SPM* [1984]. De waarde van de laagcoëfficiënt voor een enkele toplaag is aangenomen en de waarde van de porositeit is berekend in *Paragraaf 3.3.2*. D_n en M staan voor de nominale diameter en de massa van een toplaag element.

Uit *Tabel 4.4* blijkt dat in een enkele toplaag veel minder elementen per vierkante meter kunnen worden geplaatst, maar dat deze elementen ongeveer 6,6 keer zwaar zijn dan in een dubbele toplaag. De betonbesparing per vierkante meter is ongeveer 28%. De dikte van een dubbele toplaag is groter dan die van een enkele toplaag. Voor een gelijke kruinhoogte, bij gelijke kruinbreedte, moet in een dubbele toplaag meer kernmateriaal worden gebruikt. De dikte van een enkele toplaag is ongeveer $(1,88 * D_n / 0,7) = 2,68 * D_n$. De dikte van een dubbele toplaag is ongeveer $2 * D_n$. Het verschil hiertussen $0,68 * D_n$ bestaat uit extra kernmateriaal.

Tabel 4.5 Vergelijking materiaalverbruik tussen een dubbele en een enkele toplaag van Tetrapoden

	M (kg)	D_n (m)	N_a (m ⁻²)	C (m ³ /m ²)	Extra kernmateriaal (m ³ /m ²)
dubbele toplaag	M	D_n	$1,04 * D_n^{-2}$	$1,04 * D_n^3 / D_n^2$	$0,68 * D_n$
enkele toplaag	$6,6 * M$	$1,9 * D_n$	$0,11 * D_n^{-2}$	$0,74 * D_n^3 / D_n^2$	-

4.3.3 Samenvattend

Bij gelijke waarden van het stabiliteitsgetal voor het 'geen schade' criterium voor Tetrapoden in een enkele en in een dubbele toplaag moeten de elementen 6,6 keer zwaarder en 1,88 keer groter worden. De plaatsingsdichtheid is, bij een porositeit van ongeveer 62%, echter 90% kleiner, waardoor de kranen minder handeling hoeven uit te voeren. Naast de betonbesparing van 28% staat dat minder kernmateriaal kan worden gebruikt voor een gelijke kruinhoogte en -breedte.

Het is nog de vraag of grotere en zwaardere Tetrapoden wel aanvaardbaar zijn (er is een vergrote kans op breken van de elementen en zeer zware elementen moeten door speciaal materieel worden getild). Verder ligt de toplaag van een constructie bij gebruik van dergelijke elementen zodanig open dat het zeer twijfelachtig is of wel voldaan kan worden aan bepaalde eisen met betrekking tot bijvoorbeeld de transmissie bij een kleine relatieve kruinhoogte, R_c .

4.4 Breukstenen

4.4.1 Prestatie

De volgende ontwerpformule is van toepassing op breukstenen in een dubbele toplaag (*Van der Meer* [1985])

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 6,2 P^{0,18} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}} \right)^{0,2} \xi^{-0,5} \quad (\text{plunging breakers}) \quad \text{vergelijking 4.5}$$

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 1,0 P^{-0,13} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}} \right)^{0,2} \xi^P \sqrt{\cot \alpha} \quad (\text{surgling breakers}) \quad \text{vergelijking 4.6}$$

Met behulp van deze formules zijn proeven met een dubbele toplaag ($D_n = 0,0406$ m) zonder herstel van profiel gesimuleerd. De resultaten hiervoor, tezamen met de ontwerpcriteria voor een enkele toplaag, zijn te zien in *Figuur 4.3*.

Voor de stabiliteit geldt:

'Geen schade' (zie *Figuur 4.3*)

Enkele toplaag (*geen schade*) $H_s/\Delta D_{n50} = 0,9$

Dubbele toplaag ($S = 2$) $H_s/\Delta D_{n50} = 1,5$

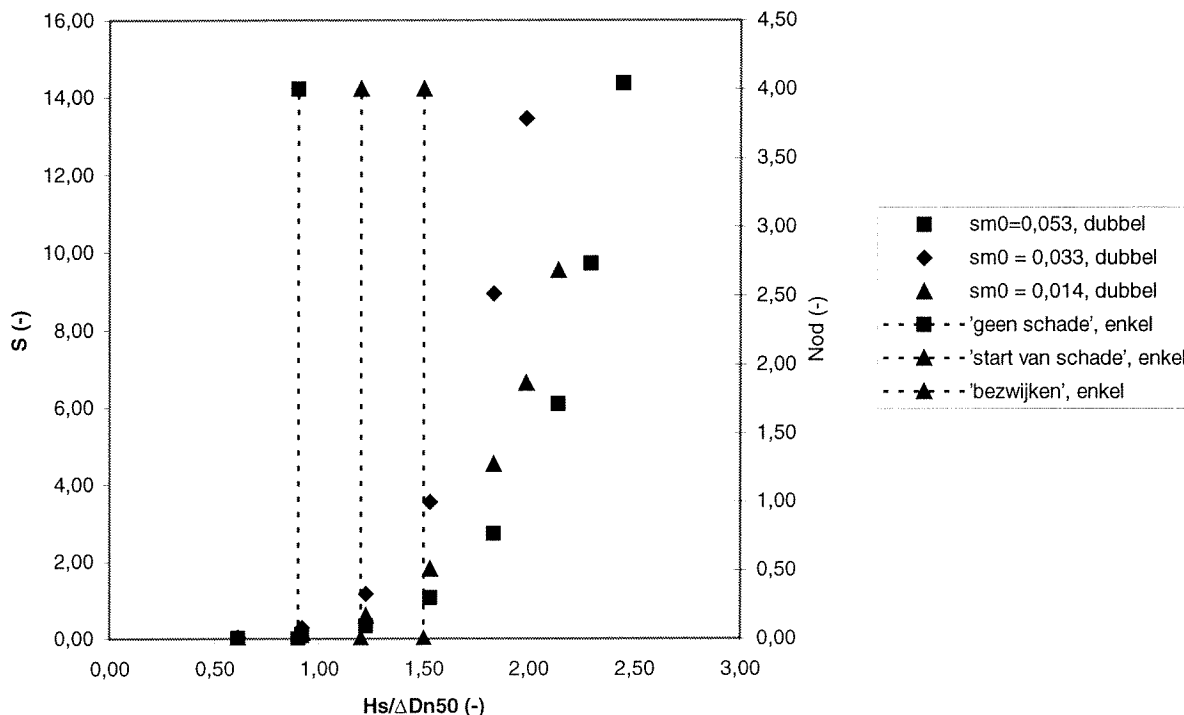
De waarden van het stabiliteitsgetal liggen voor een enkele toplaag minimaal 40% lager.

'Bezwijken' (zie *Figuur 4.3*)

Enkele toplaag (*bezwijken*) $H_s/\Delta D_{n50} = 1,5$

Dubbele toplaag ($S = 8$) $H_s/\Delta D_{n50} = 2,0$

De waarden van het stabiliteitsgetal liggen voor een enkele toplaag minimaal 25% lager.



Figuur 4.3 Vergelijking van de stabiliteit tussen een enkele en een dubbele toplaag van breukstenen

4.4.2 Materiaalverbruik

De nominale diameter van de elementen in een enkele toplaag moeten ongeveer 1,6 keer groter zijn dan elementen in een dubbele toplaag, bij een gelijke toelaatbare significante golfhoogte. Hieruit volgt dat de massa van de elementen ongeveer 4 keer zwaarder zijn in een enkele toplaag. Met behulp van vergelijking 4.2 en 4.3 kan Tabel 4.6 worden gemaakt.

Tabel 4.6 Materiaalverbruik breukstenen in de toplaag

	<i>n</i>	<i>k_t</i> (-)	<i>n_v</i> (-)	<i>D_{n50}</i> (m)	<i>M</i> (kg)	<i>N_a</i> (m ⁻²)	<i>C</i> (m ³ /m ²)
dubbel	2	1,0	0,37	<i>D_{n50}</i>	<i>M</i>	1,26 * <i>D_{n50}</i> ⁻²	1,26 * <i>D_{n50}</i> ³ / <i>D_{n50}</i> ²
enkel	1	1,0	0,33	1,60 * <i>D_{n50}</i>	4,01 * <i>M</i>	0,26 * <i>D_{n50}</i> ⁻²	1,07 * <i>D_{n50}</i> ³ / <i>D_{n50}</i> ²

De waarden voor *k_t* en *n_v* voor een dubbele toplaag komen uit de SPM [1984]. De waarde van de laagcoëfficiënt voor een enkele toplaag is aangenomen en de waarde van de volumetrische porositeit is berekend in Paragraaf 3.4.2. *D_n* en *M* staan voor de nominale diameter en de massa van een toplaagelement.

Uit Tabel 4.6 blijkt dat in een enkele toplaag minder elementen per vierkante meter moeten worden geplaatst, maar dat deze elementen ongeveer 4 keer zo zwaar zijn dan in een dubbele toplaag. De steenbesparing per vierkante meter is ongeveer 15%. De dikte van een dubbele toplaag is groter dan die van een enkele toplaag. Voor een gelijke kruinhoogte, bij gelijke kruinbreedte, moet in een enkele toplaag meer kernmateriaal worden gebruikt. De dikte van een enkele toplaag is ongeveer (1,6 * *D_{n50}* / 0,8) = 2 * *D_{n50}*. De dikte van een dubbele toplaag is ongeveer 2,2 * *D_{n50}*. Het verschil hiertussen 0,2 * *D_{n50}* bestaat uit extra kernmateriaal.

Tabel 4.7 Vergelijking materiaalverbruik tussen een dubbele en een enkele toplaag van breukstenen

	M (kg)	D_{n50} (m)	N_a (m ²)	C (m ³ /m ²)	Extra kernmateriaal (m ³ /m ²)
dubbele toplaag	M	D_{n50}	$1,26 * D_{n50}^{-2}$	$1,26 * D_{n50}^3 / D_{n50}^2$	-
enkele toplaag	$4 * M$	$1,6 * D_{n50}$	$0,26 * D_{n50}^{-2}$	$1,07 * D_{n50}^3 / D_{n50}^2$	$0,2 * D_{n50}$

4.4.3 Samenvattend

Bij gelijke waarden van het stabiliteitsgetal voor het 'geen schade' criterium voor breukstenen moeten de elementen in een enkele toplaag 4 keer zwaarder en 1,6 keer groter worden dan in een dubbele toplaag. De plaatsingsdichtheid is desalniettemin 80% kleiner, waardoor de kranen minder handeling hoeven uit te voeren. Tegenover de betonbesparing van 15% staat dat meer kernmateriaal moet worden gebruikt voor een gelijke kruinhoogte en -breedte.

Tijdens de plaatsing van breukstenen op het model bleek dat de elementen ten gevolge van het eigen gewicht de neiging hadden de helling af te rollen. Zwaardere breukstenen, zoals gesuggereerd in Tabel 4.6 en 4.7, zullen deze neiging alleen maar versterken. Doordat zware breukstenen schaars en duur zijn, is een constructie met breukstenen in een enkele toplaag bij een helling van 1:1,5, eigenlijk geen haalbare kaart.

4.4.4 Eerder onderzoek

In Noorwegen zijn voor de jaren 60 golfbrekers gebouwd met een enkele toplaag van breukstenen op een helling van 1:1,5. Vele van deze golfbrekers staan op locaties met significante golfhoogten tot ongeveer 6,5 meter. Deze constructies blijken qua constructie en onderhoud nu nog economisch rendabel te zijn.

Deze golfbrekers zijn gebouwd in een tijd waarin nog weinig bekend was over golfklimaten en dergelijke. Ervaring en de zogenaamde *trial and error* methode zijn in die tijd gebruikt bij het construeren van golfbrekers. De stenen van de toplaag werden vanaf de kruin, met behulp van treinwagons en trucks, afgerold. Dit lukte het best indien een helling van 1:1,25 of 1:1,5 werd toegepast. Tijdens de constructie werd getracht de elementen zo regelmatig mogelijk te plaatsten, met de langste zijde loodrecht op de filterlaag en de kleinste oppervlakte in de richting van de golven. Het resultaat was echter vaak een random plaatsing.

Tegenwoordig zijn in enkele gevallen backhoes gebruikt om de elementen ordelijk in de toplaag te plaatsen. Deze methode kan alleen gebruikt worden vanaf ongeveer 2m onder *LWL* (*Low Water Level*). Onder dit niveau worden de elementen vanaf de kruin gedumpt. Deze laatst gebouwde constructies hebben recentelijk zware schade geleden.

T.Hald et al [1998] hebben naar aanleiding van de Noorse golfbrekers onderzoek gedaan naar golfbrekers met een enkele toplaag van breukstenen op een helling van 1:1,5. Zij zijn uitgegaan van zowel een random als een regelmatige plaatsing.

Bij een ordelijke plaatsing (regelmatig) blijkt start van schade te ontstaan bij een stabiliteitsgetal van ongeveer 2. Verdere schade ontwikkelt zich langzaam (geen progressief bezwijken). Het stabiliteitsgetal blijkt 2,3 te zijn bij een schade niveau van 5%, hetgeen overeenkomt met een K_D -waarde van 8,1 in de formule van Hudson. Voor een dubbele toplaag wordt heden uitgegaan van een K_D -waarde variërend van 2,4 voor gladde stenen en 4 voor niet gladde stenen.

Bij een random plaatsing blijkt start van schade op te treden bij $H_s/\Delta D_n = 1$. Er blijkt sprake te zijn van een progressief bezwijk gedrag. Het stabiliteitsgetal bij een schade niveau van 5% blijkt ongeveer 1,1 te zijn, hetgeen overeenkomt met een K_D -waarde van ongeveer 0,9.

De resultaten van *T.Hald et al* [1998] zijn vergelijkbaar met de resultaten verkregen met dit modelonderzoek. De plaatsing van de stenen op de toplaag tijdens dit onderzoek, kwam overeen met een redelijk random plaatsing. De elementen zijn met de hand wel iets gerangschikt, waardoor er geen sprake meer was van een compleet random plaatsing. Derhalve is het stabiliteitsgetal bij start van schade in onderzoek hoger dan de waarde gevonden door *T.Hald et al* [1998] voor een random plaatsing. Het progressief bezwijkgedrag bij een random plaatsing, gevonden door *T.Hald et al* [1998] wordt in dit onderzoek bevestigd.

4.5 Accropoden

Accropoden worden standaard in een enkele toplaag aangebracht. Deze elementen ontlenen de stabiliteit aan met name de grote haakweerstand. Alhoewel de elementen erg stabiel zijn, treedt 'bezwijken' vrij abrupt op (*Van der Meer* [1987b]). Het is duidelijk dat een vergelijking van breukstenen en Tetrapoden met Accropoden zinloos is. Het is echter wel zinvol om de Accropoden (*Bijlage VII*) te vergelijken met kubussen in een enkele toplaag.

4.5.1 Prestatie

'Geen schade' (zie *Figuur 4.4*)

Kubussen	$H_s/\Delta D_n = 2,15$
Accropoden	$H_s/\Delta D_n = 2,5$

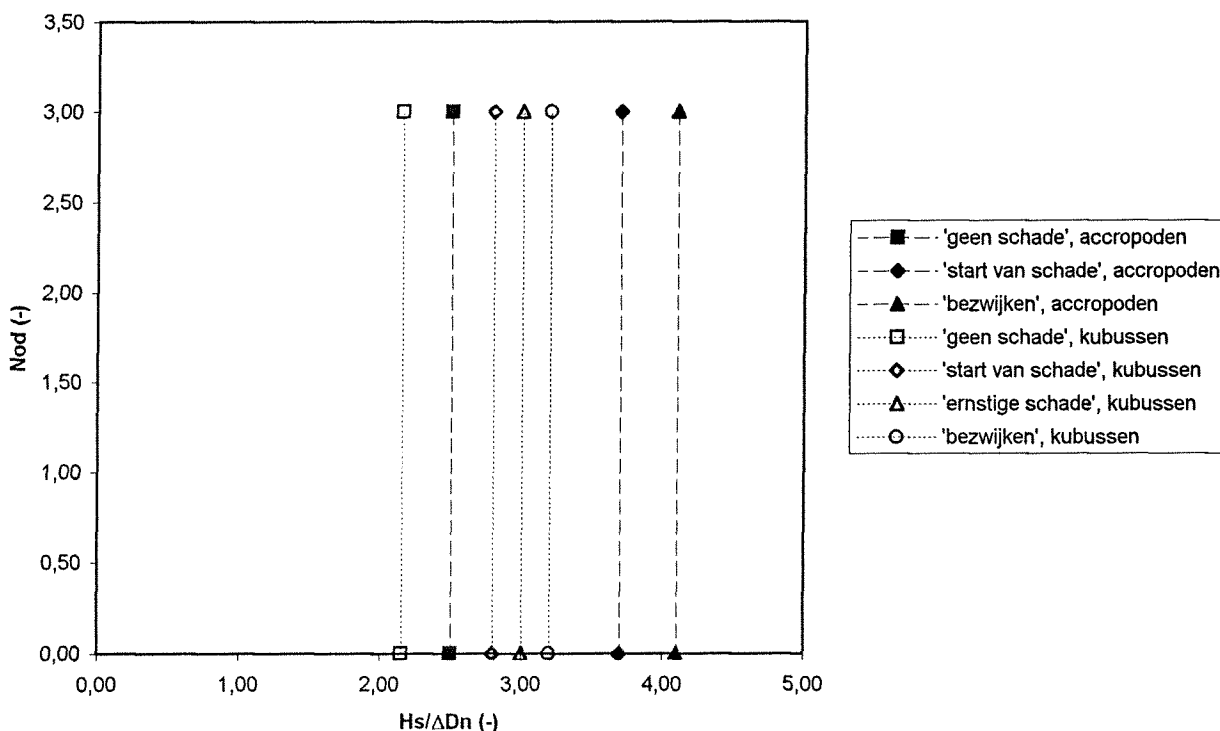
De waarde van het stabiliteitsgetal is voor kubussen 16% lager.

'Bezwijken' (zie *Figuur 4.4*)

Kubussen	$H_s/\Delta D_n = 3,2$
Accropoden	$H_s/\Delta D_n = 4,1$

De waarde van het stabiliteitsgetal is voor kubussen 28% lager.

In *Figuur 4.4* zijn de verschillende criteria in een grafiek uitgezet.



Figuur 4.4 Vergelijking van de stabiliteit tussen Kubussen en Accropoden in een enkele toplaag

4.5.2 Materiaal

De nominale diameter van kubussen in een enkele toplaag moet ongeveer 1,16 keer groter zijn dan die van Accropoden in een enkele toplaag, bij een gelijke toelaatbare significante golfhoogte. Hieruit volgt dat de massa van de kubussen ongeveer 1,57 keer zwaarder is dan die van Accropoden. Met behulp van *vergelijking 4.2 en 4.3* kan *Tabel 4.8* worden gemaakt.

Tabel 4.8 Materiaalverbruik kubussen en Accropoden in een enkele toplaag

	n	$k_t (-)$	$n_v (-)$	$D_n (m)$	$M (kg)$	$N_a (m^{-2})$	$C (m^3/m^2)$
Kubussen	1	1,1	0,28	$1,16 * D_n$	$1,57 * M$	$0,59 * D_n^{-2}$	$0,92 * D_n^3 / D_n^2$
Accropoden	1	1,0	0,50	D_n	M	$0,50 * D_n^{-2}$	$0,50 * D_n^3 / D_n^2$

De waarden voor k_t voor een Accropoden is aangenomen (zelfde als dolossen) en de waarde voor n_v is berekend (*Bijlage VII*). De waarde van de laagcoëfficiënt voor kubussen in een enkele toplaag is aangenomen en de waarde van de volumetrische porositeit is berekend in *Paragraaf 3.2.2*. D_n en M staan voor de nominale diameter en de massa van een toplaagelement.

Uit *Tabel 4.8* blijkt dat meer kubussen per vierkante meter moeten worden geplaatst en dat deze elementen ongeveer 1,16 keer zwaar zijn dan de Accropoden. Naast meer kraanhandelingen staat een groter betonverbruik (45%). De dikte van een enkele toplaag met Accropoden is groter dan die van een enkele toplaag van kubussen. Voor een gelijke kruinhoogte, bij gelijke kruinbreedte, is voor een constructie met kubussen in de toplaag meer kernmateriaal nodig. De dikte van een enkele toplaag van kubussen is ongeveer $(1,16 * D_n / 0,9 =) 1,29 * D_n$. De dikte van een toplaag van Accropoden is ongeveer $1,34 * D_n$. Het verschil hiertussen $0,05 * D_n$ bestaat uit extra kernmateriaal.

Tabel 4.9 Vergelijking materiaalverbruik tussen een dubbele en een enkele toplaag van breukstenen

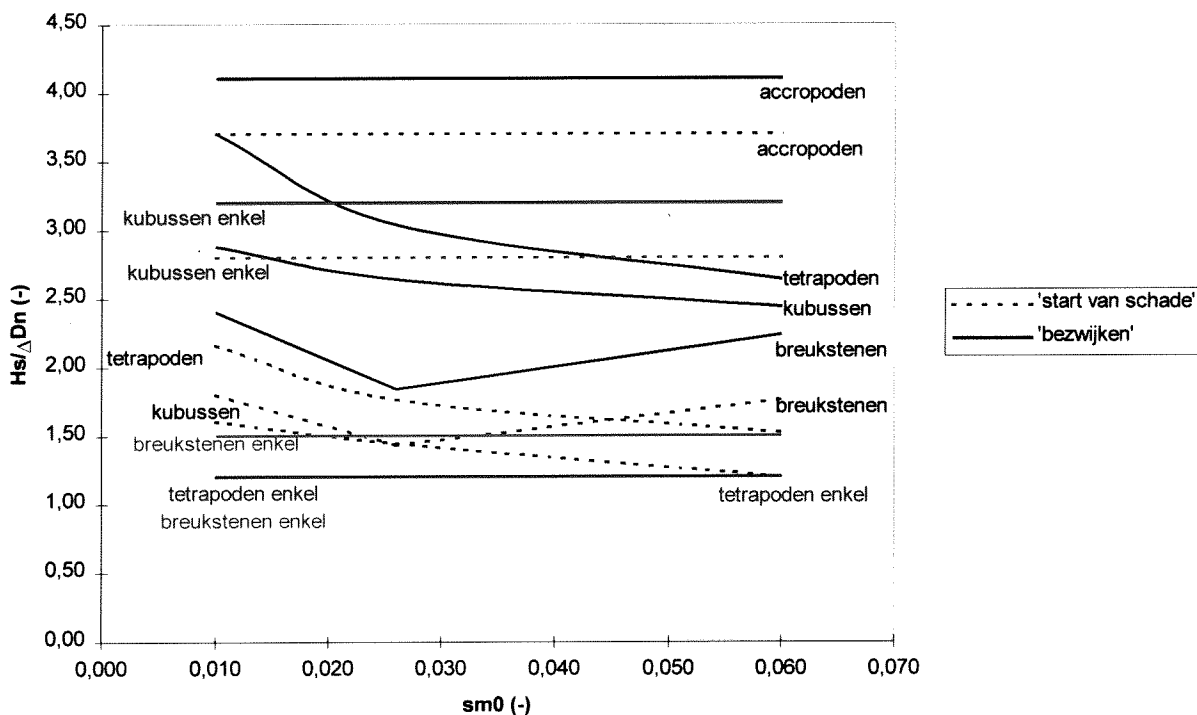
	$M (kg)$	$D_n (m)$	$N_a (m^{-2})$	$C (m^3/m^2)$	Extra kernmateriaal (m^3/m^2)
Kubussen	$1,57 * M$	$1,16 * D_n$	$0,59 * D_n^{-2}$	$0,92 * D_n^3 / D_n^2$	$0,05 * D_n$
Accropoden	M	D_n	$0,50 * D_n^{-2}$	$0,50 * D_n^3 / D_n^2$	-

4.5.3 Samenvattend

Uit *Tabel 4.9* blijkt dat kubussen in een enkele toplaag, wat gebruik van materiaal betreft, niet voordeliger zijn dan Accropoden. De extra kosten voor de speciale plaatsing en van de bekisting van deze elementen kunnen de balans echter doen omslaan.

4.6 Onderlinge vergelijking

De resultaten van de proeven op een enkele toplaag zijn vergeleken met CUR 161 in *Figuur 4.5*. In CUR 161 zijn de resultaten van Van der Meer [1985, 1986 en 1987] in een grafiek uitgezet. De resultaten van proeven op een enkele toplaag zijn ook hierin getekend.



Figuur 4.5 Vergelijking van de resultaten van modelproeven op een enkele toplaag met CUR 161

Tenslotte kan ook een onderlinge materiaalvergelijking tussen de elementen in een enkele toplaag worden gemaakt. De vergelijking is gebaseerd op de stabiliteitsgetallen bij ‘geen schade’.

Tabel 4.10 Onderlinge vergelijking van het materiaalverbruik

	k_t (-)	n_v (-)	$H_s/\Delta D_n$ (-)	D_n (m)	M (kg)	N_a (m ⁻²)	C (m ³ /m ²)
Kubussen	1,1	0,37	2,15	D_n	M	$0,693 \cdot D_n^{-2}$	$0,693 \cdot D_n^3 / D_n^2$
Tetrapoden	1,04	0,62	0,8	$2,69 \cdot D_n$	$19,4 \cdot M$	$0,055 \cdot D_n^{-2}$	$1,062 \cdot D_n^3 / D_n^2$
breukstenen	1,0	0,33	0,9	$2,39 \cdot D_n$	$13,6 \cdot M$	$0,117 \cdot D_n^{-2}$	$1,60 \cdot D_n^3 / D_n^2$

Kubussen blijken qua materiaalverbruik goedkoper dan de andere elementen.

5. Conclusies en aanbevelingen

5.1 Kubussen

5.1.1 Conclusies

De beproefde constructie met kubussen in een enkele toplaag blijkt erg stabiel te zijn. Schade treedt op bij $H_s/\Delta D_n > 2,8$. Deze waarde is bijna 2 keer groter dan die voor een dubbele toplaag. De constructie met een enkele toplaag bezwijkt vrij kort nadat schade is opgetreden; $H_s/\Delta D_n > 3,2$. Hieruit blijkt dat er sprake is van een zogenaamd bros bezwijkgedrag. Het wordt afgeraden het 'start van schade' criterium te gebruiken als ontwerpwaarde gezien het bezwijkgedrag; een geringe vergroting van de golfhoogte kan immers al snel tot bezwijken van de constructie leiden. Het zogenaamde 'geen schade' criterium, het 'start van schade' criterium met een veiligheid, is een veiliger ontwerpcriterium. Een veiligheidscoëfficiënt van ongeveer 1,3 op het 'start van schade' criterium blijkt veilige resultaten te geven. De kans dat het 'bezwijk' criterium wordt bereikt bij ontwerp op 'geen schade' blijkt minder dan 1% te zijn. Na de modelproeven zijn de volgende ontwerpcriteria voor kubussen in een enkele toplaag vastgesteld:

'geen schade'	$H_s/\Delta D_n = 2,15$
'start van schade'	$H_s/\Delta D_n = 2,8$
'ernstige schade'	$H_s/\Delta D_n = 3,0$
'bezwijken'	$H_s/\Delta D_n = 3,2$

Bij gelijke waarden van het stabiliteitsgetal voor het 'geen schade' criterium voor kubussen in een enkele en in een dubbele toplaag kunnen de elementen in een enkele toplaag wellicht bijna 3 keer lichter en 1,43 keer kleiner worden uitgevoerd. Doordat de elementen in een enkele toplaag vrij dicht tegen elkaar aan worden geplaatst (porositeit van 28%), is het aantal kraanhandelingen per vierkante meter groter (15%). Omdat de kubussen in een enkele toplaag kleiner zijn, wordt ondanks de grotere plaatsingsdichtheid, een aanzienlijke besparing op het betonverbruik (60%) bereikt. Daartegenover staat wel dat meer kernmateriaal moet worden gebruikt voor een gelijke kruinhoogte en -breedte.

Kubussen in een enkele toplaag blijken, wat gebruik van materiaal betreft, niet voordeliger te zijn dan Accropoden. De extra kosten voor de speciale plaatsing en van de bekisting van deze elementen kunnen de balans echter doen omslaan ten gunste van kubussen.

Aan de hand van de resultaten van de modelproeven en de analyse daarvan blijkt dat kubussen wellicht beter in een enkele dan in een dubbele toplaag kunnen worden toegepast. De extra kraanhandelingen per vierkante meter wegen waarschijnlijk niet op tegen de lichtere elementen en de grote betonbesparing.

Kubussen in enkele toplaag zijn beproefd met een grote plaatsingsdichtheid (porositeit van 28%). Het is nog de vraag of een dergelijke plaatsingsdichtheid in de praktijk wel te realiseren is. Indien dit niet mogelijk is, is het nog de vraag of een zelfde stabiliteit, zoals gevonden tijdens de modelproeven, in de praktijk haalbaar is. Verder onderzoek naar de mogelijkheid van grote plaatsingsdichtheden afwachtende, is het op dit moment beter om kubussen in een enkele toplaag net zo zwaar uit te voeren als bij gebruik in een dubbele toplaag. De betonbesparing blijkt bij een porositeit van 37% (minder elementen per vierkante meter) toch nog ongeveer 50% te zijn.

5.1.2 Aanbeveling

Het aantal elementen per vierkante meter heeft waarschijnlijk invloed op de stabiliteit. Onderzoek naar de invloed van het aantal elementen per vierkante meter is dus nuttig.

5.2 Tetrapoden

5.2.1 Conclusie

Een constructie met Tetrapoden in een enkele toplaag, geplaatst zoals bij dit onderzoek, blijkt niet zo stabiel te zijn. Bezwijken treedt al op bij $H_s/\Delta D_n > 1,2$; deze waarde is ongeveer 2,5 kleiner dan voor een dubbele toplaag. De criteria voor 'start van schade' en 'bezwijken' liggen zo dicht bij elkaar dat na de modelproeven is besloten de criteria aan elkaar gelijk te stellen. Door het bros bezwijkgedrag kan het 'start van schade' criterium beter niet als ontwerpwaarde worden gebruikt. Een veiligheidsfactor van 1,5 op het 'bezwijk' criterium blijkt voldoende veilig te zijn. Derhalve kan het 'geen schade' criterium op 0,8 worden gesteld. De kans dat het 'bezwijk' criterium wordt bereikt bij ontwerp op 'geen schade' blijkt minder dan 1% te zijn. Na de modelproeven zijn de volgende ontwerpcriteria vastgesteld:

'geen schade'	$H_s/\Delta D_n = 0,8$
'start van schade'	$H_s/\Delta D_n = 1,2$
'bezwijken'	$H_s/\Delta D_n = 1,2$

Bij gelijke waarden van het stabiliteitsgetal voor het 'geen schade' criterium voor Tetrapoden in een enkele en in een dubbele toplaag moeten de elementen in een enkele toplaag 6,6 keer zwaarder en 1,88 keer groter worden. De plaatsingsdichtheid is, bij een porositeit van 62%, 90% kleiner, waardoor de kranen minder maar wel zwaardere handeling moeten uitvoeren. Naast de betonbesparing van 28% staat dat minder kernmateriaal kan worden gebruikt voor een gelijke kruinhoogte en -breedte. De plaatsing van Tetrapoden in een enkele toplaag, zoals in dit onderzoek toegepast, is simpeler dan in een dubbele toplaag doordat de haakweerstand, bij deze plaatsingsmethode, bijna geen rol speelt in de stabiliteit.

Tetrapoden in een enkele toplaag worden afgeraden omdat deze elementen veel zwaarder dan in een dubbele toplaag moeten worden uitgevoerd. Het is nog de vraag of grote en zware elementen wel aanvaardbaar zijn. De zeer open plaatsing heeft waarschijnlijk grote invloed op de kruinhoogte als er ook hoge eisen aan bijvoorbeeld de transmissie worden gesteld. De elementen in een enkele toplaag zijn erg instabiel vergeleken met een dubbele toplaag doordat de haakweerstand in een te grote mate verloren gaat

5.2.2 Aanbeveling

Onderzoek naar een andere plaatsingsmethode van Tetrapoden in een enkele toplaag wordt aanbevolen. De toegepaste plaatsing was te ruim wat leidde tot te weinig haakweerstand. Een enkele toplaag van Tetrapoden met meer haakweerstand zal zonder twijfel stabielere zijn. De elementen kunnen in dat geval lichter worden uitgevoerd dan de onderzochte enkele toplaag. Een vergelijking met een dubbele toplaag zou dan misschien toch nog kunnen leiden tot de aanbeveling om Tetrapoden in een enkele toplaag in plaats van een dubbele toplaag aan te brengen.

5.3 Breukstenen

5.3.1 Conclusie

Bij gebruik van breukstenen in een enkele toplaag moet men rekening houden met een bros bezwijkgedrag. Schade blijkt, bij toepassing op een helling van 1:1,5, op te treden bij $H_s/\Delta D_{n50} > 1,2$ terwijl bezwijken optreedt bij $H_s/\Delta D_{n50} > 1,5$ (33% lager dan voor een dubbele toplaag). Het wordt afgeraden het zogenaamde 'start van schade' criterium te gebruiken als ontwerpwaarde als breukstenen in een enkele toplaag worden overwogen. Een veiligheidsfactor van 1,3 op het 'start van schade' criterium blijkt voldoende veilig te zijn. De veiligheidsfactor op het 'bezwijk' criterium is dan bijna 1,7. De kans dat het 'bezwijk' criterium wordt overschreden bij ontwerp op 'geen schade' blijkt dan 0,01% te zijn. Na de modelproeven op breukstenen in een enkele toplaag zijn de volgende ontwerpcriteria vastgesteld:

'geen schade'	$H_s/\Delta D_{n50} = 0,9$
'start van schade'	$H_s/\Delta D_{n50} = 1,2$
'bezwijken'	$H_s/\Delta D_{n50} = 1,5$

Bij gelijke waarden van het stabiliteitsgetal voor het 'geen schade' criterium voor breukstenen in een enkele en in een dubbele toplaag moeten de elementen in een enkele toplaag 4 keer zwaarder en 1,6 keer groter zijn. De plaatsingsdichtheid is, bij een porositeit van ongeveer 33%, 80% kleiner dan bij gebruik in een dubbele toplaag, waardoor de kranen minder, maar wel zwaardere handelingen, hoeven uit te voeren. Tegenover de steenbesparing van 15% staat dat meer kernmateriaal moet worden gebruikt voor een gelijke kruinhoogte en -breedte. Doordat zware breukstenen schaars en duur zijn, is een constructie met breukstenen in een enkele toplaag bij een helling van 1:1,5, met de gebruikte methode van random plaatsing, eigenlijk geen goed alternatief voor een dubbele toplaag.

5.3.2 Aanbeveling

Onderzoek naar breukstenen in een enkele toplaag op een helling van 1:2 of flauwer, eventueel in combinatie met een groter gewicht, kan zeer interessant zijn omdat de materiaalbesparingen fors kunnen zijn.

5.4 Algemeen

Eventueel ontstane schade op een constructie met een enkele toplaag moet zo snel mogelijk worden hersteld omdat er sprake is van een zogenaamd bros bezwijkgedrag. Het niet tijdig herstellen van de constructie kan meer schade en zelfs bezwijken tot gevolg hebben. De rest sterkte na begin van schade is voor alle element typen zeer beperkt.

Verder kan men zich afvragen of andere aspecten van invloed op de stabiliteit zijn. Proeven met bijvoorbeeld een ander voorland dan 1:30, een andere opbouw, een hogere kruin, andere filterlagen, andere plaatsingsmethoden en andere plaatsingsdichtheden etcetera, kunnen hierover meer duidelijkheid bieden.

Bij toepassing van een grote relatieve kruinhoogte, R_c/H_s , ontstaat meer schade dan bij een kleine relatieve kruinhoogte. Bij waarden van R_c/D_n kleiner dan 2 zijn constructies met Tetrapoden in een dubbele toplaag op het voortalud stabielere dan bij grotere waarden (groter dan 2) (*De Jong* [1996]). Tijdens de in dit onderzoek uitgevoerde modelproeven is een waarde van 4 gebruikt.

6. Referenties

- [1] **CIAD project group**, 1985
Computer Aided Evaluation of the Reliability of Breakwater Design, CIAD Association, Zoetermeer, the Netherlands
- [2] **Coastal Engineering Research Center**, 1984
Shore Protection Manual, U.S. Army Corps of Engineers, USA
- [3] **CUR, Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving**, 1997
Kansen in de civiele techniek, deel 1; Probabilistisch ontwerpen in theorie, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Nederland
- [4] **CUR/CIRIA**, 1991,
Centre for Civil Engineering and Information Association/ Centre for Civil Engineering Research and Codes. Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering, Special Publication '83
- [5] **De Jong, R.J.**, 1996
Wave transmission at low-crested structures. Stability of Tetrapods at front, crest and rear of a low crested Breakwater, Master of Science Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands
- [6] **De Rouck**, 1991
Stabiliteit van stortstenen golfbrekers, Katholieke Universiteit Leuven, België
- [7] **Dunster, J.A., Wilkinson A.R. and Allsop, N.W.H.**, 1988
Single layer armour units. Design of breakwaters, Proceedings of the conference *Breakwater '88*, p 177-188, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford, London
- [8] **Hald, T., Tørum, A., Holm-Karlsen, T.**, 1998,
Rock Armoured Single Layer Rubble Mound Breakwaters in Norway, Seminar i Dansk Vandbygningsteknisk Selskab, Denmark
- [9] **Hettrarachchi, S.S.L. and Holmes, P.**, 1988
Performance of single layer hollow block armour units. Proceedings of the conference *Breakwater '88*, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford, London
- [10] **Jensen, O. Juul**, 1984
A Monograph on Rubble Mound Breakwaters, Danish Hydraulic Institute, Denmark
- [11] **Massie, W.W., P.E.**, 1986
Coastal Engineering, Volume III Breakwater Design. Lecture notes on the course F5. Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, The Netherlands
- [12] **Melby, J.A. and Turk, G.F.**, 1988
Core-loc™ development as related to historical corps concrete armour unit performance. Advances in Coastal Structures and Breakwaters, p. 253-267, Proceedings of the conference 1995, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford London
- [13] **Schiereck, G.J.**, 1995
Introduction to bed, bank and shore protection. Lecture notes on the course F4. Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology, The Netherlands

-
- [14] **Van der Meer J.W.**, 1985
Stability of rubble mound revetments and breakwaters under random wave attack. Development in breakwaters, Proceedings of the conference '85, p. 71-80, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford London.
- [15] **Van der Meer J.W.**, 1988a
Stability of cubes, tetrapods and Accropoden. Design of breakwaters, Proceedings of the conference *Breakwater '88*, p. 71-80, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford, London
- [16] **Van der Meer, J.W.**, 1986
Stability of Rubble Mound Breakwaters. Stability formula for breakwaters armoured with cubes. Report on basic research, Delft Hydraulics-S467-IV, The Netherlands
- [17] **Van der Meer, J.W.**, 1987a
Stability of Rubble Mound Breakwaters. Stability formula for breakwaters armoured with tetrapods. Report on basic research, Delft Hydraulics-H462-II, The Netherlands
- [18] **Van der Meer, J.W.**, 1987b
Stability of Rubble Mound Breakwaters. Stability formula for breakwaters armoured with ACCROPODE®. Report on basic research, Delft Hydraulics-H546, The Netherlands
- [19] **Van der Meer, J.W.**, 1988b
Rock Slopes and Gravel Beaches under Wave Attack. Doctoral thesis (draft), H475, Delft Hydraulics, The Netherlands
- [20] **Van der Meer, J.W.**, 1993
Conceptual design of rubble mound breakwaters, publication no. 483. Delft Hydraulics, The Netherlands
- [21] **Van der Meer, J.W., Pilarczyk, K.W.**, 1987
Stability of breakwater armour layers Deterministic and probabilistic design, Delft Hydraulics Communication No. 378, Delft Hydraulics laboratory, The Netherlands

Symbolen

α	helling
ξ_m	<i>surf similarity</i> parameter berekend met T_m
ξ_p	<i>surf similarity</i> parameter berekend met T_p
ρ_a	soortelijk gewicht van de elementen
ρ_w	Soortelijk gewicht van water
B	breedte
C	materiaalverbruik
d	hoogte van de teen
D	diameter
D_n	nominale diameter $(M/\rho_a)^{1/3}$
D_{n50}	nominale diameter $(M_{50}/\rho_a)^{1/3}$
D_{15}	15% waarde van de zeefkromme
D_{50}	50% waarde van de zeefkromme
D_{85}	85% waarde van de zeefkromme
D_{85}/D_{15}	wijde
Δ	relatieve dichtheid
g	zwaartekrachtsversnelling
H	golfhoogte
H_{s0}	significante golfhoogte op diep water
H_s	significante golfhoogte bij de constructie
h_t	diepte van de teen onder water
h_0	diepwaterhoogte
k_t	laagdikte coëfficiënt
L_0	golflengte in diep water
L_{m0}	golflengte in diep water berekend met T_{m0}
LWL	Low water Level
M	massa
M_{50}	massa van een element gegeven door de 50% waarde op de overschrijdingskromme
n	aantal lagen
N	aantal golven
N_a	aantal elementen per vierkante meter
N_o	aantal verplaatste elementen
N_{od}	aantal elementen die tot buiten een bepaald gebied verplaatst zijn
N_s	stabiliteitsgetal = $H_s/\Delta D_n$
n_v	volumetrische porositeit
P	denkbeeldige doorlatendheidsfactor
PM	Pierson Moskowitz
R_c	hoogte van de kruin boven SWL
R_c/D_n	relatieve kruinhoogte
R_c/H_s	relatieve kruinhoogte
S	schadegetal bepaald met behulp van profielmetingen
s_{m0}	golfsteilheid berekend met T_{m0}
s_m	golfsteilheid berekend met T_m
s_{p0}	golfsteilheid berekend met T_p
$spec.$	spectrum
SWL	<i>Still Water Level</i>
t	dikte van de toplaag
T_m	gemiddelde golfperiode bij de constructie
T_{m0}	gemiddelde golfperiode op diep water
T_{m0}	gemiddelde golfperiode op diep water
T_p	piekperiode

Lijst van tabellen

Tabel 1.1 Gegevens van Kubussen en Tetrapoden en Breukstenen in een enkele toplaag

Tabel 2.1 Invloed van de helling op het schadecriterium

Tabel 2.2 Te realiseren toplaag

Tabel 2.3 Dimensies modellen met de te realiseren enkele toplaag

Tabel 3.1 Testprogramma “kubussen” in een enkele toplaag

Tabel 3.2 Testprogramma “Tetrapoden” in een enkele toplaag

Tabel 3.3 Testprogramma “breukstenen” in een enkele toplaag

Tabel 3.5 Gemiddelden en standaardafwijkingen van de parameters van kubussen

Tabel 3.6 Niveau II berekening voor kubussen

Tabel 3.7 Gemiddelden en standaardafwijkingen van de parameters van Tetrapoden

Tabel 3.8 Niveau II berekening voor Tetrapoden

Tabel 3.9 Gemiddelden en standaardafwijkingen van de parameters van breukstenen

Tabel 3.10 Niveau II berekening voor breukstenen

Tabel 3.11 Kans op overschrijding van de verschillende criteria ten opzichte van het ‘geen schade’ criterium

Tabel 4.1 Materiaalverbruik kubussen in de toplaag bij ‘geen schade’

Tabel 4.2 Vergelijking materiaalverbruik tussen een dubbele en een enkele toplaag van kubussen

Tabel 4.3 Materiaalverbruik kubussen in de toplaag bij gelijk gewicht

Tabel 4.4 Materiaalverbruik Tetrapoden in de toplaag

Tabel 4.5 Vergelijking materiaalverbruik tussen een dubbele en een enkele toplaag van Tetrapoden

Tabel 4.6 Materiaalverbruik breukstenen in de toplaag

Tabel 4.7 Vergelijking materiaalverbruik tussen een dubbele en een enkele toplaag van breukstenen

Tabel 4.8 Materiaalverbruik kubussen en Accropoden in een enkele toplaag

Tabel 4.9 Vergelijking materiaalverbruik tussen een dubbele en een enkele toplaag van breukstenen

Tabel 4.10 Onderlinge vergelijking van het materiaalverbruik

Lijst van figuren

Figuur 2.1 Invloed van de breaker parameter op de toelaatbare significante golfhoogte

Figuur 3.1 Schadeverloop kubussen in een enkele toplaag bij verschillende golfsteilheden

Figuur 3.2 De invloed van de golfsteilheid op de stabiliteit

Figuur 3.3 Schadeverloop Tetrapoden in een enkele toplaag bij verschillende golfsteilheden

Figuur 3.4 De invloed van de golfsteilheid op de stabiliteit bij zowel 'start van schade' als 'bezwijken'

Figuur 3.5 Schadeverloop breukstenen in een enkele toplaag bij verschillende golfsteilheden

Figuur 3.6 De invloed van de golfsteilheid op de stabiliteit

Figuur 3.7 Overschrijdingskans "kubussen" in een enkele toplaag

Figuur 3.8 Ontwerpcriteria voor kubussen in een enkele toplaag

Figuur 3.9 Overschrijdingskans "Tetrapoden" in een enkele toplaag

Figuur 3.10 Ontwerpcriteria voor Tetrapoden in een enkele toplaag

Figuur 3.11 Overschrijdingskans "breukstenen" in een enkele toplaag

Figuur 3.12 Ontwerpcriteria voor breukstenen in een enkele toplaag

Figuur 3.13 Vergelijking van de criteria voor kubussen, Tetrapoden en breukstenen in een enkele toplaag

Figuur 4.1 Vergelijking van de stabiliteit tussen een enkele en een dubbele toplaag van kubussen

Figuur 4.2 Vergelijking van de stabiliteit tussen een enkele en een dubbele toplaag van Tetrapoden

Figuur 4.3 Vergelijking van de stabiliteit tussen een enkele en een dubbele toplaag van breukstenen

Figuur 4.4 Vergelijking van de stabiliteit tussen kubussen en Accropoden in een enkele toplaag

Figuur 4.5 Vergelijking van de resultaten van modelproeven op een enkele toplaag met CUR 161

Beschrijving van de proeven

A. Kubussen

A.1 Opzet van het model met kubussen in de toplaag

Tabel A.1 Opzet "kubussen" in de toplaag

toplaag	filterlaag	teen	kern
$D_n = 0,050$ m $M = 0,285$ kg $B_{\text{kruin}} = 0,40$ m	stenen 20-25 mm $t = 0,05$ m	stenen 20-25 mm	$D_{n50} = 0,011$ m wijdte = 1,5

De kubussen zijn als volgt random geplaatst (zie Foto 3 en Foto 4):

Laag 1: 55 oranje kubussen (bij de teen)

Laag 2: 55 blauwe kubussen

Laag 3: 55 grijze kubussen

Laag 4: 55 oranje kubussen

Laag 5: 55 blauwe kubussen

Ongeveer 16 kubussen zijn in één meter aangebracht. De opzet van het model is te zien in Figuur 2.

Posities van de golfhoogtemeters

1. (6.0,10.8)

3. (6.0,3.3)

5. (19.77,7.0)

2. (6.2,10.8)

4. (6.2,3.3)

6. (19.93,7.0)

Golfhoogtemeter 6 staat vrijwel op de teen.

A.2 Resultaten van de proeven met $0,059 \leq s_{m0} \leq 0,070$

P01 (deze test is toegevoegd aan de serie $0,051 \leq s_{m0} \leq 0,058$)

- $T = 12$ min 30s, $H_{s0} = 0,060$ m
- Geen schade

P02

- $T = 14$ min, $H_{s0} = 0,069$ m
- Geen schade

P03

- $T = 26$ min, $H_{s0} = 0,105$ m
- Geen schade

P04

- $T = 21$ min, $H_{s0} = 0,138$ m
- Geen schade
- Beweging van een kubus (4^{de} laag, 1^{ste} oranje kubus tegen grijze aan)
- Redelijke overslag

P05 (zie Foto 5 en Foto 6)

- $T = 21$ min 45s, $H_{s0} = 0,168$ m
- Geen schade
- 1 Bewegend blokje
- Veel overslag
- Talud achterkant afgevlakt

Om het achtertalud stabielier te maken is een keermuur geplaatst. De kruin is verbreed naar 56 cm en er zijn 85 extra grijze kubussen geplaatst (zie *Foto 7*). Deze 6^{de} laag is niet interessant voor dit onderzoek.

P06 (zie *Foto 8*)

- $T = 22 \text{ min } 20\text{s}$, $H_{s0} = 0,184\text{m}$
- Geen schade
- Veel overslag
- 5 Bewegende blokken
- Klein beetje afvlakking van de teen

P07

- $T = 23 \text{ min } 30\text{s}$, $H_{s0} = 0,214\text{m}$
- Geen schade
- Veel bewegende blokken die zich weer vast klemmen
- Veel overslag
- Teen materiaal ligt op kern materiaal onder aan de constructie

P08

$T = 26 \text{ min } 30\text{s}$, $H_{s0} = 0,245\text{m}$

- Geen schade
- Kubussen in de lagen 1 tot en met 3 liggen dicht tegen elkaar, percentage holle ruimten $< 15\%$
- Kubussen in laag 4 liggen los; de kubussen bewegen constant
- Nog meer teen materiaal op kern materiaal onder aan de constructie
- Heel veel overslag

P09 (zie *Foto 9, 10, 11 en 12*)

- $T = 28 \text{ min}$, $H_{s0} = 0,270\text{m}$
- Golfbreker staat op het punt van bezwijken
- 5 Kubussen uit de constructie geslagen
 - laag 1: 1 laag 4: 2
 - laag 2: 1 laag 5: 1
 - laag 3: 0
- Teen is bijna helemaal weg, maar niet bezwijken; ondersteunende functie is nog intact
- Kern materiaal achter/onder de kruin (40 cm extra) begon uit te spoelen
- Extra 6^{de} laag ligt helemaal verspreid. (n.v.t. voor dit onderzoek)

Hierna is het model hersteld voor de volgende reeks proeven.

A.3 Resultaten van de proeven met $0,051 \leq s_{m0} \leq 0,058$

De kruin is verbreed naar 82 cm. De extra 6^{de} laag bestaat uit 115 grijze kubussen (zie *Foto 13* en *14* en *Figuur 3*).

Laag 1: 55 oranje kubussen (bij de teen)

Laag 2: 55 blauwe kubussen

Laag 3: 55 grijze kubussen

Laag 4: 55 oranje kubussen

Laag 5: 55 blauwe kubussen

Laag 6: 115 grijze kubussen (n.v.t. voor dit onderzoek).

Posities van de golfhoogtemeters

1. (6.00,10.8)	3. (6.00,3.3)	5. (19.73,7.0)
2. (6.25,10.8)	4. (6.25,3.3)	6. (19.93,7.0)

P10

- T = 14 min 40s, $H_{s0} = 0,075\text{m}$
- Geen shade
- Heel klein beetje sproeiwater

P11

- T = 23 min 15s, $H_{s0} = 0,132\text{m}$
- Geen shade
- Wat overslag
- Beetje beweging

P12 (deze test wordt niet meegenomen in de analyse)

T = 24 min 10s, $H_{s0} = 0,130\text{m}$

- Geen shade
- Wat beweging
- Beetje overslag

Posities van de golfhoogtemeters

1. (6.0,10.8)	3. (6.0,3.3)	5. (19.58,7.0)
2. (6.4,10.8)	4. (6.4,3.3)	6. (19.93,7.0)

P13 (zie *Foto 15* en *Foto 16*)

- T = 26 min 10s, $H_{s0} = 0,187\text{m}$
- 4 Kubussen (2^{de} laag) uit de constructie geslagen (eerste 15 min van de proef)
- Kubussen uit de andere lagen zijn verzakt en zetten zich weer klem
- Veel beweging
- Veel overslag
- Golfklappen vielen voornamelijk op de 2^{de} laag (blauwe kubussen)
- De filterlaag is goed zichtbaar bij de overgang tussen de kruin en het talud
- De filterlaag spoelt (nog) niet uit

P14 (zie Foto 17 en Foto 18)

- $T = 28$ min 20s, $H_{s0} = 0,200$ m
- Nog 2 kubussen eruit (laag 1 en laag 2)
- Kubussen in de lagen 1, 2 en 3 liggen heel dicht tegen elkaar aan
- Veel openingen in laag 4
- Het filtermateriaal spoelt nog steeds niet uit
- Heel veel overslag
- Golfklappen echt op de constructie
- Golfbreker houdt zijn werking

Posities van de golfhoogtemeters:

1. (6.0,10.8)	3. (6.0,3.3)	5. (19.48,7.0)
2. (6.5,10.8)	4. (6.5,3.3)	6. (19.93,7.0)

P15 (zie Foto 19 en Foto 20)

- $T = 29$ min, $H_{s0} = 0,208$ m
- De golfbreker is bezweken, 57 weggeslagen kubussen
 - laag 1: 7
 - laag 2: 13
 - laag 3: 14
 - laag 4: 21
 - laag 5: 2
- Filtermateriaal begon uit te spoelen
- Op bepaalde plaatsen is het kernmateriaal zichtbaar

Hierna is de constructie hersteld voor de volgende reeks proeven.

A.4 Resultaten van de proeven met $0,033 \leq s_{m0} \leq 0,041$

Er zijn 25 extra grijze kubussen geplaatst.

Laag 1: 55 oranje kubussen (bij de teen)

Laag 2: 55 blauwe kubussen

Laag 3: 55 grijze kubussen

Laag 4: 55 oranje kubussen

Laag 5: 55 blauwe kubussen

Laag 6: 140 grijze kubussen (zie Foto 21)

Er is overgegaan op de zgn. 3-puntsmeting. Posities van de golfhoogtemeters:

1. (6.0,10.8)	3. (6.0,3.3)	5. (16.50,7.0)
2. (6.5,10.8)	4. (6.5,3.3)	6. (17.25,7.0)
		7. (17.75,7.0)

P16

- $T = 17$ min 50s, $H_{s0} = 0,070$ m
- Geen schade

P17

- $T = 25$ min 30s, $H_{s0} = 0,120$ m
- Geen schade
- Enkele bewegende kubussen
- Af en toe een beetje overslag

P18

- $T = 30$ min $40s$, $H_{s0} = 0,160m$
- Geen shade
- Geen echte klappen op het talud
- Er ligt wat filtermateriaal op de teen van de constructie (kernmateriaal)
- Redelijke overslag

De golfhoogtemeters staan op de volgende plaatsen:

1. (6.0,10.8)	3. (6.0,3.3)	5. (16.50,7.0)
2. (6.6,10.8)	4. (6.6,3.3)	6. (17.25,7.0)
		7. (17.75,7.0)

P19 (zie Foto 22)

- $T = 37$ min, $H_{s0} = 0,199m$
- Een blauw blokje uit laag 2 weggeslagen ($T < 3$ minuten)
- Alle lagen zakken en glijden
- Afvlakking van de teen
- Veel beweging van kubussen

P20 (zie Foto 23, 24, 25 en 26)

- $T = 37$ min $30s$, $H_{s0} = 0,238m$
- 22 extra kubussen eruit
 - laag 1: 9
 - laag 2: 7
 - laag 3: 4
 - laag 4: 1
 - laag 5: 2
- De constructie is bezweken

Hierna is de constructie hersteld voor de proeven met tetrapoden in een enkele toplaag.

In Tabel 1 zijn de resultaten voor “kubussen” in een enkele toplaag uitgezet.

B. Tetrapoden

B.1 Opzet van het model met tetrapoden in de toplaag

Tabel B.1 Opzet "tetrapoden" in de toplaag

toplaag	filterlaag	teen	kern
$D_n = 0,050$ m $M = 0,284$ kg $B_{kruin} = 0,40$ m	stenen 20-25 mm $t = 0,07$ m	stenen 20-25 mm	$D_{n50} = 0,011$ m wijdte = 1,5

De tetrapoden zijn op de volgende manier geplaatst (zie Foto 27 en 28 en Figuur 11):

Laag 1: 56 gele tetrapoden (bij de teen)

Laag 2: 56 rode tetrapoden

Laag 3: 56 bruine tetrapoden (vanaf SWL)

Laag 4: 28 blauwe tetrapoden (begin kruin)

Per rij, 1 meter breed, zijn 14 tetrapoden geplaatst.

De golfhoogtemeters staan op de volgende plaatsen:

- | | | |
|---------------|--------------|----------------|
| 1. (6.0,10.8) | 3. (6.0,3.3) | 5. (16.50,7.0) |
| 2. (6.6,10.8) | 4. (6.6,3.3) | 6. (17.25,7.0) |
| | | 7. (17.75,7.0) |

B.2 Resultaten van de proeven met $0,052 \leq s_{m0} \leq 0,056$

P21 (zie Foto 29 en 30)

- $T = 15$ min 40s, $H_{s0} = 0,070$ m
- Geen schade
- Beetje beweging
- Heel klein beetje sproeiwater

P22

- $T = 19$ min 30s, $H_{s0} = 0,112$ m
- Geen schade, wel op de grens
- 4 oranje tetrapoden liggen op de laatste rijd van de gele tetrapoden (1^{ste} laag). De tetrapoden zijn er niet uitgetild maar gezakt.
- Wat sproeiwater

P23 (zie Foto 31 en Foto 32)

- $T = 20$ min 50s, $H_{s0} = 0,117$ m
- 1 Tetrapod uit de derde laag verplaatst
- 1 bruine tetrapod op de oranje laag
- 2 bruine tetrapoden meegeschoven
- Het filtermateriaal is zichtbaar op de grens tussen oranje en bruin
- Wat sproeiwater

P24 (zie *Foto 33* en *Foto 34*)

- $T = 22 \text{ min } 15\text{s}$, $H_{s0} = 0,134\text{m}$
- Golfbreker is bezweken
- 13 extra tetrapoden verplaatst
- Tetrapoden schuiven naar elkaar toe waardoor onderaan de golfbreker een stabiele situatie ontstaat. (begint op een dubbele laag te lijken)
- Herstel van de golfbreker zou in de praktijk niet zo moeilijk zijn
- Filtermateriaal is duidelijk zichtbaar, naar niet echt beschadigd
- Er liggen 4 tetrapoden op de teen

Hierna is het model hersteld voor de volgende reeks proeven.

B.3 Resultaten van de proeven met $0,031 \leq s_{m0} \leq 0,039$

Op *Foto 35* en *Foto 36* is de situatie voor P25 te zien.

P25

- $T = 20 \text{ min } 30\text{s}$, $H_{s0} = 0,082\text{m}$
- Beweging in de eerste en tweede laag
- Start van schade op de grens van de lagen 1 en 2
- Verschoven tetrapod 1^{ste} laag 3^{de} rij (midden); geel op geel
- Verschoven tetrapod 2^{de} laag 1^{ste} rij (rechts); rood op geel
- Geen overslag

P26 (zie *Foto 37* en *Foto 38*)

- $T = 26 \text{ min } 30\text{s}$, $H_{s0} = 0,100\text{m}$
- Golfbreker is bezweken
- 14 Tetrapoden verplaatst
 - laag 1: 1
 - laag 2: 8
 - laag 3: 5
- Op veel plaatsen is het filtermateriaal goed zichtbaar
- Beetje overslag

Na P26 is het model hersteld voor de volgende reeks proeven.

B.4 Resultaten van de proeven met $0,013 \leq s_{m0} \leq 0,014$

Op *Foto 39* is de situatie voor P27 te zien.

Posities van de golfhoogtemeters:

1. (6.0,10.8)	3. (6.0,3.3)	5. (15.75,7.0)
2. (6.6,10.8)	4. (6.6,3.3)	6. (16.65,7.0)
		7. (17.25,7.0)

P27

- $T = 31$ min 40s, $H_{s0} = 0,068$ m
- Geen shade
- Beetje beweging
- Geen overslag

P28 (zie *Foto 40*)

- $T = 36$ min 40s, $H_{s0} = 0,096$ m
- Golfbreker is bezweken
- 30 Tetrapoden verplaatst
 - laag 1: 18
 - laag 2: 12
 - laag 3: 0
- Filtermateriaal hield zich goed staande

Na P28 is het model hersteld voor proeven met breukstenen.

In *Tabel 2* zijn de resultaten voor “tetrapoden” in een enkele toplaag uitgezet.

C. Breukstenen

C.1 Opzet van het model met kubussen in de toplaag

Tabel C.1 Opzet "breukstenen" in de toplaag

toplaag	filterlaag	teen	kern
$D_{n50} = 0,041$ m $M_{50} = 0,176$ kg $B_{kruin} = 0,40$ m wijdte = 1,22	stenen 25-30 mm $t = 0,07$ m	stenen 25-30 mm	$D_{n50} = 0,011$ m wijdte = 1,5

Het soortelijk gewicht van de stenen is ongeveer 2615 kg/m^3 . De breukstenen zijn als volgt geplaatst (zie Foto 41 en 42 en Figuur 19):

Laag 1: 98 rode breukstenen (bij de teen)

Laag 2: 96 blauwe breukstenen (halverwege SWL)

Laag 3: 148 witte breukstenen (halverwege begin kruin)

Er passen 15 à 16 breukstenen op 1 meter breedte. Het percentage holle ruimten is in de orde van 25%.

Posities van de golfhoogtemeters:

1. (6.0,10.8)	3. (3.0,10.8)	5. (16.50,7.0)
2. (6.5,10.8)	4. (3.5,10.8)	6. (17.25,7.0)
		7. (17.75,7.0)

C.2 Resultaten van de proeven met $0,029 \leq s_{m0} \leq 0,035$

P29

- $T = 19$ min 50s, $H_{s0} = 0.071$ m
- Geen schade
- Beweging van wat kleinere stenen rond SWL
- Wat overslag

P30

$T = 20$ min 15s, $H_{s0} = 0,088$ m

- 1 Blauw steentje (laag 2) eruit (bewoog in de vorige proef)
- Veel overslag
- Stabiele indruk

P31 (zie Foto 43 en Foto 44)

- $T = 23$ min 20s, $H_{s0} = 0,109$ m
- Golfbreker is bezwaken
- 34 Extra stenen verplaatst
 - laag 1: 5
 - laag 2: 27
 - laag 3: 2
- Veel overslag

Hierna is het model hersteld voor de volgende reeks proeven

C.3 Resultaten van de proeven met $0,053 \leq s_{m0} \leq 0,058$

De kleurenbanden zijn verwisseld (zie *Foto 45* en *46*)

Laag 1: 96 blauwe breukstenen (bij de teen)

Laag 2: 98 rode breukstenen (halverwege SWL)

Laag 3: 148 witte breukstenen (halverwege begin kruin)

P32

- $T = 14$ min, $H_{s0} = 0,060$ m
- Geen schade
- Geen beweging
- Wat sproeiwater

P33 (zie *Foto 47*)

- $T = 16$ min, $H_{s0} = 0,085$ m
- 2 rode stenen (laag 2) eruit
- Wat overslag

P34

- $T = 17$ min 30s, $H_{s0} = 0,096$ m
- Geen verdere schade
- Geen beweging
- Wat overslag

P35 (zie *Foto 48*)

- $T = 19$ min 30s, $H_{s0} = 0,105$ m
- 7 Extra rode stenen eruit, in totaal 9 (laag 2)
- Golfbreker staat op het punt van bezwijken; er wordt niet verder gegolfd
- Veel overslag

Na P35 is het model hersteld voor de laatste reeks proeven.

C.4 Resultaten van de proeven met $0,015 \leq s_{m0} \leq 0,018$

Op *Foto 49* en *Foto 50* is de situatie voor P36 te zien.

Posities van de golfhoogtemeters:

1. (6.0,10.8)	3. (3.0,10.8)	5. (15.75,7.0)
2. (6.6,10.8)	4. (3.6,10.8)	6. (16.65,7.0)
		7. (17.25,7.0)

P36

- $T = 23 \text{ min } 45\text{s}$, $H_{s0} = 0,059\text{m}$
- Geen shade
- Beetje beweging
- Sproeiwater

P37

- $T = 30 \text{ min } 25\text{s}$, $H_{s0} = 0,078\text{m}$
- Geen shade
- Beweging van 1 rode en 1 witte steen
- Af en toe overslag

P38 (zie *Foto 51*)

- $T = 36 \text{ min}$, $H_{s0} = 0,098\text{m}$
- 6 Stenen eruit
 - laag 1: 0
 - laag 2: 4
 - laag 3: 2
- Veel beweging
- Veel overslag

P39 (zie *Foto 52* en *Foto 53*)

- $T = 38 \text{ min}$, $H_{s0} = 0,108\text{m}$
- Golfbreker is bezwaken, in totaal 86 weggeslagen stenen
 - laag 1: 0
 - laag 2: 38
 - laag 3: 48
- Veel overslag
- Wat filtermateriaal verplaatst, niet echt uitgespoeld
- De teen is intact.

Na P39 is het model afgebroken en zijn 22 proeven zonder constructie gedaan om de golfhoogte bij de teen van de constructie nauwkeuriger te kunnen bepalen.

In *Tabel 3* zijn de resultaten voor “breukstenen” in een enkele toplaag uitgezet.

Foto's

Opbouw van het model



Foto 1 De kern van het model $D_{n50} = 0,011\text{m}$



Foto 2 De filterlaag van het model $25 < D_n < 30 \text{ mm}$

Plaatsing van de kubussen



Foto 3 Vooraanzicht



Foto 4 Bovenaanzicht

Na P05

Het achtertalud van de golfbreker begint af te vlakken



Foto 5 Afvlakking van het achtertalud

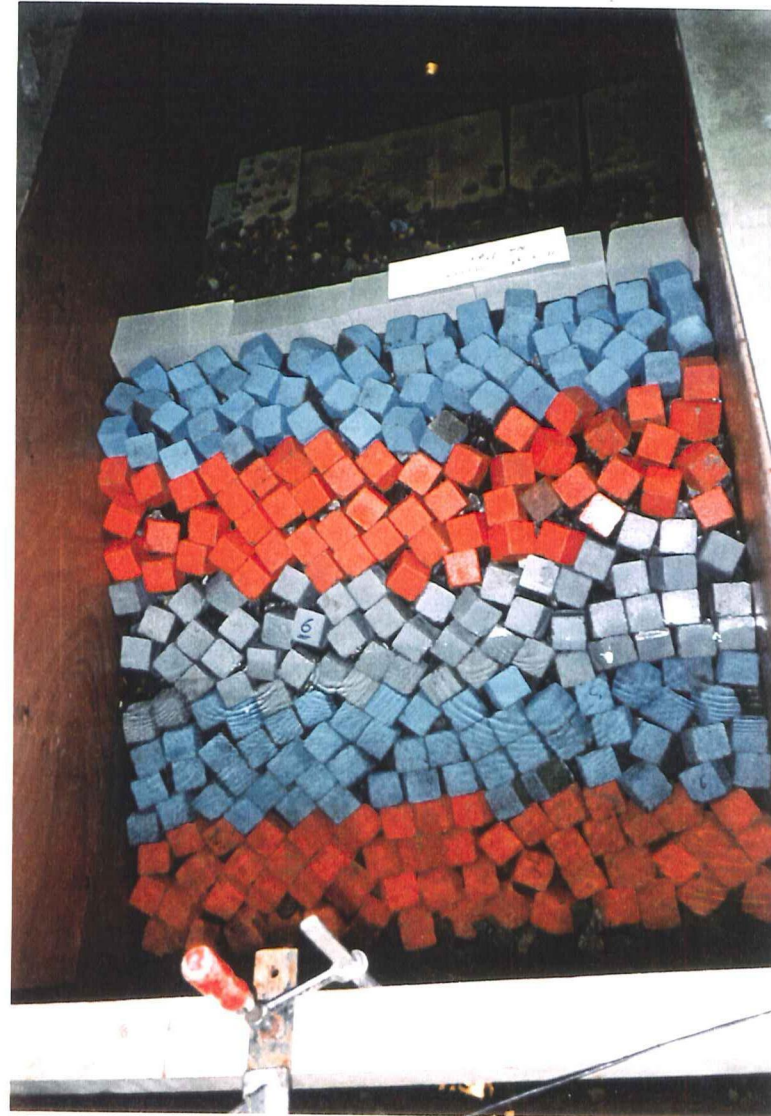


Foto 6 De kubussen zijn niet veel verschoven

De kruin is verbreed, een extra laag kubussen en een keermuur zijn geplaatst



Foto 7 Voor P06



Foto 8 Na P06, 5 bewegende kubussen

Na P09

5 kubussen verplaatst, de golfbreker staat op punt van bezwijken



Foto 9 Schade in de zesde laag is niet belangrijk Foto 10 Vooraanzicht

Een langere stormduur zou zeker tot bezwijken hebben geleid



Foto 11 Afvlakking van de teen

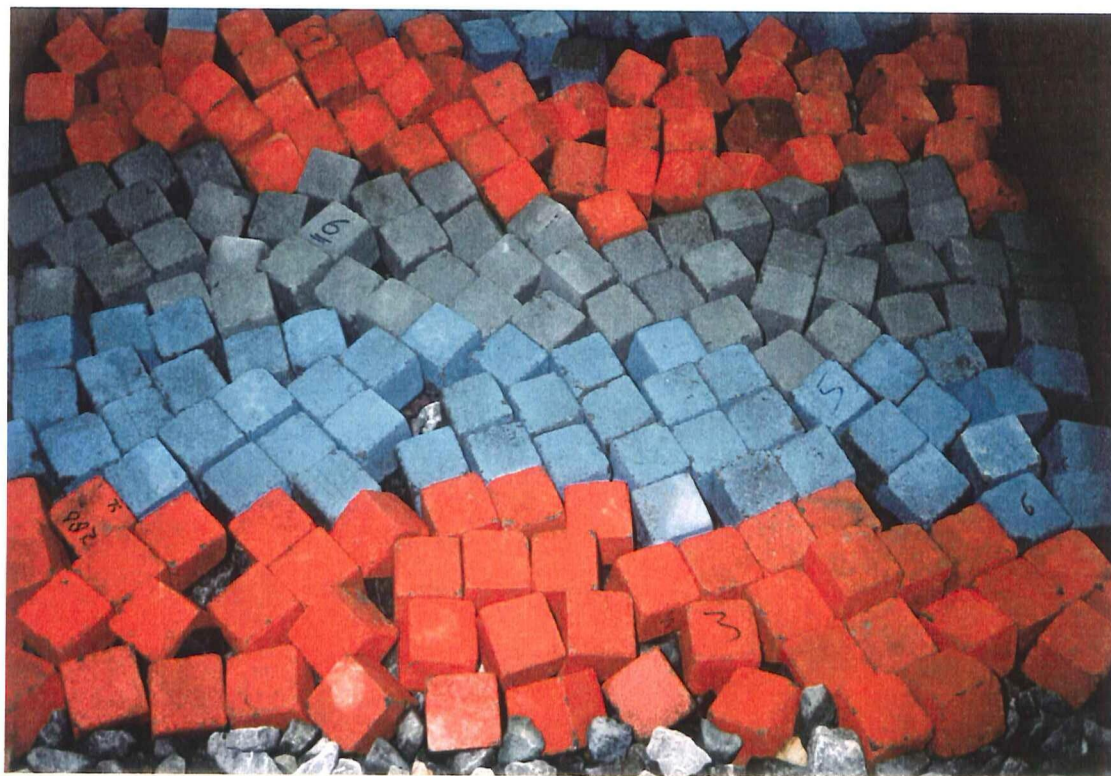


Foto 12 De kubussen liggen dichter tegen elkaar aan

Nieuwe serie proeven

Golfsteilheid op diep water tussen 0,051 en 0,058



Foto 13 Random plaatsing van de kubussen



Foto 14 Bovenaanzicht

Na P13



Foto 15 Vier kubussen verplaatst

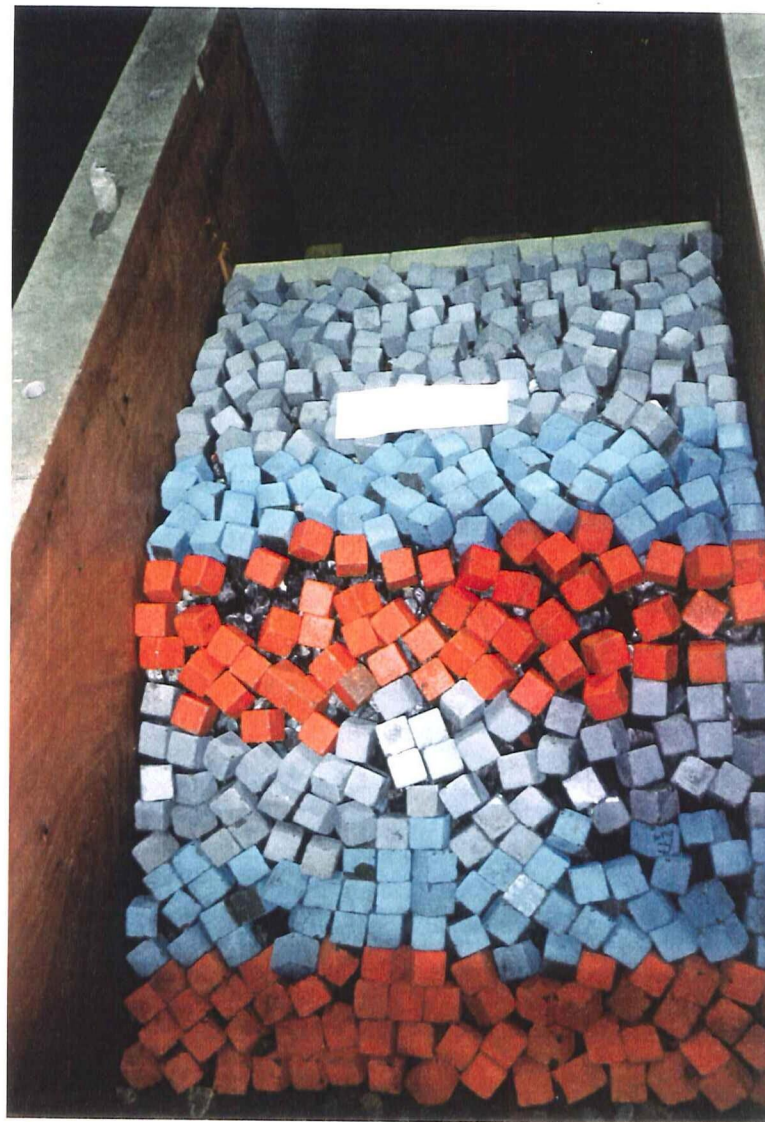


Foto 16 Veel verplaatsingen in de vierde laag

Na P14

Nog 2 kubussen verplaatst



Foto 17 Bovenaanzicht



Foto 18 Kubussen in de 4^{de} laag liggen verspreid

Na P15

De golfbreker is bezweken



Foto 19 In totaal 57 kubussen verplaatst



Foto 20 Een groot gat rond en boven SWL

Nieuwe serie proeven

golfsteilheid op diep water tussen 0,033 en 0,041



Foto 21 Plaatsing van de kubussen voor P16

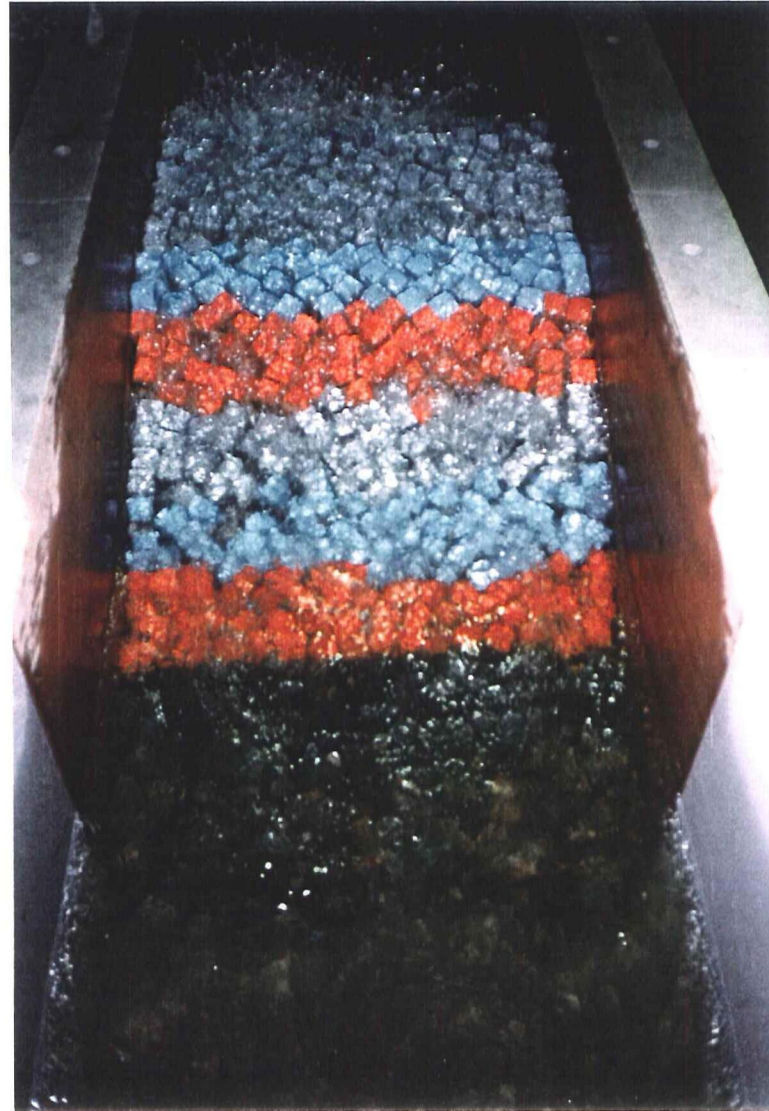


Foto 22 Tijdens P19; H_{sc} : 21,5 cm

Tijdens P20

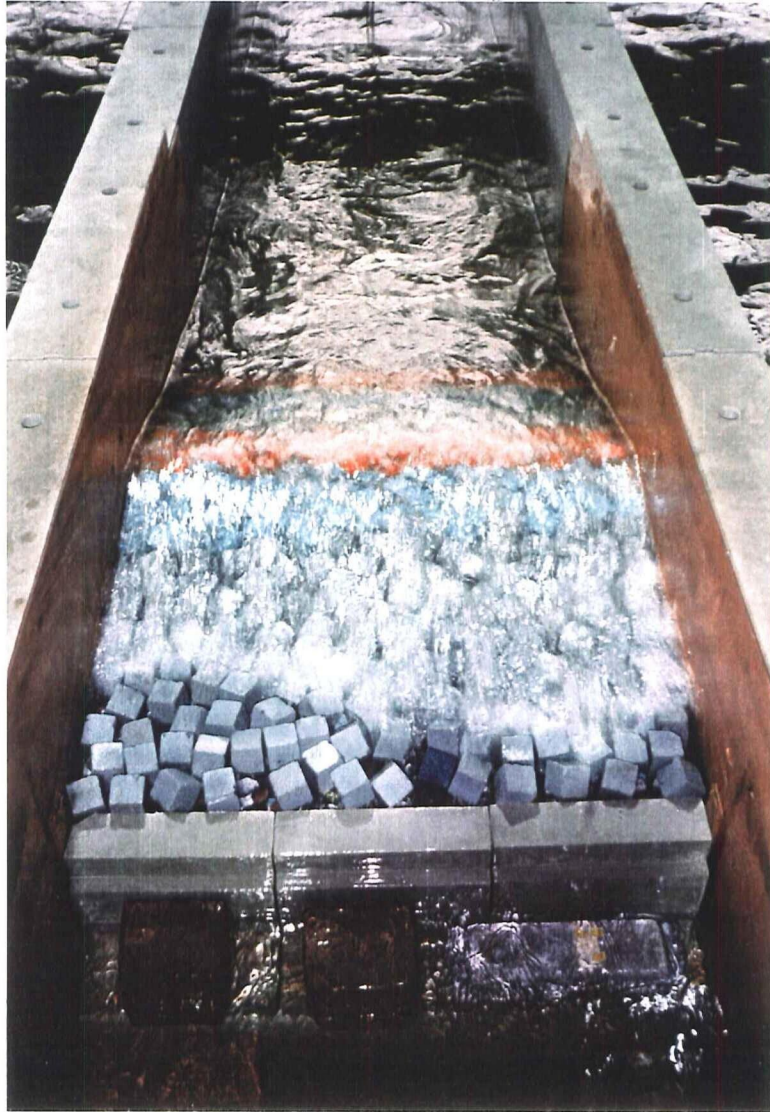


Foto 23 H_{sc} : 25,6 cm

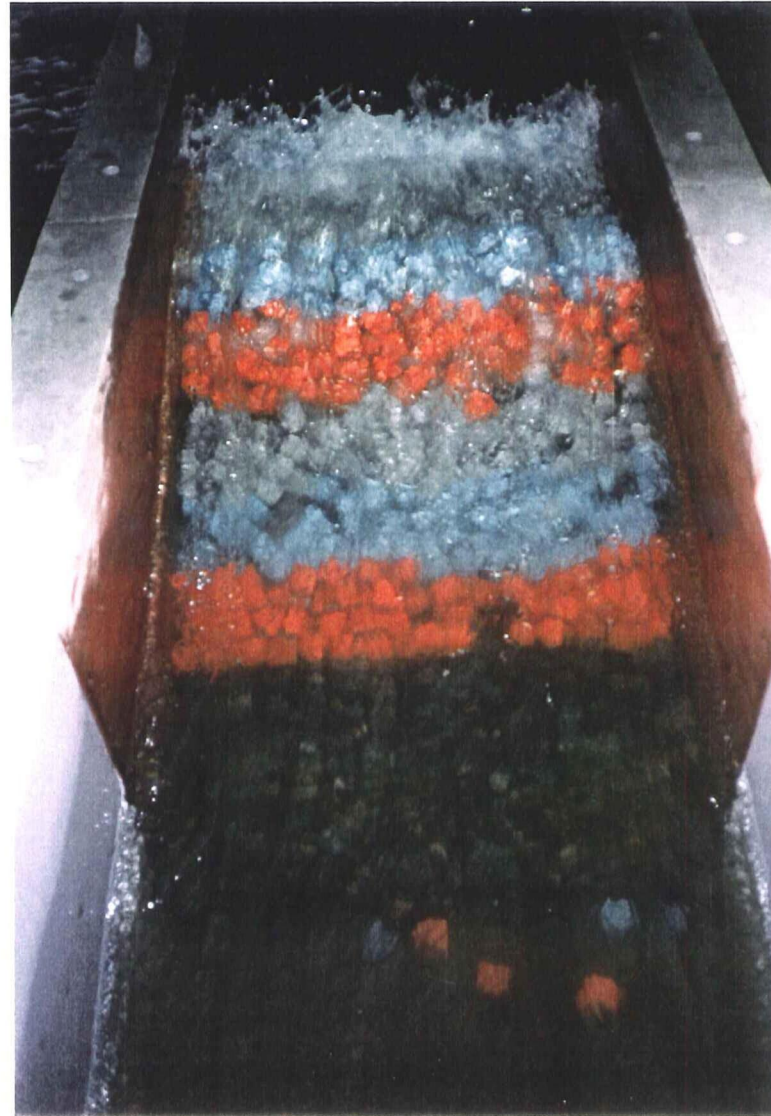


Foto 24 In ieder geval 6 kubussen verplaatst

Na P20

De golfbreker is bezweken



Foto 25 In totaal 26 verplaatste kubussen



Foto 26 Afvlakking van de teen

Tetrapoden

Voor P21

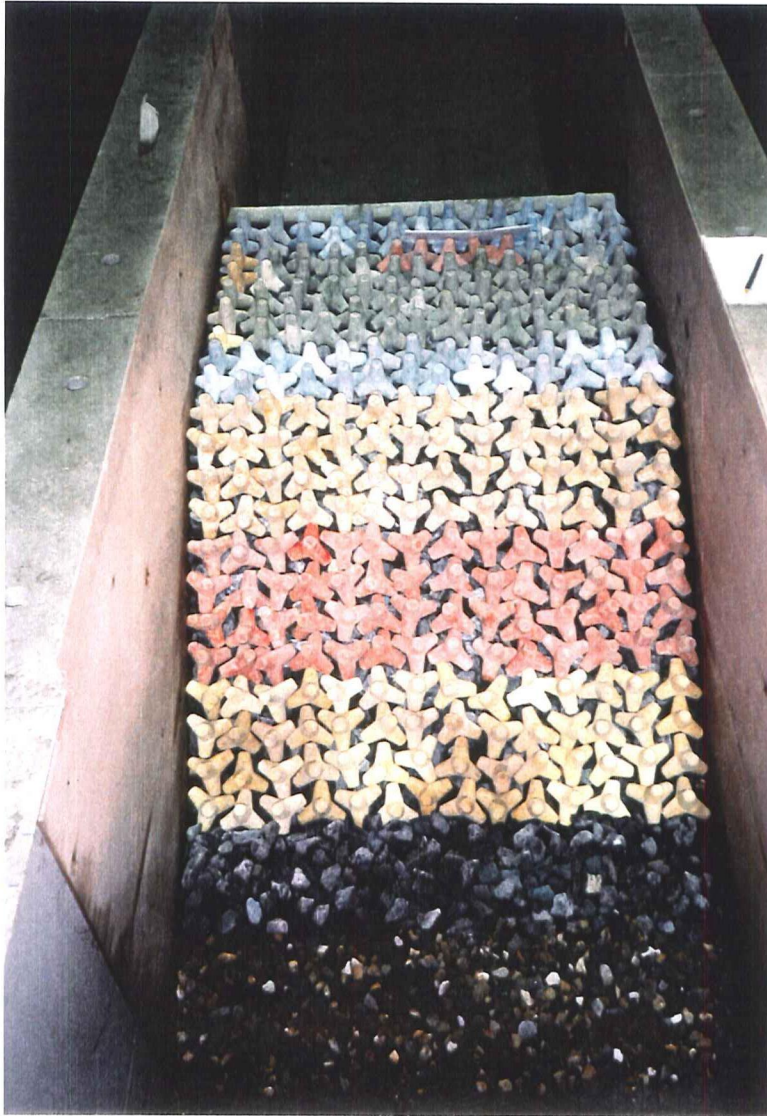


Foto 27 Een regelmatige plaatsing



Foto 28 Vooraanzicht

Na P21

Ingolven met een diep water golf van 7,7 cm



Foto 29 Geen schade



Foto 30 Wel beweging

Na P23



Foto 31 Veel beweging binnen de lagen



Foto 32 Eén verplaatste tetrapod

Na P24

De golfbreker is bezweken



Foto 33 Groot gat boven SWL



Foto 34 Onderaan de constructie: een stabiele situatie

Nieuwe serie proeven

Golfsteilheid op diep water tussen 0,031 en 0,039

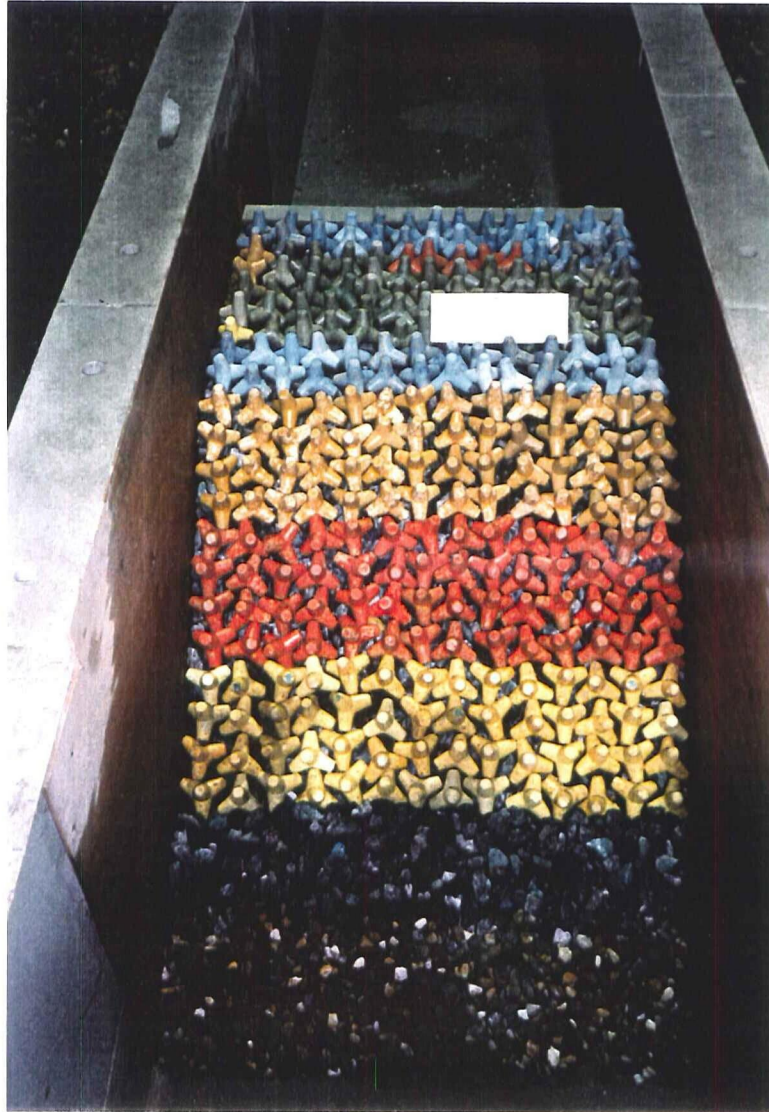


Foto 35 Voor P25

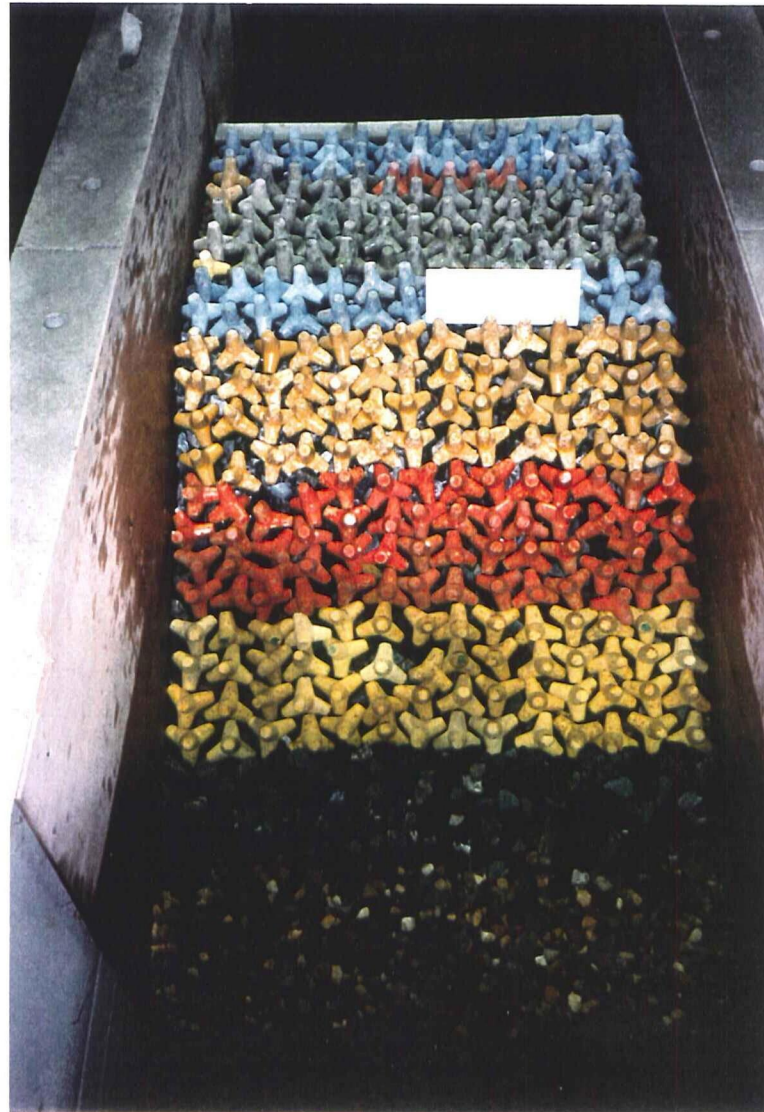


Foto 36 De plaatsing kost veel tijd

Na P26

De golfbreker is bezweken



Foto 37 In totaal 14 tetrapoden verplaatst



Foto 38 Geen problemen voor het kern- en filtermateriaal

Nieuwe serie proeven

Golfsteilheid op diep water tussen 0,012 en 0,017



Foto 39 Voor P27



Foto 40 Na P28, de golfbreker is bezweken

Breukstenen

Golfsteilheid op diep water tussen 0,029 en 0,035



Foto 41 Plaatsing van de breukstenen



Foto 42 Voor P29

Na P31

De golfbreker is bezweken



Foto 43 Bij elkaar 34 breukstenen verplaatst

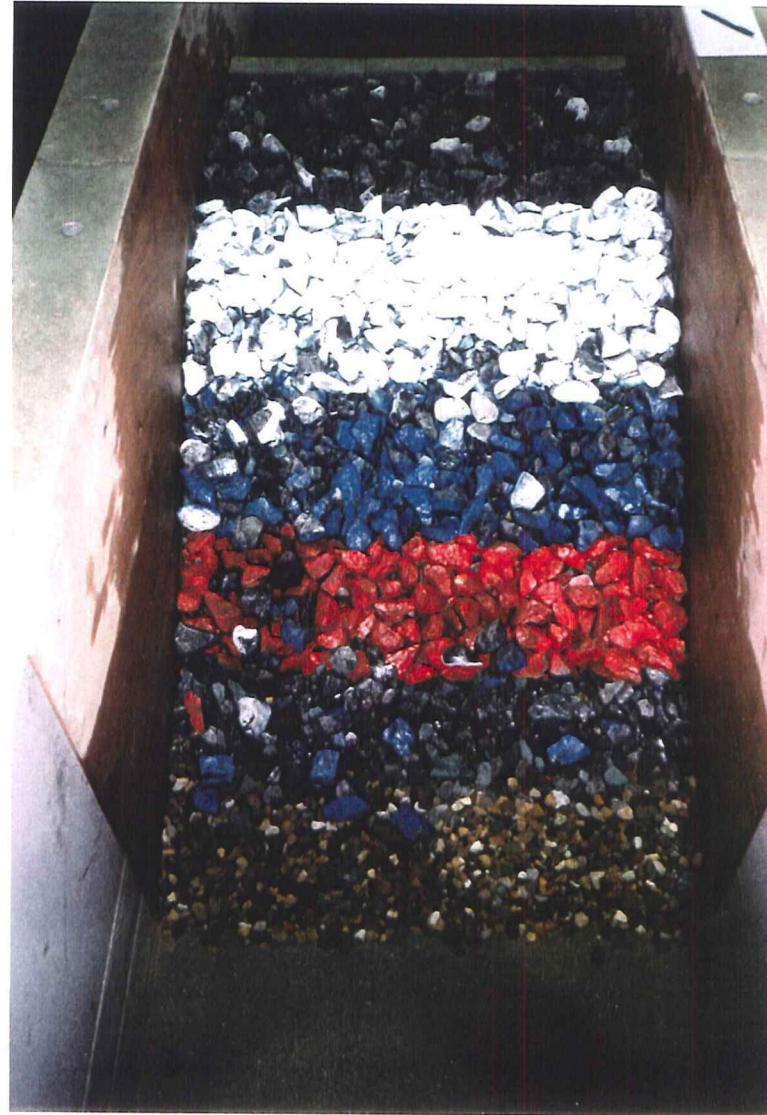


Foto 44 Bovenaanzicht

Nieuwe serie proeven

Golfsteilheid op diep water tussen 0,053 en 0,058



Foto 45 Voor P32



Foto 46 $D_{n50} = 0,041\text{m}$

De piekperiode varieert van 0,98s tot 1,26s

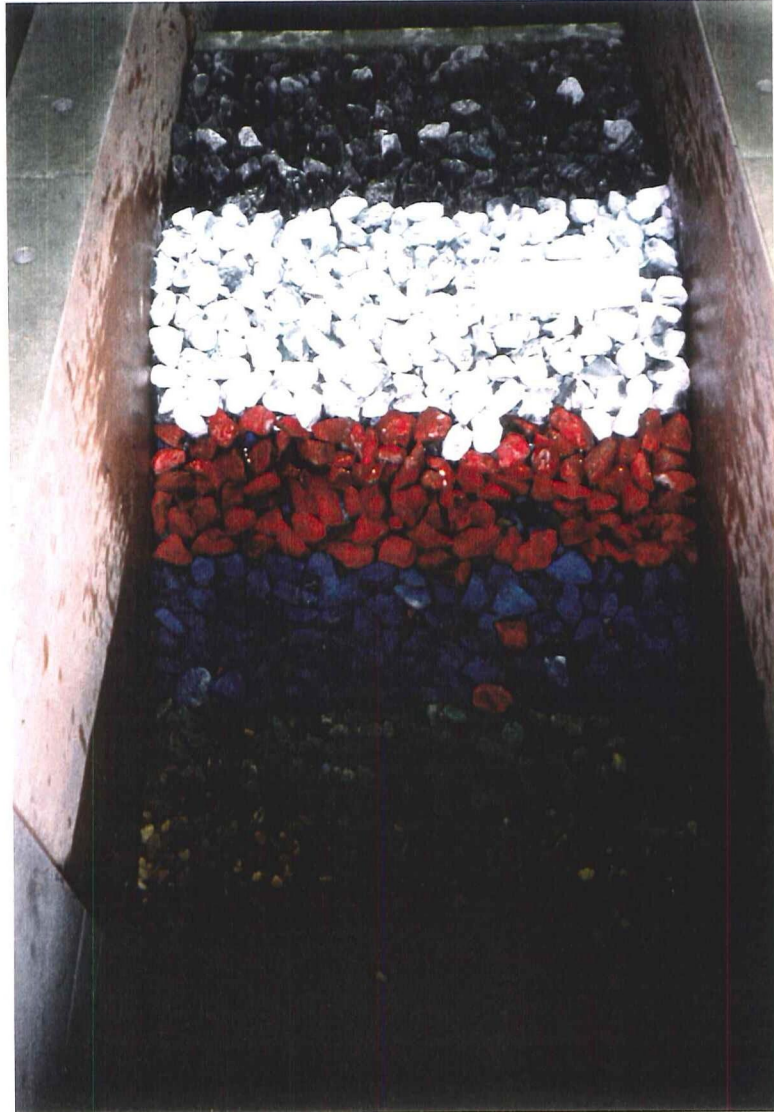


Foto 47 Na P33

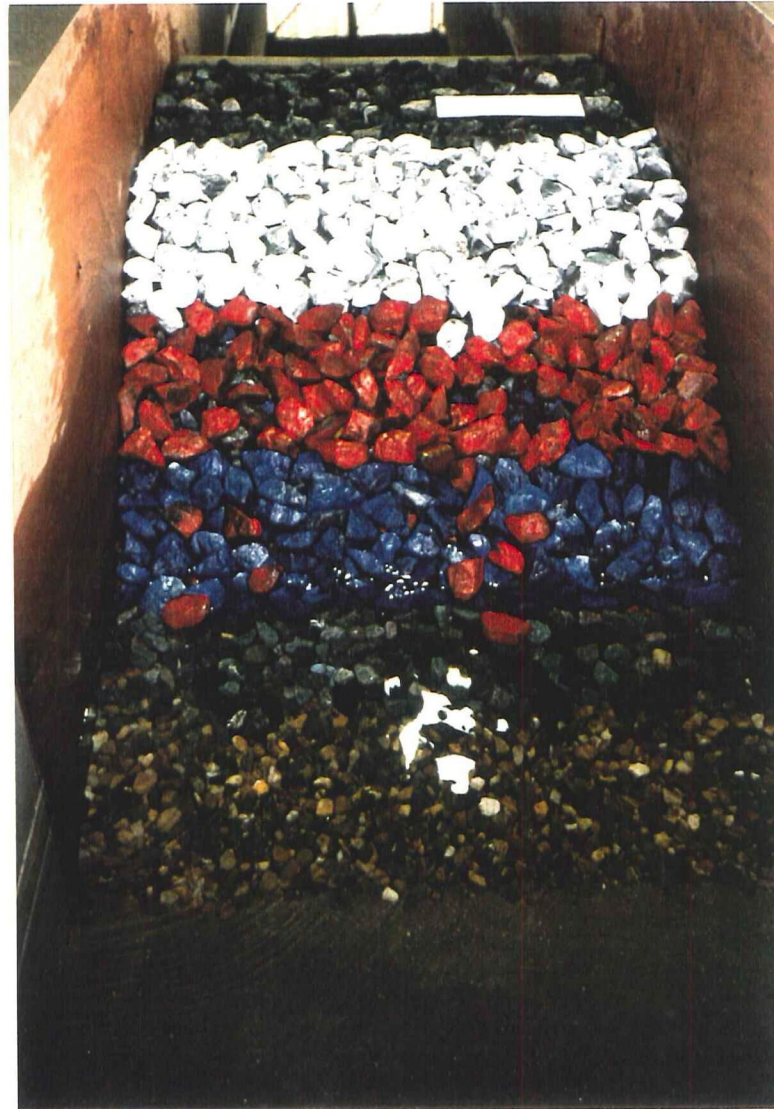


Foto 48 Na P35, de golfbreker staat op punt van bezwijken

Laatste serie proeven

Golfsteilheid op diep water tussen 0,015 en 0,018

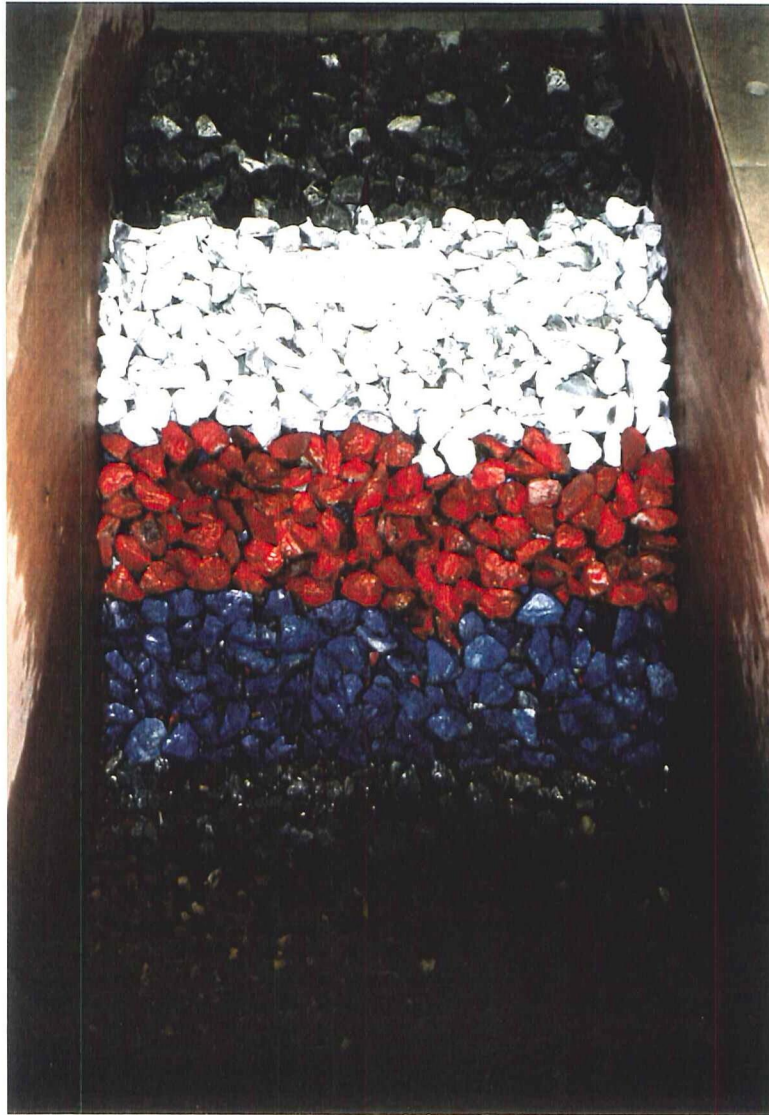


Foto 49 Voor P36



Foto 50 $M_{50} = 176$ gram

Na P38

6 verplaatste stenen



Foto 51 Golfhoogte bij de constructie: 12,1 cm

Na P39

De golfbreker is bezweken



Foto 52 Golfhoogte bij de constructie: 14 cm



Foto 53 In totaal 84 verplaatste stenen

Proeven zonder constructie

Na de modelproeven zijn 22 proeven overgedaan zonder constructie om de inkomende golfhoogte, H_s , te kunnen bepalen. Deze proeven zijn onderverdeeld naar golfsteilheid. Met behulp van de golfhoogten op diep water, die bepaald zijn met proeven met constructie, kan met gebruikmaking van de relatie tussen de golfhoogten op diep water en bij de constructie (afhankelijk van de golfsteilheid), bepaald met de proeven zonder constructie, de golfhoogte bij de constructie (proeven met constructie) worden bepaald.

Proef G.. is met dezelfde stuurfile aangemaakt als de proef P.. , maar zonder constructie in de bak uitgevoerd. In sommige proeven blijkt de golfperiode op diep water af te wijken van de golfperiode op ondiep water daarom is tijdens de analyse is alleen gebruik gemaakt van de golfperiode op diepwater.

$$s_{m0} = 0,065$$

G05

T_p	1,45 s
T_{m0}	1,27 s
H_{s0}	0,166 m
s_{m0}	0,066
T_m	1,41 s
H_s	0,164 m
s_m	0,053

G09

T_p	1,98 s
T_{m0}	1,64 s
H_{s0}	0,267 m
s_{m0}	0,064
T_m	1,81 s
H_s	0,24 m
s_m	0,047

relatie 1

H_{s0} (m)	H_s (m)
0	0
0,166	0,164
0,267	0,24

Relatie 1 is gebruikt om H_s uit te rekenen voor proeven waarbij s_{m0} ongeveer 0,065 was.

$$s_{m0} = 0,059$$

G02

T_p	0,94 s
T_{m0}	0,85 s
H_{s0}	0,068 m
s_{m0}	0,060
T_m	0,87 s
H_s	0,058 m
s_m	0,049

G04

T_p	1,33 s
T_{m0}	1,23 s
H_{s0}	0,136 m
s_{m0}	0,058
T_m	1,29 s
H_s	0,133 m
s_m	0,051

relatie 2

H_{s0} (m)	H_s (m)
0	0
0,068	0,058
0,136	0,133

Relatie 2 is gebruikt om H_s uit te rekenen voor proeven waarbij s_{m0} ongeveer 0,059 was.

$$s_{m0} = 0,055$$

G01

T_p	0,95 s
T_{m0}	0,83 s
H_{s0}	0,0597 m
s_{m0}	0,055
T_m	0,84 s
H_s	0,047 m
s_m	0,043

G13

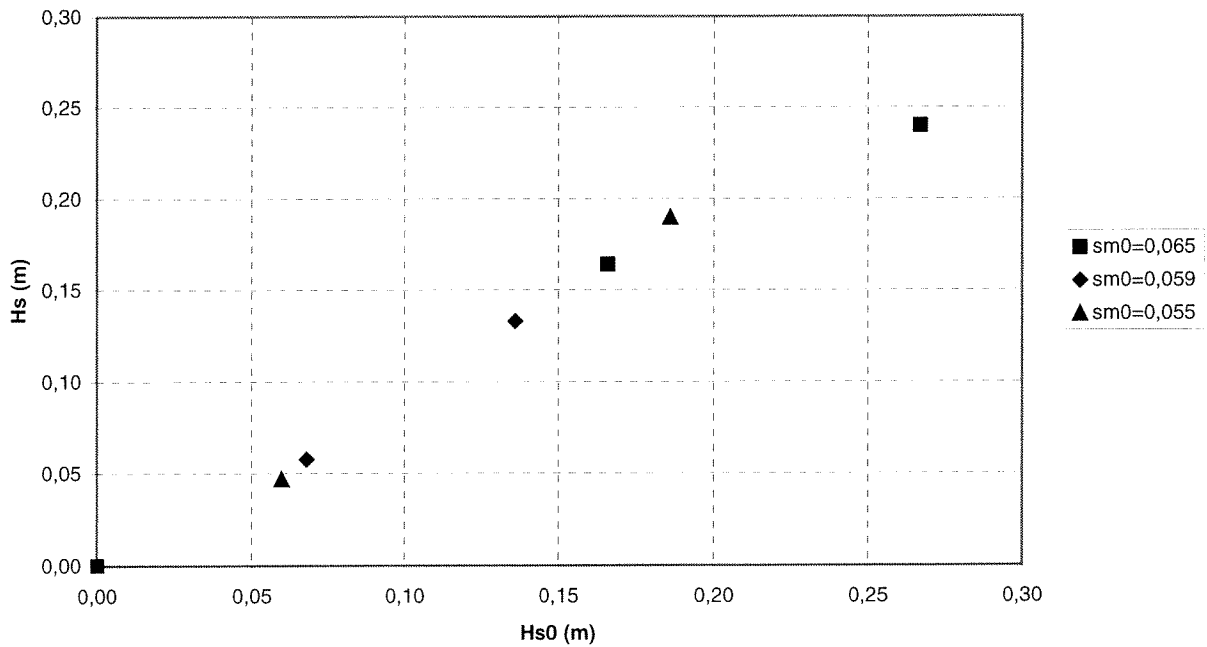
T_p	1,72 s
T_{m0}	1,47 s
H_{s0}	0,186 m
s_{m0}	0,055
T_m	1,57 s
H_s	0,19 m
s_m	0,049

relatie 3

H_{s0} (m)	H_s (m)
0	0
0,0597	0,047
0,186	0,19

Relatie 3 is gebruikt om H_s uit te rekenen voor proeven waarbij s_{m0} ongeveer 0,055 was.

Relatie 1 tot en met 3 zijn in *Figuur zoc1* tegen elkaar uitgezet



Figuur zoc1 Relatie 1 tot en met 3

$$s_{m0} = 0,053$$

G23

T_p	1,3 s
T_{m0}	1,202 s
H_{s0}	0,118 m
s_{m0}	0,052
T_m	1,26 s
H_s	0,115 m
s_m	0,046

G14

T_p	1,93 s
T_{m0}	1,55 s
H_{s0}	0,2 m
s_{m0}	0,053
T_m	1,69 s
H_s	0,211 m
s_m	0,047

relatie 4

H_{s0} (m)	H_s (m)
0	0
0,118	0,115
0,2	0,211

Relatie 4 is gebruikt om H_s uit te rekenen voor proeven waarbij s_{m0} ongeveer 0,053 was.

$$s_{m0} = 0,048$$

G12

T_p	1,58 s
T_{m0}	1,34 s
H_{s0}	0,132 m
s_{m0}	0,047
T_m	1,43 s
H_s	0,136 m
s_m	0,043

G15

T_p	2,01 s
T_{m0}	1,63 s
H_{s0}	0,209 m
s_{m0}	0,050
T_m	1,8 s
H_s	0,222 m
s_m	0,044

relatie 5

H_{s0} (m)	H_s (m)
0	0
0,132	0,136
0,209	0,222

Relatie 5 is gebruikt om H_s uit te rekenen voor proeven waarbij s_{m0} ongeveer 0,048 was.

$s_{m0} = 0,040$

G16

G25

G18

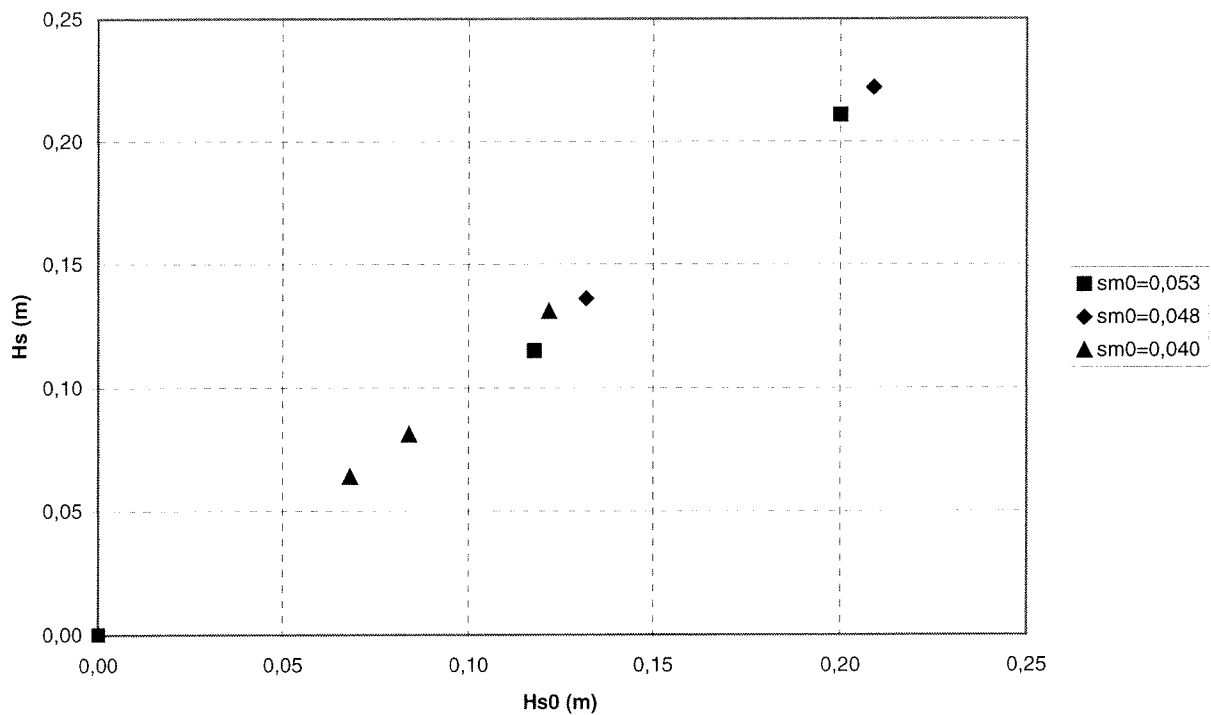
T_p	1,21 s	T_p	1,31 s	T_p	1,67 s
T_{m0}	1,03 s	T_{m0}	1,15 s	T_{m0}	1,41 s
H_{s0}	0,068 m	H_{s0}	0,084 m	H_{s0}	0,122 m
s_{m0}	0,041	s_{m0}	0,041	s_{m0}	0,039
T_m	1,05 s	T_m	1,18 s	T_m	1,49 s
H_s	0,064 m	H_s	0,081 m	H_s	0,131 m
s_m	0,037	s_m	0,037	s_m	0,038

relatie 6

H_{s0} (m)	H_s (m)
0	0
0,068	0,064
0,084	0,081
0,122	0,131

Relatie 6 is gebruikt om H_s uit te rekenen voor proeven waarbij s_{m0} ongeveer 0,040 was.

Relatie 4 tot en met 6 zijn in *Figuur zoc2* in een grafiek uitgezet.



Figuur zoc2 Relatie 4 tot en met 6

$s_{m0} = 0,035$

G30		G31		G20	
T_p	1,58 s	T_p	1,71 s	T_p	2,71 s
T_{m0}	1,29 s	T_{m0}	1,43 s	T_{m0}	2,07 s
H_{s0}	0,092 m	H_{s0}	0,113 m	H_{s0}	0,242 m
s_{m0}	0,035	s_{m0}	0,035	s_{m0}	0,036
T_m	1,31 s	T_m	1,5 s	T_m	2,22 s
H_s	0,093 m	H_s	0,122 m	H_s	0,26 m
s_m	0,035	s_m	0,035	s_m	0,034

relatie 7

H_{s0} (m)	H_s (m)
0	0
0,092	0,093
0,113	0,122
0,242	0,26

Relatie 7 is gebruikt om H_s uit te rekenen voor proeven waarbij s_{m0} ongeveer 0,035 was.

$s_{m0} = 0,030$

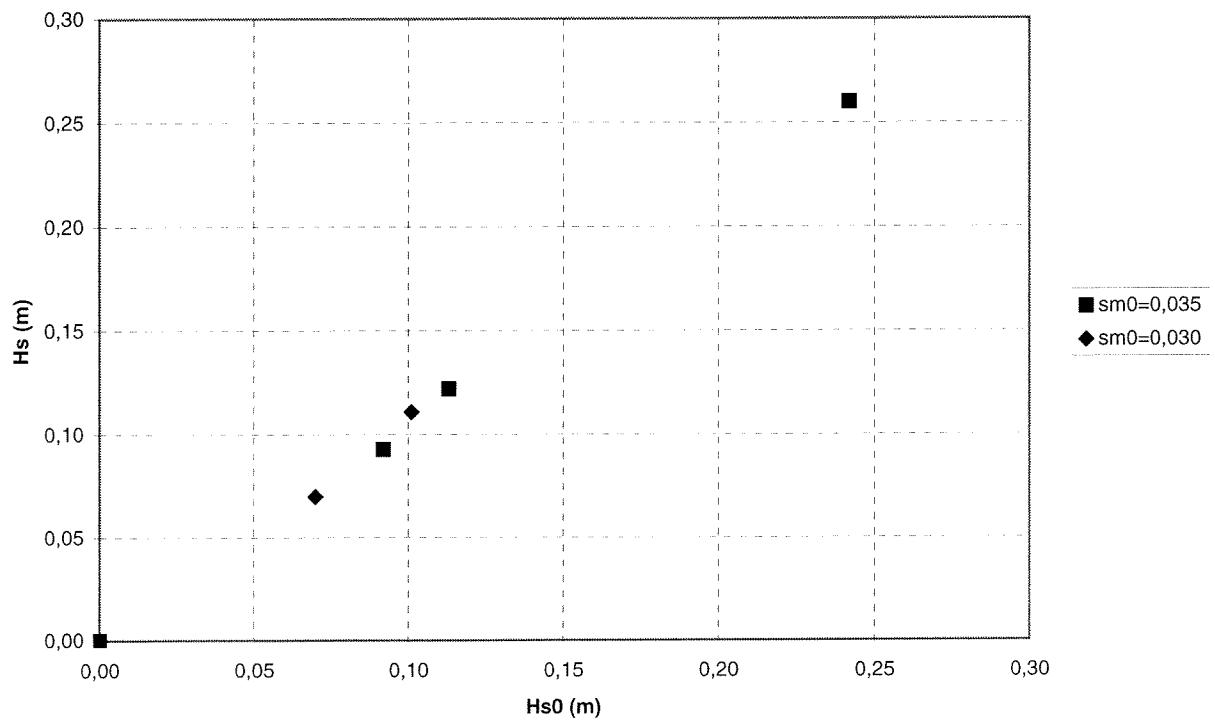
G29		G26	
T_p	1,4 s	T_p	1,7 s
T_{m0}	1,26 s	T_{m0}	1,43 s
H_{s0}	0,07 m	H_{s0}	0,101 m
s_{m0}	0,028	s_{m0}	0,032
T_m	1,29 s	T_m	1,52 s
H_s	0,07 m	H_s	0,111 m
s_m	0,027	s_m	0,031

relatie 8

H_{s0} (m)	H_s (m)
0	0
0,07	0,07
0,101	0,111

Relatie 8 is gebruikt om H_s uit te rekenen voor proeven waarbij s_{m0} ongeveer 0,030 was.

Relatie 7 en 8 zijn in *Figuur zoc3* in een grafiek uitgezet.



Figuur zoc3 Relatie 7 en 8

$s_{m0} = 0,018$

G36

T_p	1,76 s
T_{m0}	1,46 s
H_{s0}	0,061 m
s_{m0}	0,018
T_m	1,57 s
H_s	0,069 m
s_m	0,018

relatie 9

H_{s0} (m)	H_s (m)
0	0
0,061	0,069

Relatie 9 is gebruikt om H_s uit te rekenen voor proeven waarbij s_{m0} ongeveer 0,018 was.

$$s_{m0} = 0,017$$

G37

T_p	2,15 s
T_{m0}	1,73 s
H_{s0}	0,081 m
s_{m0}	0,017
T_m	1,93 s
H_s	0,098 m
s_m	0,017

G39

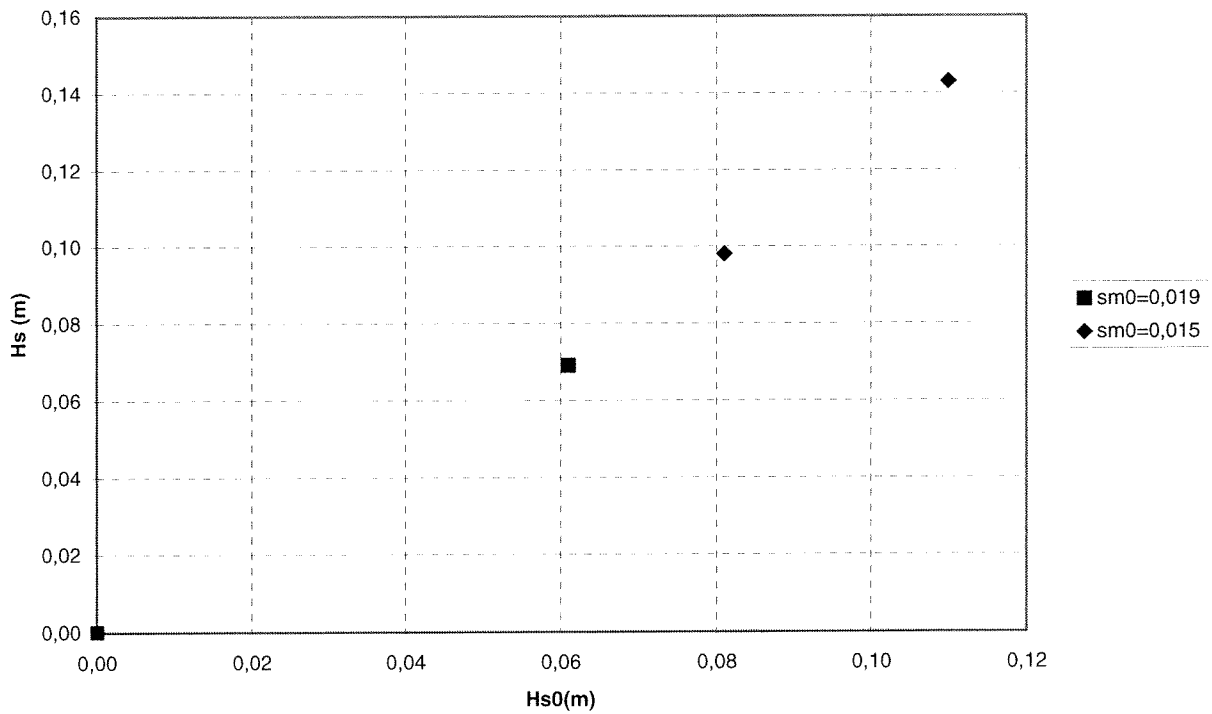
T_p	2,71 s
T_{m0}	2,11 s
H_{s0}	0,11 m
s_{m0}	0,016
T_m	2,26 s
H_s	0,143 m
s_m	0,018

relatie 10

H_{s0} (m)	H_s (m)
0	0
0,081	0,098
0,11	0,143

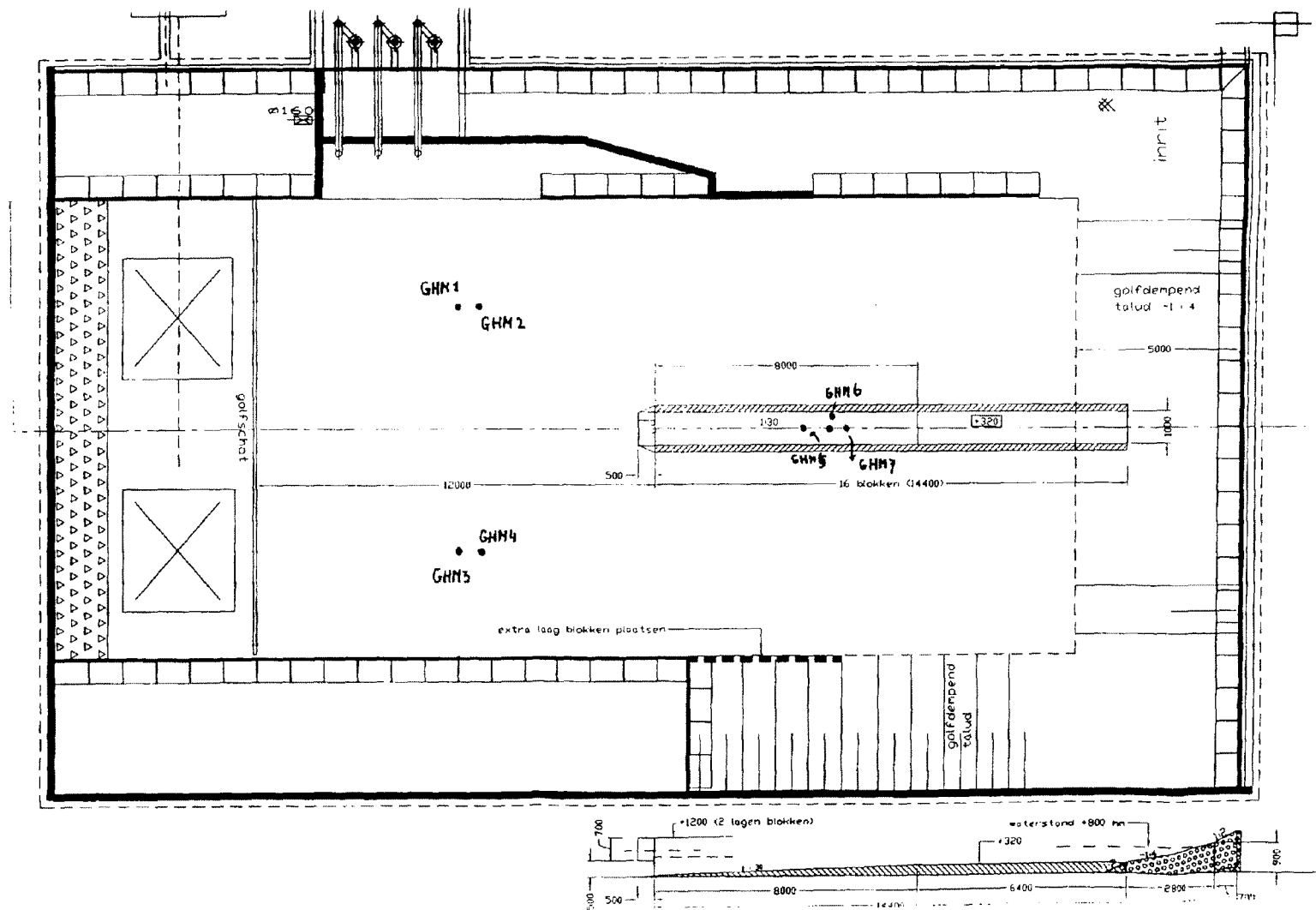
Relatie 10 is gebruikt om H_s uit te rekenen voor proeven waarbij s_{m0} ongeveer 0,017 was.

Relatie 9 en 10 zijn in *Figuur zoc4* in een grafiek uitgezet.

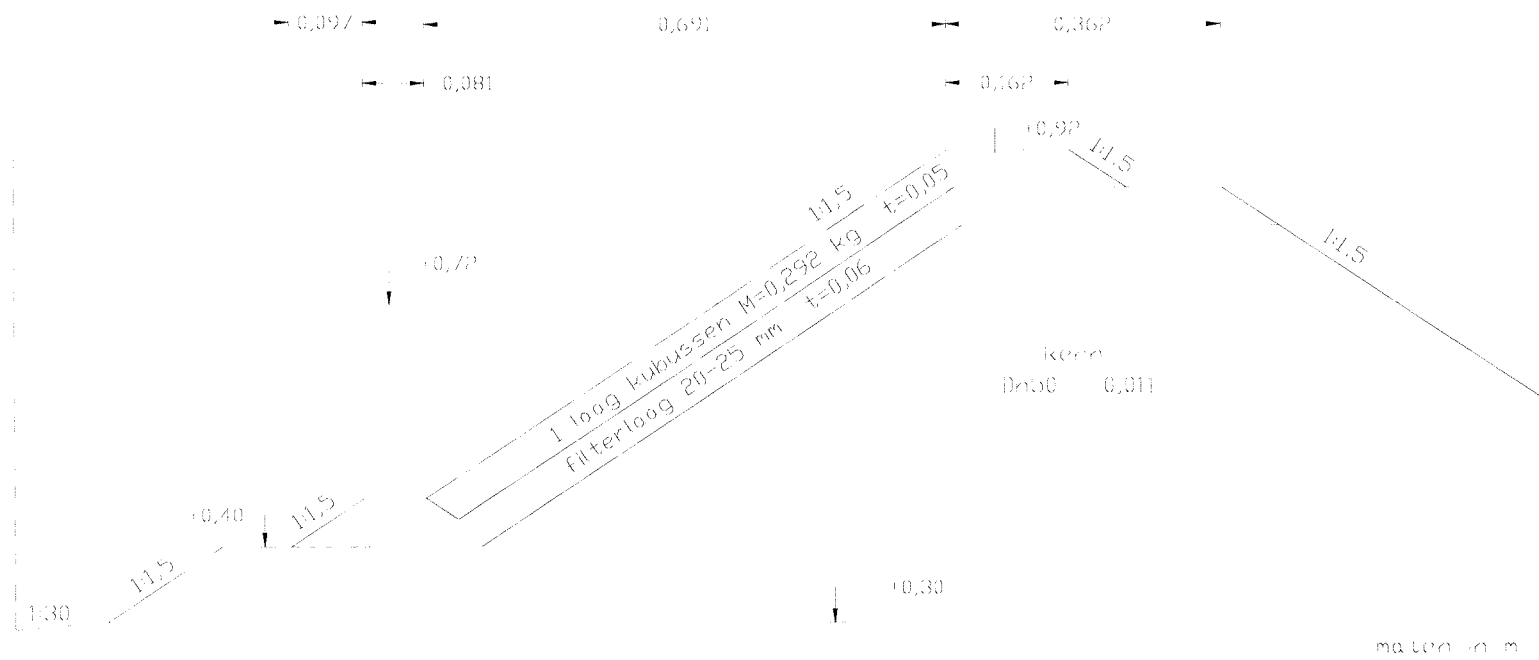


Figuur zoc4 Relatie 9 en 10

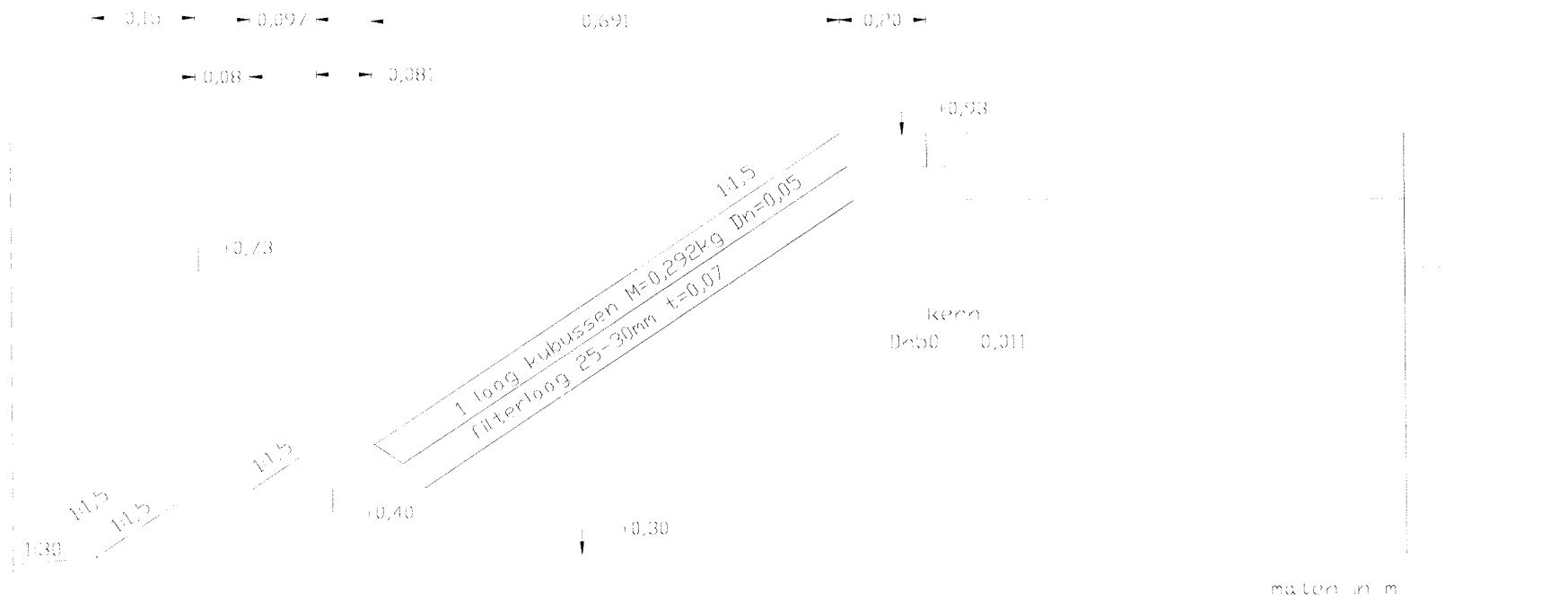
Figuren



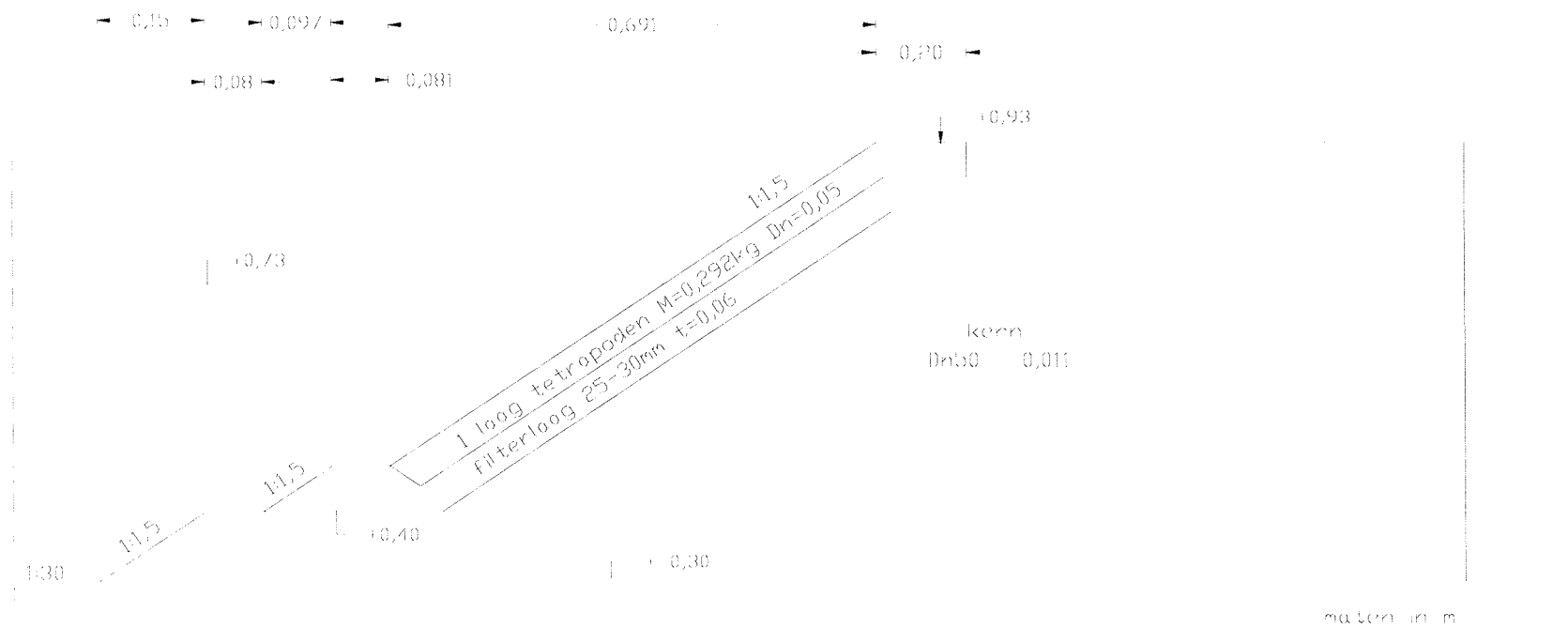
Figuur 1 Scheldebak



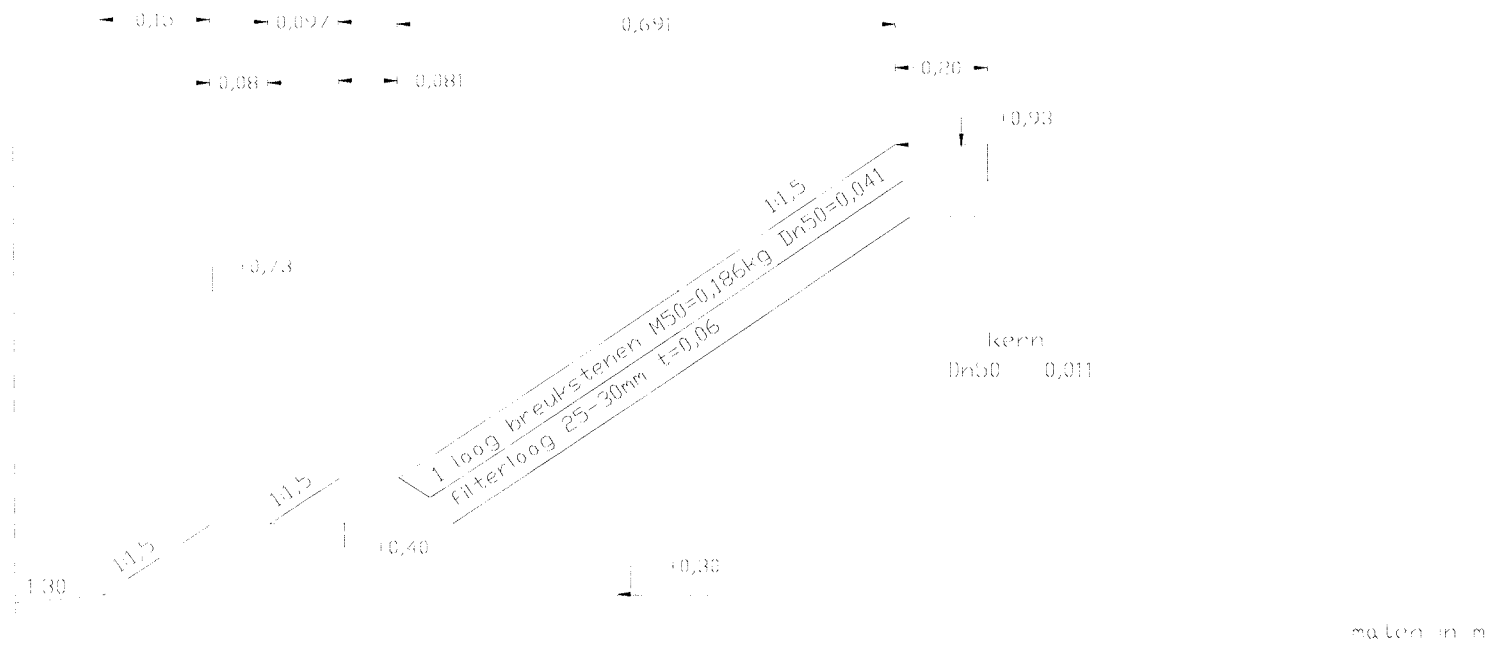
Figuur 2 Opzet model "kubussen" in een enkele toplaag (P02- P05)



Figuur 3 Opzet model "kubussen" in een enkele toplaag (P06 - P20)



Figuur 4 Opzet model "tetrapoden" in een enkele toplaag



Figuur 5 Opzet model "breukstenen" in een enkele toplaag

Tabellen

Tabel 1 Resultaten "kubussen" in een enkele toplaat

test	cot α	spec.	D_n (m)	Δ (-)	T_p (s)	T_{m0} (s)	H_{s0} (m)	s_{m0} (-)	s_{p0} (-)	$H_{s0}/\Delta D_n$ (-)	T_m (s)	H_s (m)	s_m (-)	ξ_m (-)	$H_s/\Delta D_n$ (-)	N_o (-)	N_{od} (-)
P02	1,5	PM	0,05	1,21	0,96	0,85	0,069	0,061	0,048	1,14	0,81	0,059	0,058	2,78	0,975	0	0,00
P03	1,5	PM	0,05	1,21	1,19	1,03	0,105	0,063	0,047	1,74	1,09	0,099	0,053	2,89	1,636	0	0,00
P04	1,5	PM	0,05	1,21	1,48	1,22	0,138	0,059	0,040	2,28	1,22	0,135	0,058	2,77	2,231	0	0,00
P05	1,5	PM	0,05	1,21	1,50	1,27	0,168	0,067	0,048	2,78	1,38	0,166	0,056	2,82	2,744	0	0,00
P06	1,5	PM	0,05	1,21	1,58	1,32	0,184	0,068	0,047	3,04	1,44	0,182	0,056	2,81	3,008	0	0,00
P07	1,5	PM	0,05	1,21	1,71	1,40	0,214	0,070	0,047	3,54	1,54	0,210	0,057	2,80	3,471	0	0,00
P08	1,5	PM	0,05	1,21	1,85	1,56	0,245	0,064	0,046	4,05	1,62	0,220	0,054	2,88	3,636	0	0,00
P09	1,5	PM	0,05	1,21	2,00	1,64	0,270	0,064	0,043	4,46	1,74	0,243	0,051	2,94	4,017	5	0,25
P01	1,5	PM	0,05	1,21	0,97	0,83	0,060	0,056	0,041	0,99	0,80	0,047	0,047	3,07	0,777	0	0,00
P10	1,5	PM	0,05	1,21	1,01	0,91	0,075	0,058	0,047	1,24	0,91	0,073	0,056	2,81	1,207	0	0,00
P11	1,5	PM	0,05	1,21	1,62	1,28	0,132	0,052	0,032	2,18	1,34	0,134	0,048	3,05	2,215	0	0,00
P13	1,5	PM	0,05	1,21	1,84	1,46	0,187	0,056	0,035	3,09	1,57	0,191	0,050	2,99	3,157	4	0,20
P14	1,5	PM	0,05	1,21	2,01	1,57	0,200	0,052	0,032	3,31	1,64	0,211	0,050	2,97	3,488	6	0,30
P15	1,5	PM	0,05	1,21	2,12	1,62	0,208	0,051	0,030	3,44	1,74	0,222	0,047	3,08	3,669	57	2,85
P16	1,5	PM	0,05	1,21	1,26	1,04	0,070	0,041	0,028	1,16	1,05	0,065	0,038	3,43	1,074	0	0,00
P17	1,5	PM	0,05	1,21	1,78	1,41	0,120	0,039	0,024	1,98	1,51	0,129	0,036	3,50	2,132	0	0,00
P18	1,5	PM	0,05	1,21	2,14	1,63	0,160	0,039	0,022	2,64	1,74	0,172	0,036	3,50	2,843	0	0,00
P19	1,5	PM	0,05	1,21	2,61	1,96	0,199	0,033	0,019	3,29	2,13	0,215	0,030	3,83	3,554	1	0,05
P20	1,5	PM	0,05	1,21	2,92	2,1	0,238	0,035	0,018	3,93	2,33	0,256	0,030	3,84	4,231	23	1,15

Elke proef is uitgevoerd met 1000 golven. De elementen hebben een dichtheid van 2210 kg/m³.

Tabel 2 Resultaten van “tetrapoden” in een enkele toplaag

test	cot α	spec.	D_n (m)	Δ (-)	T_p (s)	T_{m0} (s)	H_{s0} (m)	s_{m0} (-)	s_{p0} (-)	$H_{s0}/\Delta D_n$ (-)	T_m (s)	H_s (m)	s_m (-)	ξ_m (-)	$H_s/\Delta D_n$ (-)	N_o (-)	N_{od} (-)
P21	1,5	PM	0,05	1,32	1,15	0,96	0,077	0,053	0,037	1,17	0,98	0,075	0,050	2,98	1,14	0	0,00
P22	1,5	PM	0,05	1,32	1,34	1,13	0,112	0,056	0,040	1,70	1,18	0,110	0,051	2,96	1,67	0	0,00
P23	1,5	PM	0,05	1,32	1,39	1,20	0,117	0,052	0,039	1,77	1,26	0,114	0,046	3,11	1,73	1	0,05
P24	1,5	PM	0,05	1,32	1,59	1,28	0,134	0,052	0,034	2,03	1,34	0,135	0,048	3,04	2,05	14	0,70
P25	1,5	PM	0,05	1,32	1,37	1,16	0,082	0,039	0,028	1,24	1,23	0,077	0,033	3,69	1,17	0	0,00
P26	1,5	PM	0,05	1,32	1,76	1,44	0,100	0,031	0,021	1,52	1,55	0,110	0,029	3,89	1,67	14	0,70
P27	1,5	PM	0,05	1,32	2,52	1,86	0,068	0,013	0,007	1,03	2,05	0,082	0,012	5,96	1,24	0	0,00
P28	1,5	PM	0,05	1,32	2,92	2,07	0,096	0,014	0,007	1,45	2,29	0,140	0,017	5,10	2,12	30	1,50

Elke proef is uitgevoerd met 1000 golven. De elementen hebben een dichtheid van 2320 kg/m³.

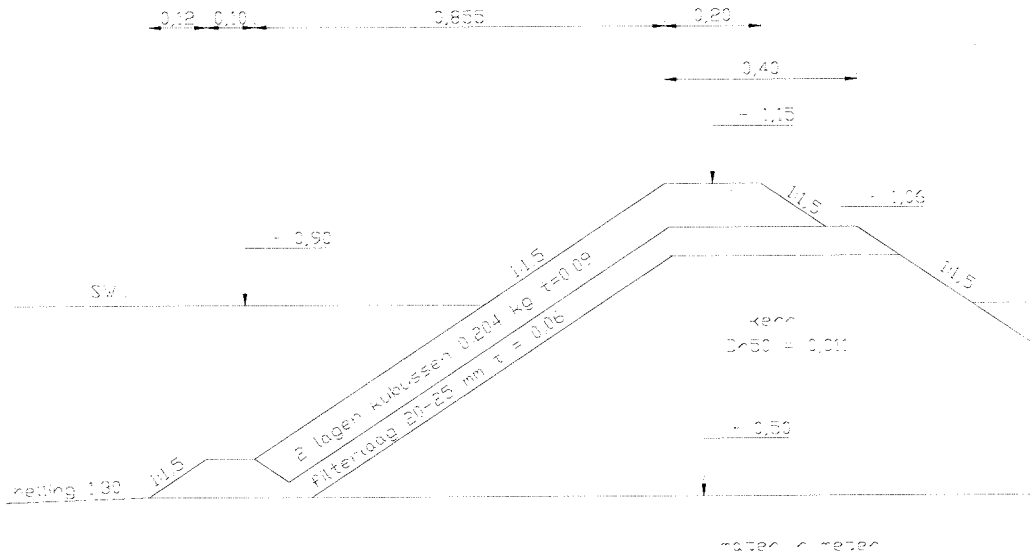
Tabel 3 Resultaten "breukstenen" in een enkele toplaag

test	cot α	spec.	D_n (m)	Δ (-)	T_p (s)	T_{m0} (s)	H_{s0} (m)	s_{m0} (-)	s_{p0} (-)	$H_{s0}/\Delta D_n$ (-)	T_m (s)	H_s (m)	s_m (-)	ξ_m (-)	$H_s/\Delta D_n$ (-)	N_o (-)	N_{od} (-)
P29	1,5	PM	0,0406	1,62	1,50	1,24	0,071	0,029	0,020	1,07	1,28	0,071	0,028	4,00	1,08	0	0,00
P30	1,5	PM	0,0406	1,62	1,60	1,26	0,088	0,035	0,022	1,34	1,33	0,089	0,032	3,71	1,35	1	0,04
P31	1,5	PM	0,0406	1,62	1,79	1,42	0,109	0,035	0,022	1,66	1,51	0,118	0,033	3,66	1,79	34	1,38
P32	1,5	PM	0,0406	1,62	0,98	0,84	0,060	0,054	0,040	0,91	0,86	0,055	0,048	3,06	0,84	0	0,00
P33	1,5	PM	0,0406	1,62	1,14	0,98	0,085	0,057	0,042	1,29	1,01	0,080	0,050	2,98	1,22	2	0,08
P34	1,5	PM	0,0406	1,62	1,21	1,03	0,096	0,058	0,042	1,46	1,06	0,091	0,052	2,93	1,38	2	0,08
P35	1,5	PM	0,0406	1,62	1,26	1,13	0,105	0,053	0,042	1,60	1,16	0,107	0,051	2,95	1,63	9	0,37
P36	1,5	PM	0,0406	1,62	1,80	1,44	0,059	0,018	0,012	0,89	1,56	0,066	0,017	5,06	1,00	0	0,00
P37	1,5	PM	0,0406	1,62	2,30	1,73	0,078	0,017	0,009	1,19	1,88	0,094	0,017	5,11	1,43	0	0,00
P38	1,5	PM	0,0406	1,62	2,72	2,01	0,098	0,015	0,008	1,48	2,22	0,121	0,016	5,32	1,84	6	0,24
P39	1,5	PM	0,0406	1,62	2,91	2,12	0,108	0,015	0,008	1,64	2,35	0,140	0,016	5,23	2,13	86	3,50

Elke proef is uitgevoerd met 1000 golven. De elementen hebben een dichtheid van 2615 kg/m³.

Bijlagen

I Kubussen in een dubbele toplaag



Figuur I.1 Modelopzet "breukstenen" in een dubbele toplaag

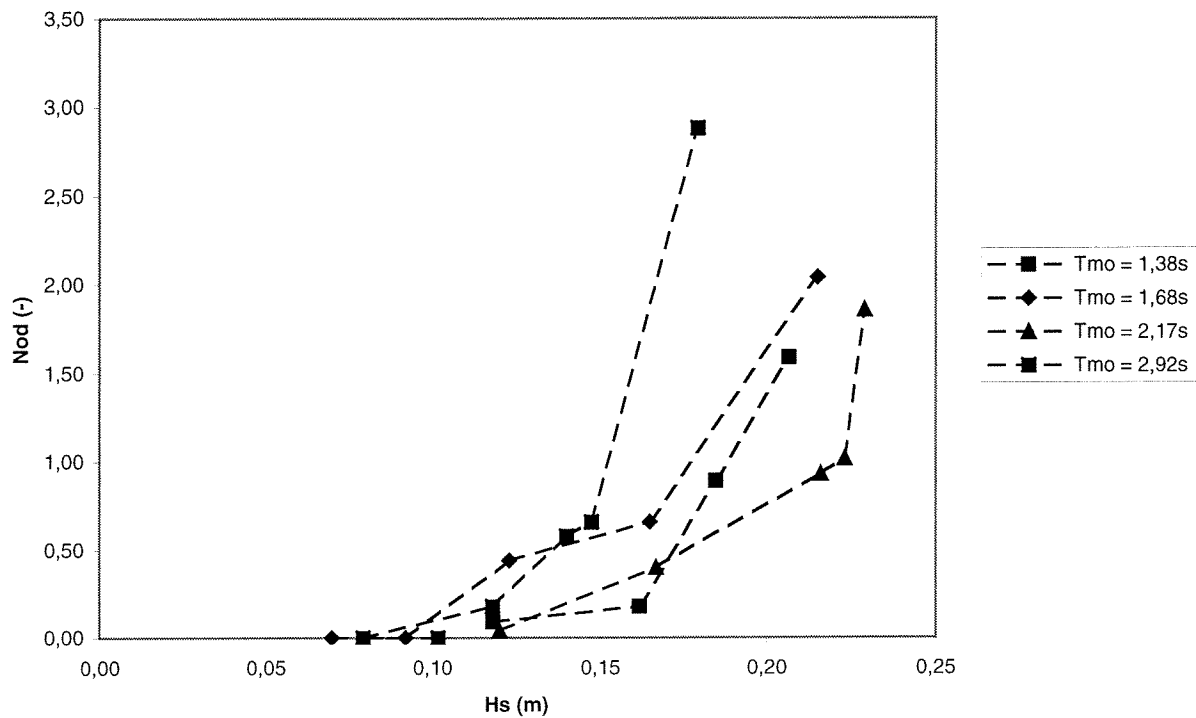
I.1 Modelproeven op kubussen in een dubbele toplaag

Het model dat door Van der Meer [1986] gebruikt is, is te vinden in *Figuur I.1*. De resultaten van de proeven voor 1000 proeven staan in *Tabel I.1*. Dit model is ook met 3000 golven beproefd. Deze resultaten zijn niet in dit rapport opgenomen.

Tabel I.1 Resultaten bij 1000 golven, gesorteerd op T_{m0} en H_{s0}

test	cot α (-)	spec.	D_n (-)	Δ (-)	H_{s0} (m)	H_s (m)	T_{m0} (s)	T_p (s)	ξ_{z0} (-)	ξ_p (-)	$H_s/\Delta D_n$ (-)	s_{m0} (-)	N_{od} (-)
15	1,5	PM	0,0443	1,34	0,118	0,111	1,33	1,46	3,22	3,65	1,87	0,043	0,09
14	1,5	PM	0,0443	1,34	0,162	0,148	1,37	1,48	2,84	3,21	2,49	0,055	0,18
12	1,5	PM	0,0443	1,34	0,185	0,168	1,42	1,53	2,75	3,11	2,83	0,059	0,89
13	1,5	PM	0,0443	1,34	0,207	0,180	1,43	1,56	2,62	3,06	3,03	0,065	1,59
5	1,5	PM	0,0443	1,34	0,067	0,070	1,66	1,98	5,34	6,24	1,18	0,016	0,00
23	1,5	PM	0,0443	1,34	0,116	0,123	1,66	2,00	4,06	4,75	2,07	0,027	0,00
24	1,5	PM	0,0443	1,34	0,087	0,092	1,66	1,98	4,69	5,44	1,55	0,020	0,00
1	1,5	PM	0,0443	1,34	0,102	0,107	1,67	2,00	4,36	5,09	1,80	0,023	0,49
2	1,5	PM	0,0443	1,34	0,115	0,123	1,67	2,00	4,10	4,75	2,07	0,026	0,44
3	1,5	PM	0,0443	1,34	0,152	0,165	1,68	2,02	3,59	4,14	2,78	0,035	0,66
4	1,5	PM	0,0443	1,34	0,182	0,187	1,69	2,04	3,31	3,93	3,15	0,041	0,66
6	1,5	PM	0,0443	1,34	0,231	0,215	1,73	1,96	3,00	3,52	3,62	0,049	2,04
16	1,5	PM	0,0443	1,34	0,103	0,120	2,15	2,60	5,57	6,25	2,02	0,014	0,04
8	1,5	PM	0,0443	1,34	0,140	0,167	2,16	2,56	4,82	5,22	2,81	0,019	0,40
7	1,5	PM	0,0443	1,34	0,165	0,196	2,17	2,60	4,45	4,89	3,30	0,022	1,55
10	1,5	PM	0,0443	1,34	0,184	0,216	2,17	2,56	4,22	4,59	3,64	0,025	0,93
11	1,5	PM	0,0443	1,34	0,193	0,223	2,17	2,60	4,12	4,59	3,76	0,026	1,02
9	1,5	PM	0,0443	1,34	0,198	0,229	2,18	2,60	4,08	4,53	3,86	0,027	1,86
22	1,5	PM	0,0443	1,34	0,102	0,130	2,94	3,64	7,69	8,41	2,19	0,008	0,00
19	1,5	PM	0,0443	1,34	0,079	0,094	3,00	3,64	8,88	9,89	1,58	0,006	0,00
18	1,5	PM	0,0443	1,34	0,118	0,154	2,93	3,64	7,11	7,73	2,59	0,009	0,18
21	1,5	PM	0,0443	1,34	0,140	0,187	2,90	3,64	6,46	7,01	3,15	0,011	0,58
17	1,5	PM	0,0443	1,34	0,147	0,196	2,90	3,70	6,29	6,96	3,30	0,011	0,66
20	1,5	PM	0,0443	1,34	0,180	0,233	2,86	3,64	5,62	6,28	3,93	0,014	2,88

De golfhoogten bij de constructie zijn bepaald door alle proeven over te doen zonder constructie en de golfhoogten te meten op het punt waar oorspronkelijk de teen van de constructie stond. In *Figuur I.2* zijn de resultaten in een grafiek uitgezet.



Figuur I.2 Resultaten van modelproeven op kubussen in een dubbele toplaag bij 1000 golven

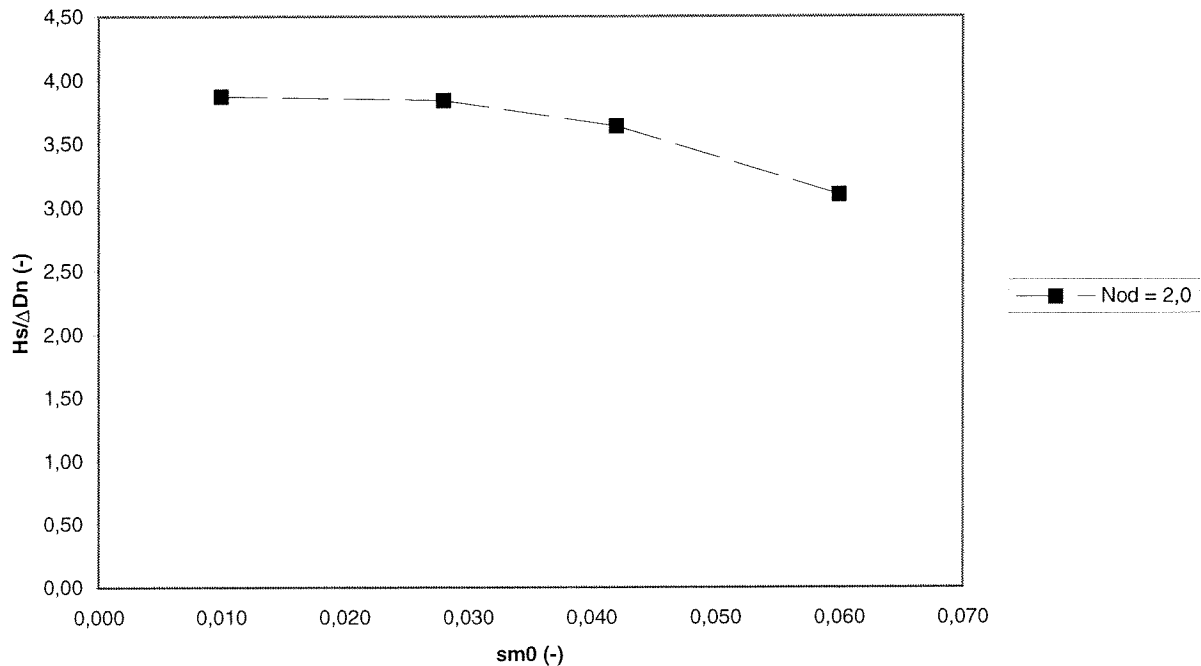
I.2 De resultaten gesorteerd op golfsteilheid

De resultaten van de proeven zijn in Tabel I.2 gesorteerd op golfsteilheid en daarna op schade zodat schadekrommen konden worden bepaald die afhankelijk zijn van de golfsteilheid.

Tabel I.2 Resultaten van Van der Meer gesorteerd op s_{m0} en N_{od}

test	cot α	spec.	D_n (m)	Δ (-)	H_{s0} (m)	H_s (m)	T_m (s)	T_p (s)	ξ_m (-)	ξ_p (-)	$H_s/\Delta D_n$ (-)	s_{m0} (-)	N_{od} (-)
19	1,5	PM	0,0443	1,34	0,079	0,094	3,00	3,64	8,15	9,89	1,58	0,006	0,00
22	1,5	PM	0,0443	1,34	0,102	0,130	2,94	3,64	6,79	8,41	2,19	0,008	0,00
18	1,5	PM	0,0443	1,34	0,118	0,154	2,93	3,64	6,22	7,73	2,59	0,009	0,18
21	1,5	PM	0,0443	1,34	0,140	0,187	2,90	3,64	5,59	7,01	3,15	0,011	0,58
17	1,5	PM	0,0443	1,34	0,147	0,196	2,90	3,70	5,46	6,96	3,30	0,011	0,66
20	1,5	PM	0,0443	1,34	0,180	0,233	2,86	3,64	4,94	6,28	3,93	0,014	2,88
24	1,5	PM	0,0443	1,34	0,087	0,092	1,66	1,98	4,56	5,44	1,55	0,020	0,00
3	1,5	PM	0,0443	1,34	0,152	0,165	1,68	2,02	3,45	4,14	2,78	0,035	0,66
7	1,5	PM	0,0443	1,34	0,165	0,196	2,17	2,60	4,08	4,89	3,30	0,022	1,55
9	1,5	PM	0,0443	1,34	0,198	0,229	2,2	2,6	3,8	4,53	3,86	0,03	1,86
15	1,5	PM	0,0443	1,34	0,118	0,111	1,33	1,46	3,33	3,65	1,87	0,043	0,09
4	1,5	PM	0,0443	1,34	0,182	0,187	1,69	2,04	3,26	3,93	3,15	0,041	0,66
14	1,5	PM	0,0443	1,34	0,162	0,148	1,4	1,5	2,97	3,21	2,49	0,06	0,18
12	1,5	PM	0,0443	1,34	0,185	0,168	1,42	1,53	2,89	3,11	2,83	0,059	0,89
13	1,5	PM	0,0443	1,34	0,207	0,180	1,43	1,56	2,81	3,06	3,03	0,065	1,59

De resultaten zijn te zien in Figuur I.3. De waarden voor $N_{od} = 2,0$ zijn geëxtrapolerd.



Figuur 1.3 De invloed van de golfsteilheid bij $N_{od} = 2$ en 1000 golven

1.3 Berekening van de resultaten zonder herstel van het profiel

De proeven van *Van der Meer* [1986] zijn, in tegenstelling tot de proeven met een enkele toplaag, gedaan met herstel van het profiel na iedere golfhoogte. Omdat een vergelijking tussen deze proeven een ietwat vertekend beeld geeft, zijn de 'resultaten' opnieuw berekend met behulp van de volgende formule, die door Van der Meer is afgeleid na de modelproeven op kubussen in een dubbele toplaag.

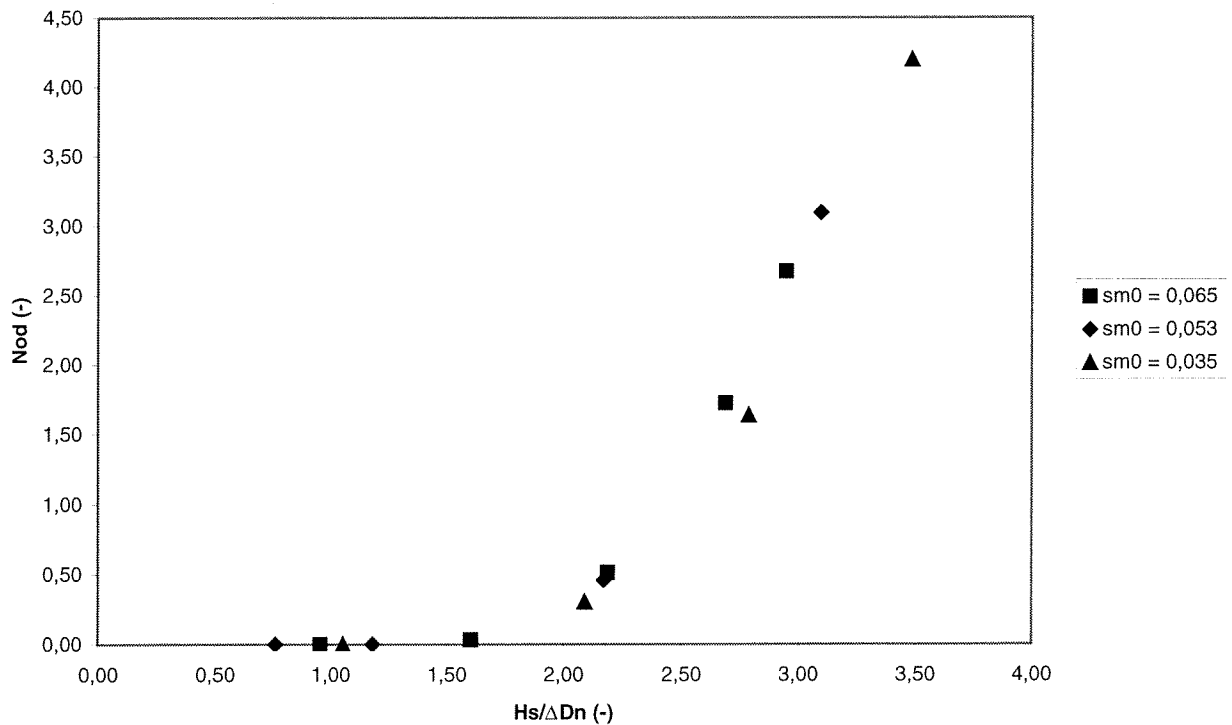
$$\frac{H_s}{\Delta D_n} = \left(6,7 \frac{N_{od}^{0,4}}{N^{0,3}} + 1,0 \right) s_{m0}^{-0,1}$$

Deze formule is gebaseerd op 'herstel van het profiel na ieder proef'. Door de volgende regels toe te passen, kunnen de resultaten naar 'geen herstel van het profiel' worden 'vertaald'. De eerste proef wordt gesimuleerd. Met de schade van deze proef wordt met de testgegevens van de volgende proef het aantal golven bepaald dat nodig zou zijn voor deze schade. Dit aantal golven vermeerderd met het aantal golven dat is toegepast levert het aantal golven waarmee de schade van de tweede proef wordt bepaald. De volgende resultaten zijn berekend *Tabel 1.3*:

Tabel I.3 Berekende resultaten "kubussen" in een dubbele toplaag

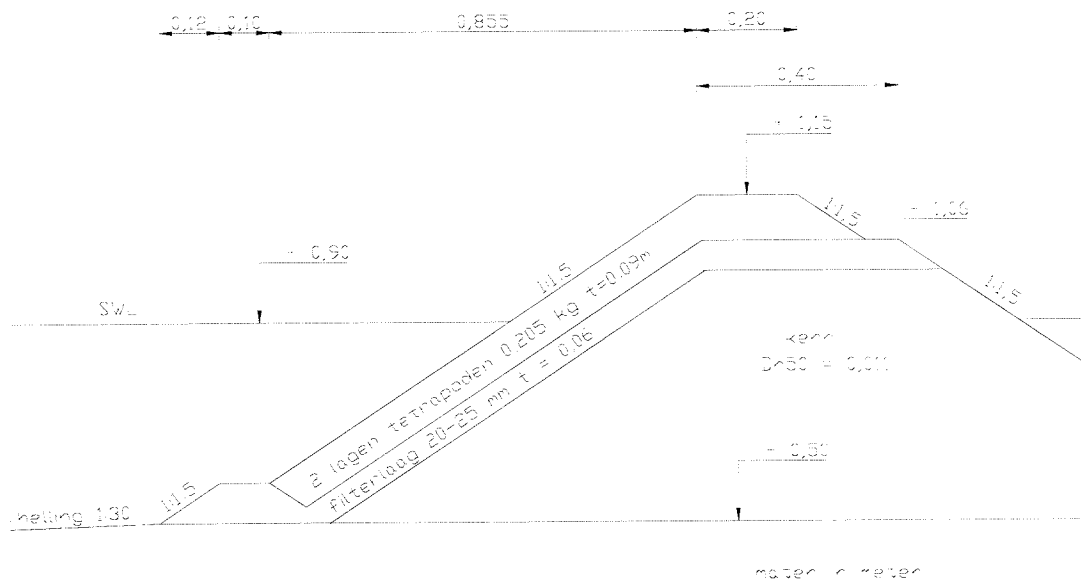
D_n (m)	\square (-)	T_p (s)	T_{m0} (s)	H_{s0} (m)	s_{m0} (-)	s_{p0} (-)	$H_{s0}/\square D_n$ (-)	T_m (s)	H_s (m)	s_m (-)	\square_m	$H_s/\square D_n$ (-)	N_{od} (-)
0,051	1,21	0,96	0,85	0,069	0,061	0,048	1,12	0,85	0,059	0,052	2,92	0,956	0,00
0,051	1,21	1,19	1,03	0,105	0,063	0,047	1,70	1,03	0,099	0,060	2,73	1,604	0,03
0,051	1,21	1,48	1,22	0,138	0,059	0,040	2,24	1,22	0,135	0,058	2,77	2,188	0,51
0,051	1,21	1,50	1,27	0,168	0,067	0,048	2,72	1,27	0,166	0,066	2,60	2,690	1,73
0,051	1,21	1,58	1,32	0,184	0,068	0,047	2,98	1,32	0,182	0,067	2,58	2,949	2,68
0,051	1,21	0,97	0,83	0,060	0,056	0,041	0,97	0,83	0,047	0,044	3,19	0,762	0,00
0,051	1,21	1,01	0,91	0,075	0,058	0,047	1,22	0,91	0,073	0,056	2,81	1,183	0,00
0,051	1,21	1,62	1,28	0,132	0,052	0,032	2,14	1,28	0,134	0,052	2,91	2,171	0,46
0,051	1,21	1,84	1,46	0,187	0,056	0,035	3,03	1,46	0,191	0,057	2,78	3,095	3,10
0,051	1,21	1,26	1,04	0,070	0,041	0,028	1,13	1,04	0,065	0,038	3,40	1,053	0,00
0,051	1,21	1,78	1,41	0,120	0,039	0,024	1,94	1,41	0,129	0,042	3,27	2,090	0,30
0,051	1,21	2,14	1,63	0,160	0,039	0,022	2,59	1,63	0,172	0,041	3,27	2,787	1,64
0,051	1,21	2,61	1,96	0,199	0,033	0,019	3,22	1,96	0,215	0,036	3,52	3,484	4,20
0,051	1,21	2,92	2,1	0,238	0,035	0,018	3,86	2,1	0,256	0,037	3,46	4,148	8,49

Het schadeverloop is te vinden in *Figuur I.4*.



Figuur I.4 Schadeverloop "kubussen" in een dubbele toplaag zonder tussentijds herstel

II Tetrapoden in een dubbele toplaag



Figuur II.1 Modelopzet "tetrapoden" in een dubbele toplaag

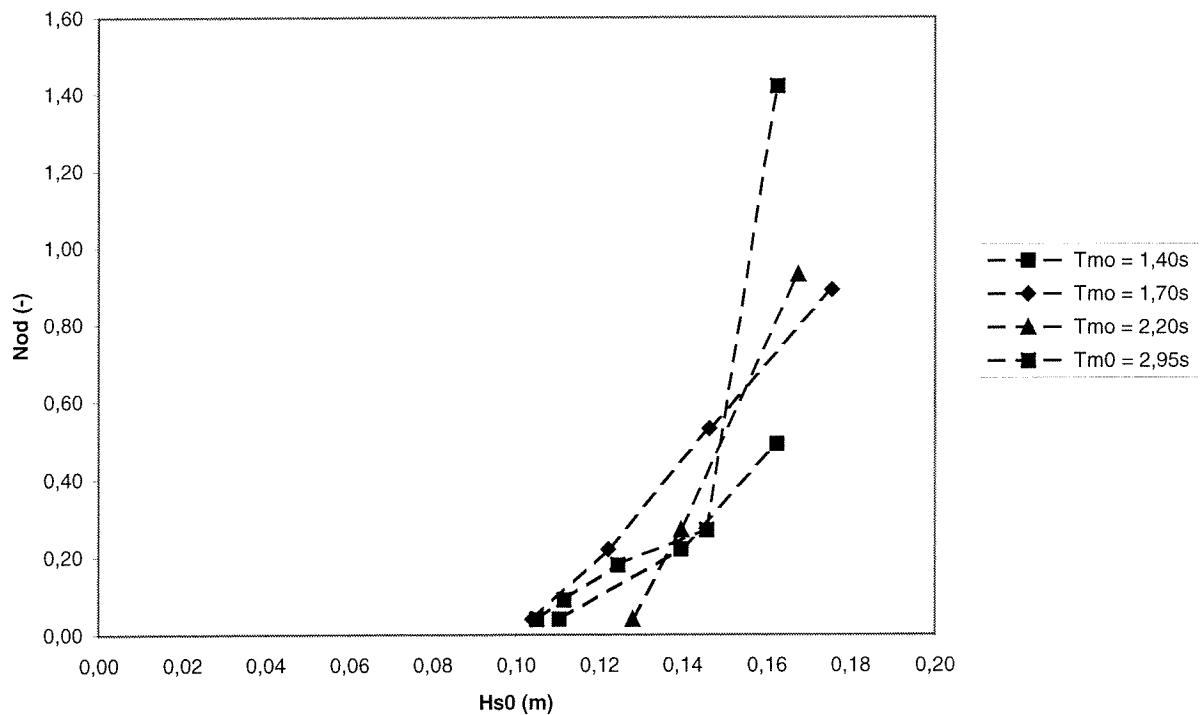
II.1 Modelproeven op tetrapoden in een dubbele toplaag

Het model dat door Van der Meer [1987a] gebruikt is, is te vinden in *Figuur II.1*. De resultaten van de proeven voor 1000 golven staan in *Tabel II.1*.

Tabel II.1 Resultaten bij 1000 golven, gesorteerd op T_{m0} en H_{s0}

test	cot α (-)	spec.	D_n (-)	Δ (-)	H_{s0} (m)	H_s (m)	T_{m0} (s)	T_p (s)	ξ_z (-)	ξ_p (-)	$H_s/\Delta D_n$ (-)	s_{m0} (-)	N_{od} (-)
14	1,5	PM	0,0443	1,36	0,111	0,106	1,34	1,50	3,43	3,84	1,76	0,039	0,04
10	1,5	PM	0,0443	1,36	0,140	0,130	1,35	1,49	3,12	3,44	2,16	0,049	0,22
13	1,5	PM	0,0443	1,36	0,163	0,148	1,37	1,49	2,97	3,23	2,46	0,055	0,49
11	1,5	PM	0,0443	1,36	0,178	0,160	1,40	1,50	2,92	3,12	2,66	0,058	0,13
12	1,5	PM	0,0443	1,36	0,210	0,183	1,45	1,53	2,82	2,98	3,04	0,064	0,53
8	1,5	PM	0,0443	1,36	0,104	0,110	1,68	1,96	4,22	4,92	1,83	0,024	0,04
7	1,5	PM	0,0443	1,36	0,122	0,128	1,69	2,00	3,94	4,66	2,12	0,027	0,22
6	1,5	PM	0,0443	1,36	0,146	0,156	1,70	1,98	3,59	4,18	2,59	0,032	0,53
9	1,5	PM	0,0443	1,36	0,176	0,182	1,72	1,98	3,36	3,87	3,02	0,038	0,89
3	1,5	PM	0,0443	1,36	0,117	0,140	2,19	2,56	4,88	5,70	2,32	0,016	0,04
4	1,5	PM	0,0443	1,36	0,128	0,154	2,19	2,56	4,65	5,44	2,56	0,017	0,04
2	1,5	PM	0,0443	1,36	0,140	0,169	2,21	2,60	4,48	5,27	2,81	0,018	0,27
5	1,5	PM	0,0443	1,36	0,154	0,186	2,20	2,56	4,25	4,95	3,09	0,020	0,84
1	1,5	PM	0,0443	1,36	0,168	0,200	2,19	2,53	4,08	4,71	3,32	0,022	0,93
18	1,5	PM	0,0443	1,36	0,105	0,132	2,99	3,51	6,86	8,05	2,19	0,008	0,04
17	1,5	PM	0,0443	1,36	0,112	0,145	2,99	3,51	6,54	7,68	2,41	0,008	0,09
15	1,5	PM	0,0443	1,36	0,125	0,163	2,98	3,51	6,15	7,24	2,71	0,009	0,18
16	1,5	PM	0,0443	1,36	0,146	0,193	2,91	3,51	5,52	6,66	3,20	0,011	0,27
19	1,5	PM	0,0443	1,36	0,162	0,213	2,90	3,51	5,24	6,34	3,54	0,012	1,42

De golfhoogten bij de constructie zijn bepaald door alle proeven over te doen zonder constructie en de golfhoogten te meten op het punt waar oorspronkelijk de teen van de constructie stond. In *Figuur II.2* zijn de resultaten in een grafiek uitgezet.



Figuur II.2 Resultaten van modelproeven op tetrapoden in een dubbele toplaag voor 1000 golven

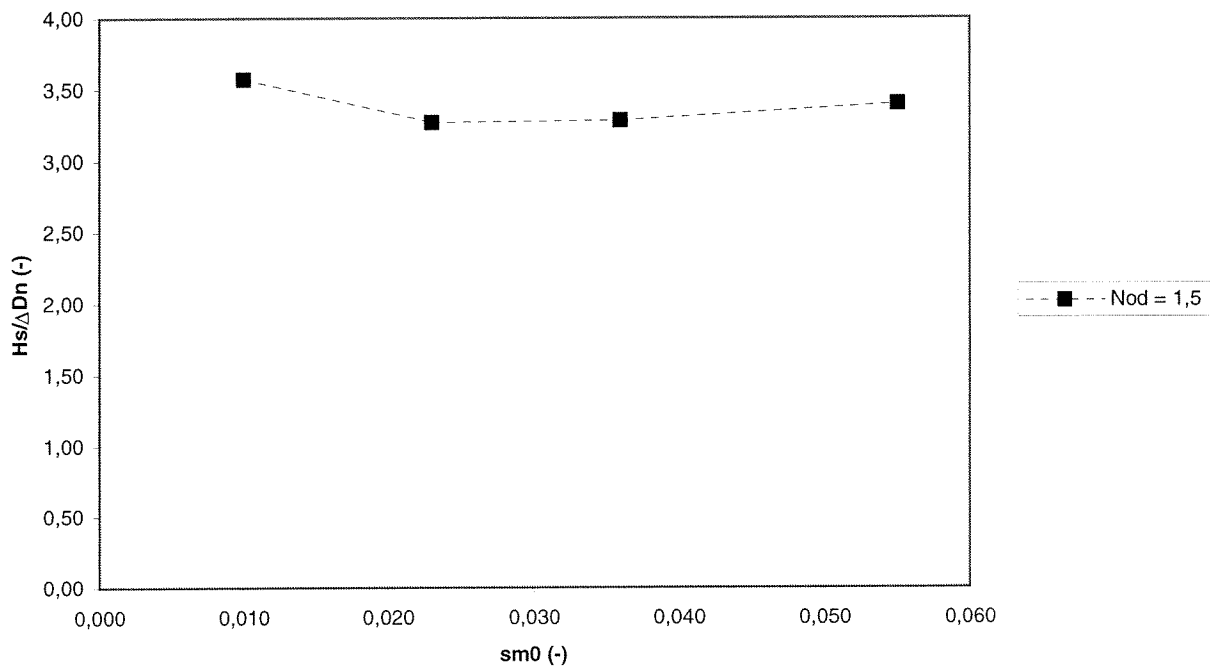
II.2 De resultaten gesorteerd op golfsteilheid

De resultaten van de proeven zijn in *Tabel II.2* gesorteerd op golfsteilheid en daarna op schade zodat schadekrommen konden worden bepaald die afhankelijk zijn van de golfsteilheid.

Tabel II.2 Resultaten van Van der Meer gesorteerd op s_{m0} en N_{od}

test	cot α	spec.	D_n (m)	Δ (-)	H_{s0} (m)	H_s (m)	T_m (s)	T_p (s)	ξ_m (-)	ξ_p (-)	$H_s/\Delta D_n$ (-)	s_{m0} (-)	N_{od} (-)
18	1,5	PM	0,0443	1,36	0,105	0,132	2,99	3,51	6,86	8,05	2,19	0,008	0,04
17	1,5	PM	0,0443	1,36	0,112	0,145	2,99	3,51	6,54	7,68	2,41	0,008	0,09
15	1,5	PM	0,0443	1,36	0,125	0,163	2,98	3,51	6,15	7,24	2,71	0,009	0,18
16	1,5	PM	0,0443	1,36	0,146	0,193	2,91	3,51	5,52	6,66	3,20	0,011	0,27
19	1,5	PM	0,0443	1,36	0,162	0,213	2,90	3,51	5,24	6,34	3,54	0,012	1,42
8	1,5	PM	0,0443	1,36	0,104	0,110	1,68	1,96	4,22	4,92	1,83	0,024	0,04
7	1,5	PM	0,0443	1,36	0,122	0,128	1,69	2,00	3,94	4,66	2,12	0,027	0,22
2	1,5	PM	0,0443	1,36	0,140	0,169	2,21	2,60	4,48	5,27	2,81	0,018	0,27
5	1,5	PM	0,0443	1,36	0,154	0,186	2,20	2,56	4,25	4,95	3,09	0,020	0,84
1	1,5	PM	0,0443	1,36	0,168	0,200	2,19	2,53	4,08	4,71	3,32	0,022	0,93
14	1,5	PM	0,0443	1,36	0,111	0,106	1,34	1,50	3,43	3,84	1,76	0,039	0,04
6	1,5	PM	0,0443	1,36	0,146	0,156	1,70	1,98	3,59	4,18	2,59	0,032	0,53
9	1,5	PM	0,0443	1,36	0,176	0,182	1,72	1,98	3,36	3,87	3,02	0,038	0,89
10	1,5	PM	0,0443	1,36	0,140	0,130	1,35	1,49	3,12	3,44	2,16	0,049	0,22
13	1,5	PM	0,0443	1,36	0,163	0,148	1,37	1,49	2,97	3,23	2,46	0,055	0,49
12	1,5	PM	0,0443	1,36	0,210	0,183	1,45	1,53	2,82	2,98	3,04	0,064	0,53

In *Figuur II.3* zijn de resultaten in een grafiek uitgezet. De meeste waarden voor $N_{od} = 1,5$ zijn geëxtrapoleerd.



Figuur II.3 De invloed van de golfsteilheid bij $N_{od}=1,5$

II.3 Berekening van de resultaten zonder herstel van het profiel

De proeven van *Van der Meer* [1987a] zijn, in tegenstelling tot de proeven met een enkele toplaag, gedaan met herstel van het profiel na iedere golfhoogte. Omdat een vergelijking tussen deze proeven een ietwat vertekend beeld geeft, zijn de 'resultaten' opnieuw berekend met behulp van de volgende formule, die door *Van der Meer* is afgeleid na de modelproeven op tetrapoden in een dubbele toplaag.

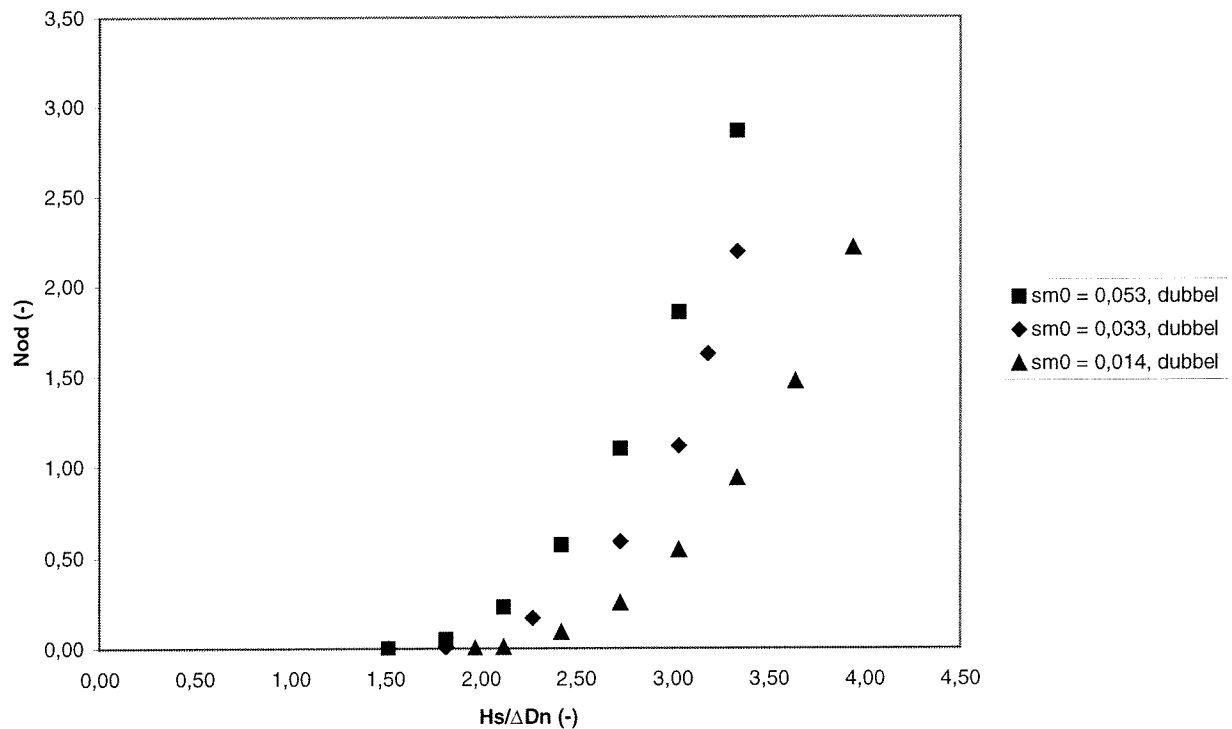
$$\frac{H_s}{\Delta D_n} = \left(3,75 \frac{N_{od}^{0,5}}{N^{0,25}} + 0,85 \right) s_{mo}^{-0,2}$$

Deze formule is gebaseerd op 'herstel van het profiel na ieder proef'. Door de volgende regels toe te passen, kunnen de resultaten naar 'geen herstel van het profiel' worden 'vertaald'. De eerste proef wordt gesimuleerd. Met de schade van deze proef wordt met de testgegevens van de volgende proef het aantal golven bepaald dat nodig zou zijn voor deze schade. Dit aantal golven vermeerderd met het aantal golven dat is toegepast levert het aantal golven waarmee de schade van de tweede proef wordt bepaald. De volgende resultaten zijn berekend:

Tabel II.3 Berekende resultaten "tetrapoden" in een dubbele toplaag

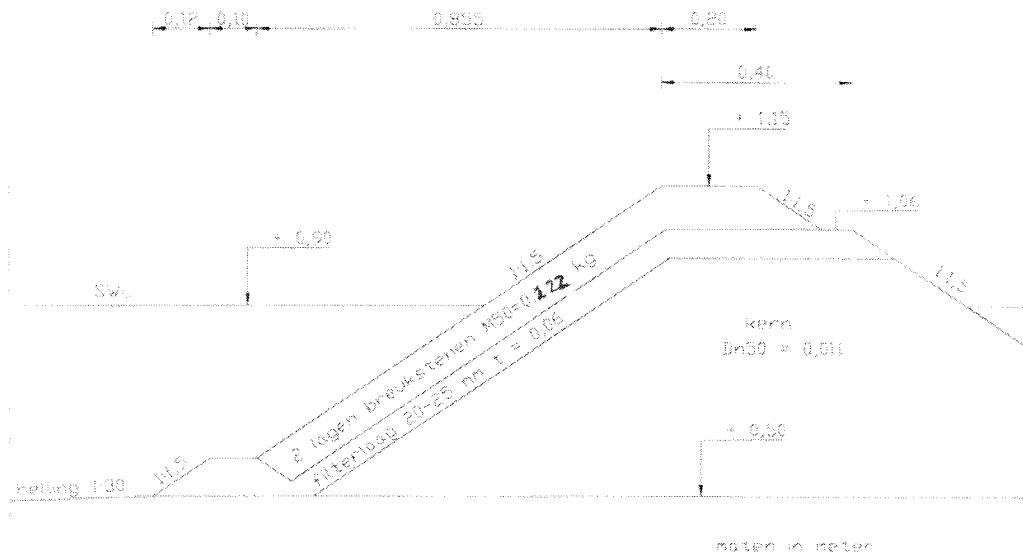
D_n (m)	\square (-)	T_p (s)	T_{m0} (s)	H_{s0} (m)	s_{m0} (-)	s_{p0} (-)	$H_{s0}/\Delta D_n$ (-)	T_m (s)	H_s (m)	s_m (-)	\square_m	$H_s/\Delta D_n$ (-)	N_{od} (-)
0,05	1,32	1,35	1,130	0,106	0,053	0,037	1,60	1,130	0,100	0,050	2,98	1,52	0,00
0,05	1,32	1,48	1,240	0,127	0,053	0,037	1,93	1,240	0,120	0,050	2,98	1,82	0,05
0,05	1,32	1,60	1,340	0,149	0,053	0,037	2,25	1,340	0,140	0,050	2,98	2,12	0,22
0,05	1,32	1,71	1,430	0,169	0,053	0,037	2,57	1,430	0,160	0,050	2,98	2,42	0,52
0,05	1,32	1,82	1,520	0,191	0,053	0,037	2,90	1,520	0,180	0,050	2,99	2,73	0,94
0,05	1,32	1,91	1,600	0,212	0,053	0,037	3,21	1,600	0,200	0,050	2,98	3,03	1,49
0,05	1,32	2,00	1,670	0,231	0,053	0,037	3,50	1,670	0,220	0,050	2,97	3,33	2,18
0,05	1,32	1,85	1,54	0,122	0,033	0,023	1,85	1,45	0,100	0,030	3,82	1,52	0,00
0,05	1,32	1,92	1,60	0,132	0,033	0,023	2,00	1,60	0,120	0,030	3,85	1,82	0,01
0,05	1,32	2,16	1,80	0,167	0,033	0,023	2,53	1,80	0,150	0,030	3,87	2,27	0,17
0,05	1,32	2,37	1,97	0,200	0,033	0,023	3,03	1,97	0,180	0,030	3,87	2,73	0,56
0,05	1,32	2,50	2,08	0,223	0,033	0,023	3,38	2,08	0,200	0,030	3,88	3,03	0,95
0,05	1,32	2,56	2,13	0,234	0,033	0,023	3,54	2,13	0,210	0,030	3,87	3,18	1,18
0,05	1,32	2,58	2,15	0,238	0,033	0,023	3,61	2,15	0,220	0,030	3,82	3,33	1,47
0,05	1,32	2,64	2,20	0,249	0,033	0,023	3,78	2,20	0,230	0,030	3,82	3,48	1,75
0,05	1,32	3,25	2,35	1,165	0,14	0,071	17,65	2,35	0,130	0,015	5,43	1,97	0,00
0,05	1,32	3,43	2,48	1,297	0,14	0,071	19,65	2,48	0,140	0,015	5,52	2,12	0,01
0,05	1,32	3,60	2,60	1,426	0,14	0,071	21,60	2,60	0,160	0,015	5,42	2,42	0,09
0,05	1,32	3,87	2,80	1,653	0,14	0,071	25,05	2,80	0,180	0,015	5,50	2,73	0,29
0,05	1,32	4,01	2,90	1,774	0,14	0,071	26,87	2,90	0,200	0,015	5,40	3,03	0,48
0,05	1,32	4,29	3,10	2,027	0,14	0,071	30,71	3,10	0,220	0,015	5,51	3,33	0,76
0,05	1,32	4,49	3,25	2,227	0,14	0,071	33,75	3,25	0,240	0,015	5,53	3,64	1,14
0,05	1,32	4,56	3,30	2,297	0,14	0,071	34,80	3,3	0,260	0,015	5,39	3,94	1,65

De resultaten zijn samengevat in *Figuur II.4*.



Figuur II.4 Schadeverloop "tetrapoden" in een dubbele toplaag zonder tussentijds herstel

III Breukstenen in een dubbele top laag



Figuur III.1 Opzet fictief model "breukstenen" in een dubbele top laag

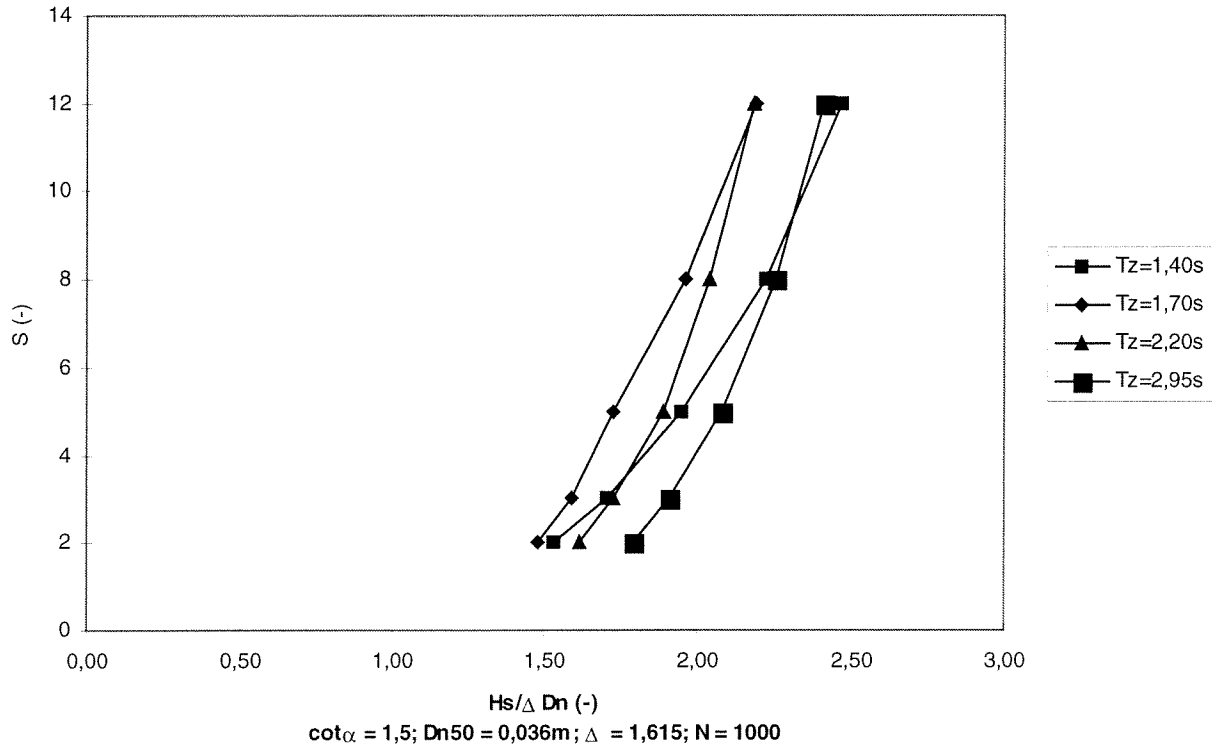
III.1 Uitvoer Breakwat

Het fictief model dat met behulp van *Breakwat* is getest, is te vinden in *Figuur III.1*. In *Tabel III.1* is de uitvoer van *Breakwat* voor dit model te vinden. De proeven zijn gesimuleerd met 1000 golven.

Tabel III.1 Uitvoer van *Breakwat* voor 1000 golven

$\cot \alpha$	Δ (-)	T_m (s)	D_{n50} (m)	S (-)	H_s (m)	$H_s/\Delta D_n$ (-)	s_m (-)	ξ_m (-)
1,5	1,165	1,4	0,036	2	0,081	1,53	0,026	4,10
1,5	1,165	1,4	0,036	3	0,087	1,71	0,032	3,73
1,5	1,165	1,4	0,036	5	0,095	1,95	0,037	3,47
1,5	1,165	1,4	0,036	8	0,102	2,22	0,042	3,25
1,5	1,165	1,4	0,036	12	0,110	2,47	0,047	3,08
1,5	1,165	1,68	0,036	2	0,086	1,48	0,020	4,71
1,5	1,165	1,68	0,036	3	0,092	1,59	0,021	4,60
1,5	1,165	1,68	0,036	5	0,101	1,73	0,023	4,40
1,5	1,165	1,68	0,036	8	0,109	1,96	0,026	4,13
1,5	1,165	1,68	0,036	12	0,116	2,19	0,029	3,91
1,5	1,165	2,19	0,036	2	0,094	1,62	0,013	5,85
1,5	1,165	2,19	0,036	3	0,101	1,73	0,013	5,85
1,5	1,165	2,19	0,036	5	0,110	1,89	0,015	5,44
1,5	1,165	2,19	0,036	8	0,119	2,04	0,160	1,67
1,5	1,165	2,19	0,036	12	0,127	2,18	0,170	1,62
1,5	1,165	2,95	0,036	2	0,104	1,79	0,008	7,45
1,5	1,165	2,95	0,036	3	0,111	1,91	0,008	7,45
1,5	1,165	2,95	0,036	5	0,121	2,08	0,009	7,03
1,5	1,165	2,95	0,036	8	0,131	2,25	0,010	6,67
1,5	1,165	2,95	0,036	12	0,140	2,41	0,010	6,67

In *Figuur III.2* zijn de resultaten in een grafiek uitgezet.



Figuur III.2 Schadeverloop “breukstenen” in een dubbele toplaag bij verschillende golfperiodes

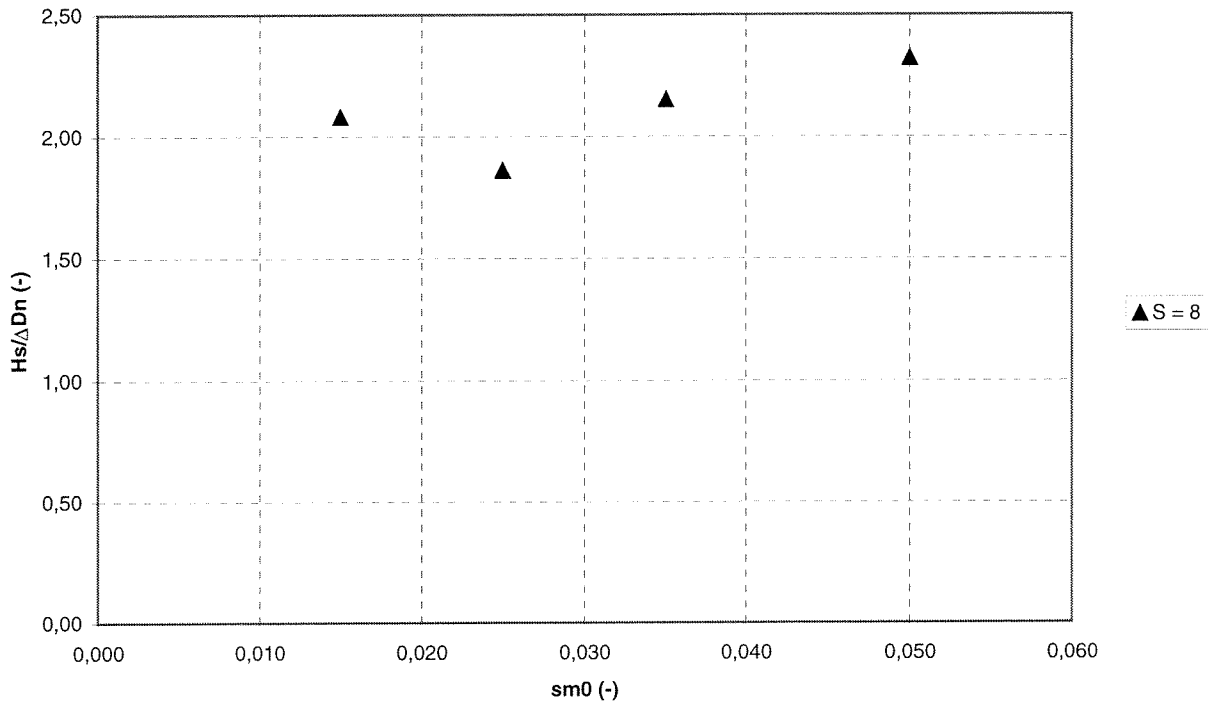
III.2 Invloed van de golfsteilheid op de stabiliteit

Met behulp van *Breakwat* is de invloed van de golfsteilheid op de stabiliteit onderzocht. De resultaten staan in Tabel III.2.

Tabel III.2 Uitvoer van *Breakwat* gesorteerd op s_m en S

$\cot \alpha$	Δ (-)	T_m (s)	D_{n50} (m)	S (-)	H_s (m)	$H_s/\Delta D_n$ (-)	s_{m0} (-)	ξ_m (-)
1,5	1,615	1,95	0,036	2	0,090	1,55	0,015	5,42
1,5	1,615	2,10	0,036	3	0,100	1,72	0,015	5,53
1,5	1,615	2,15	0,036	5	0,109	1,87	0,015	5,43
1,5	1,615	2,30	0,036	8	0,121	2,08	0,015	5,51
1,5	1,615	2,35	0,036	12	0,130	2,24	0,015	5,43
1,5	1,615	1,44	0,036	2	0,088	1,51	0,027	4,04
1,5	1,615	1,50	0,036	3	0,090	1,55	0,026	4,17
1,5	1,615	1,60	0,036	5	0,100	1,72	0,025	4,22
1,5	1,615	1,65	0,036	8	0,108	1,86	0,025	4,18
1,5	1,615	1,75	0,036	12	0,118	2,03	0,025	4,24
1,5	1,615	1,17	0,036	2	0,076	1,31	0,036	3,54
1,5	1,615	1,24	0,036	3	0,085	1,46	0,035	3,54
1,5	1,615	1,40	0,036	5	0,112	1,93	0,037	3,49
1,5	1,615	1,48	0,036	8	0,125	2,15	0,037	3,49
1,5	1,615	1,55	0,036	12	0,135	2,32	0,036	3,52
1,5	1,615	0,95	0,036	2	0,070	1,20	0,050	2,99
1,5	1,615	1,01	0,036	3	0,079	1,36	0,050	2,99
1,5	1,615	1,26	0,036	5	0,124	2,13	0,050	2,98
1,5	1,615	1,32	0,036	8	0,135	2,32	0,050	2,99
1,5	1,615	1,37	0,036	12	0,146	2,51	0,050	2,99

In *Figuur III.3* staan deze resultaten in een grafiek uitgezet.



Figuur III.3 De invloed van de golfsteilheid op de stabiliteit bij 1000 golven

III.3 Berekening van de resultaten zonder herstel van het profiel

De uitvoer van *Breakwat* gaat, in tegenstelling tot de proeven met een enkele toplaag, uit van herstel van het profiel na iedere golfhoogte. Omdat een vergelijking tussen de uitvoer van *Breakwat* en de proeven met een enkele toplaag een ietwat vertekend beeld geeft, zijn met behulp van ontwerpformules proeven gesimuleerd, die niet uitgaat van herstel na elke golfhoogte. De volgende ontwerpformules zijn gebruikt:

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 6,2P^{0,18} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}} \right)^{0,2} \xi^{-0,5} \quad (\text{plunging breakers})$$

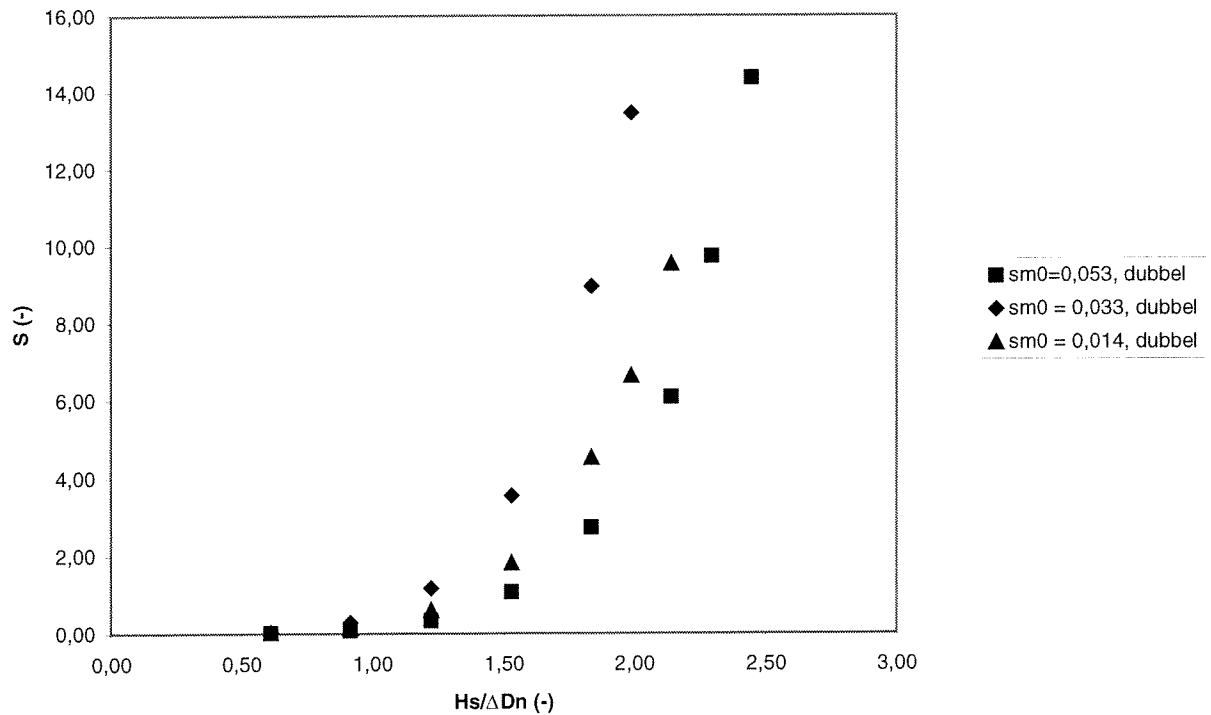
$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 1,0P^{-0,13} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}} \right)^{0,2} \xi^P \sqrt{\cot \alpha} \quad (\text{surging breakers})$$

Het resultaat is uitgezet in *Tabel III.3*.

Tabel III.3 Zonder tussentijds herstel van het profiel

H_s (m)	T_m (s)	s_m (-)	\square_m (-)	N (-)	$H_s/\Delta D_n$ (-)	S (-)
0,040	0,71	0,051	2,96	1000	0,61	0,01
0,060	0,88	0,050	2,99	1016	0,92	0,08
0,080	1,01	0,050	2,98	1059	1,22	0,34
0,100	1,13	0,050	2,98	1114	1,53	1,06
0,120	1,24	0,050	2,98	1178	1,83	2,73
0,140	1,34	0,050	2,98	1252	2,14	6,09
0,150	1,38	0,050	2,97	1644	2,29	9,73
0,160	1,43	0,050	2,98	1849	2,45	14,36
0,040	0,92	0,030	3,83	1000	0,61	0,04
0,060	1,13	0,030	3,84	1002	0,92	0,28
0,080	1,30	0,030	3,83	1005	1,22	1,17
0,100	1,47	0,030	3,87	1010	1,53	3,54
0,120	1,60	0,030	3,85	1015	1,83	8,94
0,130	1,67	0,030	3,86	1043	1,99	13,45
0,040	1,32	0,015	5,50	1000	0,61	0,02
0,060	1,58	0,015	5,37	1001	0,92	0,14
0,080	1,82	0,015	5,36	1005	1,22	0,60
0,100	2,05	0,015	5,40	1010	1,53	1,82
0,120	2,25	0,015	5,41	1015	1,83	4,52
0,130	2,38	0,015	5,50	1045	1,99	6,63
0,140	2,48	0,015	5,52	1047	2,14	9,53

Deze resultaten zijn in *Figuur III.4* in een grafiek weergegeven.



Figuur III.4 Schadeverloop "breukstenen" in een dubbele toplaag zonder tussentijds herstel

IV Kubussen in een enkele toplaag

IV.1 Gewicht van de kubussen

6 kubussen zijn gewogen. Het resultaat was als volgt:

Kubus 1: 282,65 gram
Kubus 2: 287,61 gram
Kubus 3: 279,63 gram
Kubus 4: 286,24 gram
Kubus 5: 287,60 gram
Kubus 6: 288,71 gram

Aangezien al deze kubussen minder dan 292 gram wegen, is besloten het gemiddelde gewicht van deze kubussen, 285 gram, te gebruiken bij verdere analyses.

IV.2 Volume van de toplaag

Het volume van de dubbele toplaag van kubussen (*Figuur 1.1*) is met behulp van profielmetingen bepaald op $0,0996 \text{ m}^3$. Een simpele handberekening wijst op een volume van ongeveer $0,112 \text{ m}^3$.

Talud:	$0,010 * t * 0,5$	$= 0,00045$	
	$0,945 * t$	$= 0,08505$	
	$0,050 * t * 0,5$	$= 0,00225$	
Kruin:	$0,200 * t$	$= 0,01800$	
	$0,135 * t * 0,5$	$= 0,00608$	
			Totaal: $0,111823 \text{ m}^3$

De verhouding tussen de exacte waarde en de 'berekende' waarde is 0,89 ($0,0996/0,112$).

Het profiel van een enkele toplaag is niet gemeten. Een simpele berekening wijst uit dat het volume ongeveer $0,0572 \text{ m}^3$ is ($t = 0,051/0,9$).

Talud:	$0,01 * t * 0,5$	$= 0,00028$	
	$0,79 * t$	$= 0,04477$	
	$0,03 * t * 0,5$	$= 0,00085$	
Kruin:	$0,20 * t$	$= 0,01133$	
			Totaal: $0,0572 \text{ m}^3$

De 'exacte' waarde moet ongeveer $0,05 \text{ m}^3$ zijn ($0,0572 * 0,89$).

IV.3 Oppervlakte van de toplaag

Het totale oppervlak waarop de kubussen zijn geplaatst is ongeveer 1 m^2 ($((0,8+0,2)*1)$). Dit is met behulp van *Figuur 4* bepaald.

V Tetrapoden in een enkele toplaag

V.1 Gewicht van de tetrapoden

24 tetrapoden zijn gewogen. Het resultaat was als volgt (gewicht in gram):

Blauw 1: 276,6	Oranje 1: 283,3	Bruin 1: 286,1	Geel 1: 283,4
Blauw 2: 289,2	Oranje 2: 287,7	Bruin 2: 301,7	Geel 2: 279,8
Blauw 3: 285,3	Oranje 3: 283,8	Bruin 3: 291,6	Geel 3: 289,8
Blauw 4: 290,8	Oranje 4: 286,4	Bruin 4: 291,1	Geel 4: 284,9
Blauw 5: 277,1	Oranje 5: 279,4	Bruin 5: 277,8	Geel 5: 289,7

Groen 1: 271,7
Groen 2: 274,0
Groen 3: 274,4
Groen 4: 284,2

Het gemiddelde gewicht van deze elementen, 284 gram, wordt gebruikt bij verdere analyse.

V.2 Volume van de toplaag

Het volume van de dubbele toplaag van tetrapoden (*Figuur II.1*) is niet bepaald. Een simpele handberekening wijst uit dat het volume ongeveer $0,1034 \text{ m}^3$ is ($t = 0,08$).

Talud:	$0,010 * t * 0,5$	= 0,0050
	$0,945 * t$	= 0,0756
	$0,050 * t * 0,5$	= 0,0020
Kruin:	$0,200 * t$	= 0,0160
	$0,12 * t * 0,5$	= 0,0048
		Totaal: $0,1034 \text{ m}^3$

De verhouding tussen de exacte waarde en de 'berekende' waarde is niet bekend. Daarom wordt, 0,89, de verhouding tussen de exacte waarde en de berekende voor kubussen (*Bijlage IV.2*), aangehouden. De 'exacte' waarde van het volume van de dubbele toplaag wordt hiermee $0,092 \text{ m}^3$.

Het profiel van een enkele toplaag is niet gemeten. Een simpele berekening wijst uit dat het volume ongeveer $0,072 \text{ m}^3$ is ($t = 0,050/0,7$).

Talud:	$0,01 * t * 0,5$	= 0,00036
	$0,79 * t$	= 0,05643
	$0,03 * t * 0,5$	= 0,00011
Kruin:	$0,20 * t$	= 0,01429
		Totaal: $0,072 \text{ m}^3$

De exacte waarde moet ongeveer $0,064 \text{ m}^3$ zijn ($0,072 * 0,89$).

V.3 Oppervlakte van de toplaag

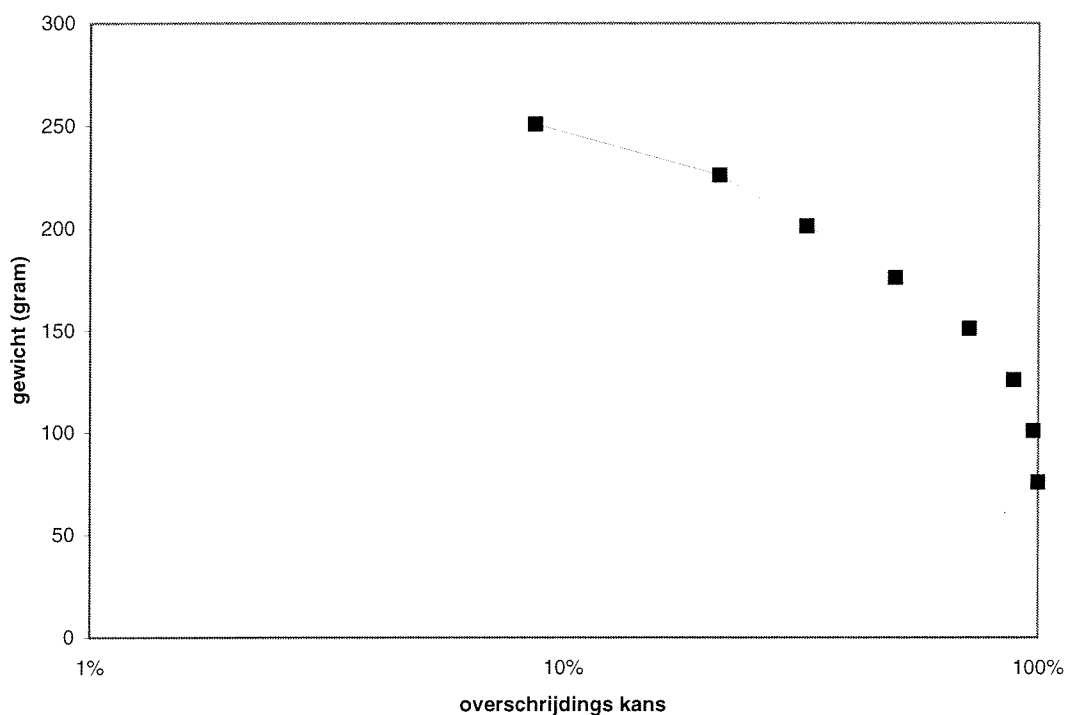
Het totale oppervlak waarop de tetrapoden zijn geplaatst is ongeveer 1 m^2 ($((0,8+0,2) * 1)$), hetzelfde als voor kubussen (*Bijlage IV.3*)

VI Breukstenen in een enkele toplaag

VI.1 Gewicht van de breukstenen

Klasse (gram)	aantal (-)	som (gram)	cumulatief (gram)	percentage (%)
75-100	4	350,0	15103,0	100
100-125	12	1350,0	14753,0	98
125-150	19	2612,5	13403,0	89
150-175	20	3250,0	10787,5	71
175-200	14	2625,0	7537,5	50
200-225	8	1700,0	4912,5	33
225-250	8	1900,0	3212,5	21
250-275	5	1312,5	1312,5	9

Zie *Figuur VI.1* voor de overschrijdingskromme.



Figuur VI.1 Overschrijdingskromme van de gebruikte breukstenen in een enkele toplaag

VI.2 Volume van de toplaag

Een simpele handberekening wijst uit dat het volume van de enkele toplaag ongeveer $0,037 \text{ m}^3$ is ($t = 0,037$ meter (gemeten)).

$$\begin{aligned} \text{Talud: } 0,01 * t * 0,5 &= 0,00019 \\ &0,79 * t &= 0,02923 \\ &0,03 * t * 0,5 &= 0,00056 \\ \text{Kruin: } 0,20 * t &= 0,00740 \end{aligned}$$

$$\text{Totaal: } 0,037 \text{ m}^3$$

De verhouding tussen de exacte waarde en de 'berekende' waarde wordt aangenomen op 0,89 (hetzelfde als bij kubussen, *Bijlage IV.2*). De 'exacte' waarde van het volume van de toplaag komt hiermee op $0,33 \text{ m}^3$.

De fictieve dubbele toplaag heeft een volume van ($t = 0,07$ meter):

$$\begin{array}{ll} \text{Talud: } 0,010 * t * 0,5 & = 0,00035 \\ & 0,945 * t & = 0,06615 \\ & 0,050 * t * 0,5 & = 0,00175 \\ \text{Kruin: } 0,200 * t & = 0,01400 \\ & 0,135 * t * 0,5 & = 0,00473 \end{array}$$

Totaal: $0,087 \text{ m}^3$

De 'exacte waarde is $0,087 * 0,89 = 0,077 \text{ m}^3$. De waarde $t = 0,07$ volgt uit modelonderzoek van Van der Meer [1985].

VI.3 Aantal elementen in de dubbele toplaag

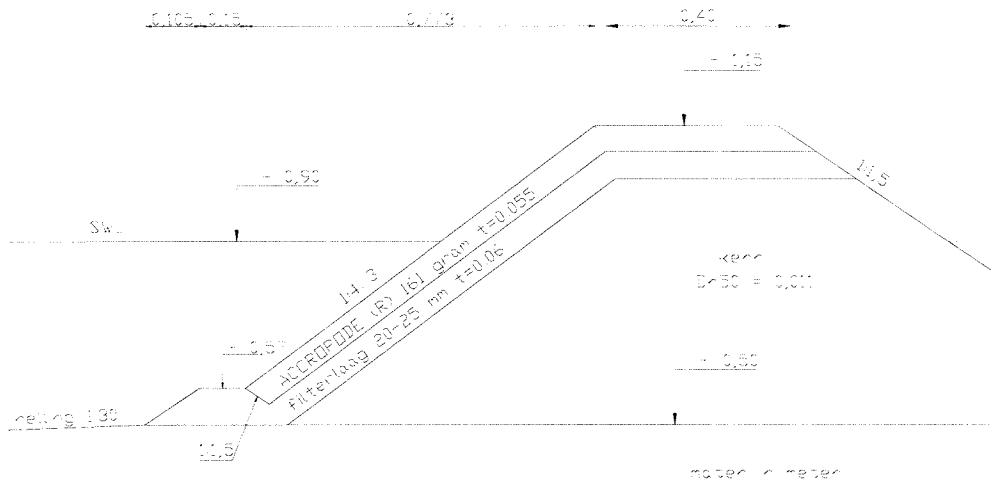
Uitgaande van een porositeit van 0,37 geldt:

$$\begin{array}{l} (0,077 - x) / 0,077 = 0,37 \quad x = \text{volume van de elementen in de toplaag} = 0,049 \text{ m}^3 \\ n * (D_{n50})^3 = 0,049 \quad n = \text{aantal elementen} = 1040; D_{n50} = 0,036 \text{ meter.} \end{array}$$

VI.4 Oppervlakte van de toplaag

Het totale oppervlak waarop de breukstenen zijn geplaatst is ongeveer $1 \text{ m}^2 ((0,8 + 0,2) * 1)$. Zie *Bijlage IV.3*.

VII Accropoden



Figuur VII.1 Modelopzet "accropoden" in de toplaag

VII.1 Modelproeven op accropoden

Het model waarin accropoden getest zijn, is te vinden in *Figuur VII.1*. De resultaten van de proeven staan in *Tabel VII.1*. In *Figuur VII.2* is de plaatsing van de accropoden te zien.

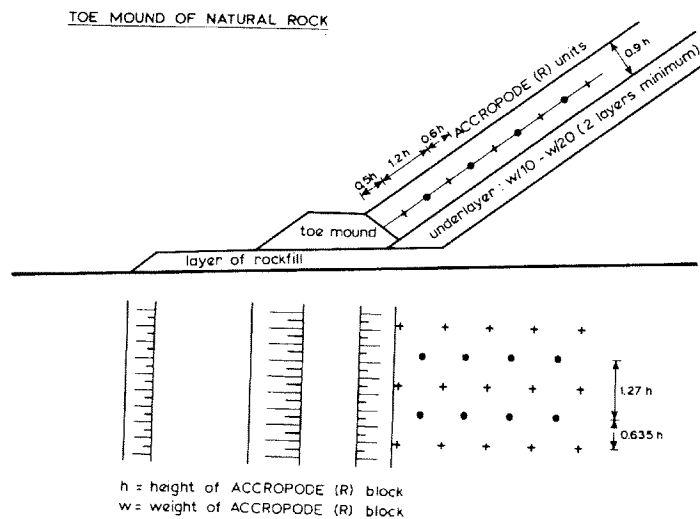
Tabel VII.1 Resultaten van proeven op accropoden

Test	cot α	spec.	D_n (m)	Δ (-)	H_{s0} (m)	T_m (s)	T_p (s)	H_s (m)	$H_s/\Delta D_n$ (-)	ξ_{sn} (-)	ξ_{sp} (-)	s_{m0} (-)	N_{od} (-)
2	1,33	PM	0,0411	1,322	0,114	1,67	1,90	0,122	2,25	4,48	5,10	0,026	0
3	1,33	PM	0,0411	1,322	0,143	1,68	1,90	0,153	2,82	4,03	4,55	0,032	0
1	1,33	PM	0,0411	1,322	0,143	1,71	1,90	0,153	2,82	4,10	4,55	0,031	
4	1,33	PM	0,0411	1,322	0,165	1,68	1,90	0,174	3,20	3,78	4,27	0,037	0
14	1,33	PM	0,0411	1,322	0,169	1,67	1,90	0,178	3,28	3,71	4,22	0,039	0,04
5	1,33	PM	0,0411	1,322	0,201	1,68	1,90	0,201	3,70	3,51	3,97	0,046	0
13	1,33	PM	0,0411	1,322	0,204	1,70	1,90	0,203	3,74	3,54	3,95	0,045	0,12
12	1,33	PM	0,0411	1,322	0,208	1,43	1,49	0,181	3,33	3,15	3,28	0,065	0
6	1,33	PM	0,0411	1,322	0,261	1,76	1,90	0,224	4,12	3,49	3,76	0,054	0,21
15	1,33	PM	0,0411	1,322	0,171	2,12	2,53	0,203	3,74	4,41	5,26	0,024	0
7	1,33	PM	0,0411	1,322	0,171	2,15	2,49	0,203	3,74	4,47	5,18	0,024	0
16	1,33	PM	0,0411	1,322	0,188	2,13	2,53	0,220	4,05	4,26	5,06	0,027	0,08
8	1,33	PM	0,0411	1,322	0,205	2,15	2,49	0,234	4,31	4,17	4,83	0,028	0,08
10	1,33	PM	0,0411	1,322	0,142	2,83	3,57	0,188	3,46	6,12	7,72	0,011	0
9	1,33	PM	0,0411	1,322	0,159	2,82	3,57	0,210	3,86	5,77	7,30	0,013	0
17	1,33	PM	0,0411	1,322	0,169	2,76	3,57	0,221	4,07	5,50	7,12	0,014	0
11	1,33	PM	0,0411	1,322	0,181	2,78	3,57	0,232	4,27	5,41	6,95	0,015	0,04
18	1,33	PM	0,0411	1,322	0,190	2,79	3,49	0,240	4,42	5,34	6,68	0,016	1,03

Na de modelproeven is het 'start van schade' criterium vastgesteld op $H_s/\Delta D_n = 3,7$ en het 'bezwijk' criterium op $H_s/\Delta D_n = 4,1$.

Aantal accropoden

De lengte van het talud en de lengte van de kruin waarop de accropode zijn geplaatst is 0,91, respectievelijk 0,40 meter. In totaal dus 1,31 meter (te bepalen met *Figuur VII.1*). Op zo'n lengte kunnen ongeveer 19 elementen worden geplaatst (te bepalen met *Figuur VII.2*, waarbij $h = 0,06$). De constructie heeft een breedte van 1 meter waarop 26 elementen kunnen worden geplaatst. In totaal worden er dus ongeveer 477 elementen gebruikt op 1,31 vierkante meter, 364 elementen per vierkante meter. Het volume aan beton bedraagt: $477 * 0,0411^3 = 0,033 \text{ m}^3$.



Figuur VII.2 Plaatsing van de accropoden op het model

Porositeit

Een simpele handberekening wijst uit dat de volume van de toplaag ongeveer $0,065 \text{ m}^3$ is ($t = 0,055$ meter).

$$\begin{aligned} \text{Talud: } & 0,01199 * t * 0,5 \\ & 0,9365 * t \\ & 0,009963 * t * 0,5 \\ \text{Kruin: } & 0,3487 * t \\ & 0,0513 * t * 0,5 \end{aligned}$$

$$\text{Totaal: } 1,326 * t \text{ m}^3 \rightarrow V = 0,0729 \text{ m}^3$$

De verhouding tussen de exacte waarde en de 'berekende' waarde wordt aangenomen op 0,89 (hetzelfde als bij kubussen, *Bijlage IV.2*). De 'exacte' waarde van het volume van de toplaag komt hiermee op $0,0649 \text{ m}^3$. De porositeit van de toplaag is $(0,0649 - 0,033) / 0,0649 = 0,50$.