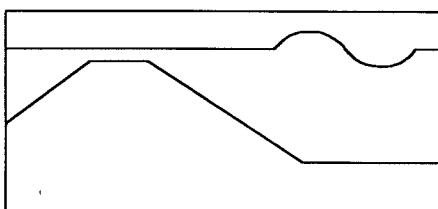
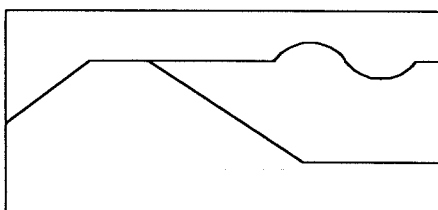
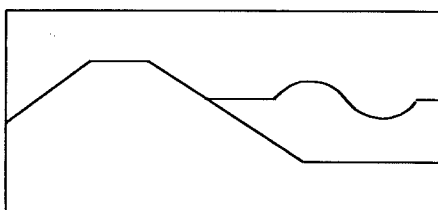
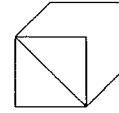


Stabiliteit golfbrekers met lage kruin



G. Burger, augustus 1995

T.U. Delft & Baggermaatschappij Boskalis bv.



Stabiliteit golfbrekers met lage kruin

Afstudeercommissie:

Prof ir K. d'Angremond
Ir W.H. Tutuarima
Dr ir J.W. van der Meer
Ir K.G. Bezuyen

G. Burger, augustus 1995
T.U. Delft & Baggermaatschappij Boskalis bv.

Voorwoord

Dit rapport behandelt mijn afstudeeronderzoek naar de stabiliteit van golfbrekers met een lage kruin. Het onderzoek kon plaatsvinden dankzij een goede samenwerking met Baggermaatschappij Boskalis en het Waterloopkundig Laboratorium "De Voorst".

Mijn dank gaat uit naar alle betrokkenen die hun tijd voor mij wilden vrijmaken. In het bijzonder naar mijn dagelijkse begeleider ir W.H. Tutuarima voor de nooit aflatende motivatie en naar dr Ir J.W. van der Meer voor zijn kritische en opbouwende commentaar.

Gerrit Burger
augustus 1995

Samenvatting

Dit afstudeerverslag beschrijft de interpretatie van een aantal proeven naar de stabiliteit van lage golfbrekers. Het onderzoek is uitgevoerd in het kader van een afstudeerproject aan de Technische Universiteit Delft, in samenwerking met Baggermaatschappij Boskalis en het Waterloopkundig Laboratorium "De Voorst".

Ondanks de vele onderzoeken en proeven is het nog niet gelukt het proces van schade aan golfbrekers geheel te doorgronden. Zo is de kennis van de processen die optreden bij golfbrekers met lage kruin nog beperkt. Bijkomend probleem hier is dat er relatief weinig proefgegevens beschikbaar zijn.

In dit rapport wordt in twee delen getracht een bijdrage te leveren aan de vergroting van het inzicht in de stabiliteit van lage golfbrekers. In deel A wordt een vergelijking tussen twee proevenseries met lage golfbrekers van respectievelijk Vidal en Van der Meer beschreven. Deel B behandelt proeven ter bepaling van de invloed van de materiaalfactoren van stortsteen op de stabiliteit. Het gaat hierbij om vorm en gradatie. Deze proeven zijn voor dit onderzoek uitgevoerd in het Waterloopkundig Laboratorium "De Voorst".

Bij vergelijking van de twee proevenseries (deel A) is gebleken dat het vrijboord van grote invloed is op de stabiliteit van de verschillende secties, zoals voor-, achterkant en kruin, van een lage golfbreker. Voor de totale stabiliteit is de invloed van het vrijboord minder sterk. Het vrijboord waarbij de kleinste stabiliteit optreedt voor de kruin, voorzijde en achterzijde als geheel is niet eenduidig vast te stellen. Het blijkt dat deze afhankelijk is van het optredende schadeniveau. Tevens is uit de vergelijking gebleken dat de voorzijde het minst stabiel is voor het hoogste vrijboord. Op de totale stabiliteit blijkt de kruin grote invloed te hebben. Ook de golfperiode blijkt invloed te hebben op de stabiliteit, zij het minder dan die van het vrijboord. Voor deze proeven is de kleinste golfperiode meestal maatgevend. De combinatie van de twee proeven heeft geleid tot een ontwerpgrafiek, die voor een variërend vrijboord aangeeft welke sectie maatgevend is (figuur 6.10).

Deel B beschrijft een modelonderzoek dat is uitgevoerd bij het Waterloopkundig Laboratorium "De Voorst". Met behulp van modelproeven is de invloed van een aantal materiaalfactoren van stortsteen op de stabiliteit van de bovenlaag van een lage golfbreker bepaald. De materiaalfactoren waren: 1) Vorm, de hoekigheid van het materiaal en de lengte-breedte verhouding van de individuele stenen en 2) Gradatie. Deze parameters zijn onafhankelijk gevarieerd om de resultaten zo zuiver mogelijk te kunnen vergelijken.

Het blijkt dat de invloed van de materiaalfactoren tot een ontwerpschade van $S=2$ niet terug is te vinden. Boven $S=2$ geeft vooral de afnemende hoekigheid een progressief schadeverloop te zien. De invloed van de lengte-breedte verhouding van de stenen is niet te herkennen in de resultaten, hetgeen een mildere ontwerpeis voor de praktijk zou mogen betekenen.

Inhoudsopgave

Voorwoord	iii
Samenvatting	v
1 Inleiding	9
Deel A: Vergelijking proefgegevens Vidal en Van der Meer	
2 Aanleiding en doel onderzoek	13
3 Theorie	15
3.1 Definities	15
3.1.1 Verdeling schadegebied in drie secties	15
3.1.2 Vrijboord	16
3.1.3 Schade en stabiliteit	17
3.2 Rekenmodel Van der Meer	19
4 Proeven Van der Meer	21
4.1 Inleiding	21
4.2 Beschrijving fysisch model	21
4.2.1 Doorsnede	21
4.2.2 Materiaal	22
4.3 Uitgevoerde proeven	22
4.4 Relatie aantal golven met schade	23
4.5 Resultaten per sectie	25
4.6 Evaluatie en maatgevende parameters	29
5 Proeven Vidal	31
5.1 Inleiding	31
5.2 Beschrijving fysisch model	31
5.2.1 Doorsnede	31
5.2.2 Materiaal	32
5.3 Uitgevoerde proeven	33
5.4 Resultaten per sectie	34

6	Vergelijking proeven Van der Meer en Vidal	37
6.1	Inleiding	37
6.2	Vergelijking stabiliteitsgetallen Vidal en Van der Meer	39
6.2.1	Stabiliteit voortalud	39
6.2.2	Stabiliteit kruin	41
6.2.3	Stabiliteit achtertalud	43
6.2.4	Totale stabiliteit	45
6.3	Ontwerpgrafiek	47

Deel B: Model-onderzoek naar invloed steenvorm en gradatie op stabiliteit lage golfbrekers

7	Aanleiding en doel onderzoek	53
8	Uitvoering proeven	55
8.1	Steensoort en gradatie	55
8.2	Proefopstelling	57
8.3	Proevenprogramma	59
9	Resultaten en interpretatie	61
9.1	Vergelijking resultaten met model Van der Meer	61
9.2	Invloed steenvorm op stabiliteit	63
9.3	Invloed gradatie op stabiliteit	65
9.4	Resultaten per sectie	66
10	Conclusies	67
10.1	Conclusies deel A	67
10.2	Conclusies deel B	69
	Literatuur	71
	Symbolen	73
	Bijlagen A & B	

1 Inleiding

De bekendste formule voor de bepaling van het benodigde gewicht van een steen op een door golven aangevallen talud is waarschijnlijk de formule van Hudson. De voordelen van deze formule zijn dat hij voor een groot aantal gevallen is getest en door zijn eenvoud gemakkelijk is te hanteren. Dit laatste voordeel is tevens de grootste zwakte van deze formule. Opvolgers van de Hudson formule houden rekening met meer parameters, waardoor zij betrouwbaarder zijn. Bijvoorbeeld de Van der Meer formule die, anders dan de formule van Hudson, o.a. de golfperiode en de relatieve doorlatendheid van de constructie meeneemt in de berekening van het benodigd steengewicht.

Ondanks de vele onderzoeken en proeven is het nog niet gelukt het proces van schade aan golfbrekers geheel te doorgronden. Zo is de kennis van de processen die optreden bij golfbrekers met lage kruin nog gering. Bijkomend probleem hier is dat er relatief weinig proefgegevens beschikbaar zijn.

Een belangrijk verschil tussen golfbrekers met een hoge en lage kruin is dat bij deze laatste veel meer overslag optreedt. Door deze overslag ontstaat niet alleen aan de voorzijde schade, maar zal onder de golfaanval ook aan de kruin en achterzijde schade ontstaan.

Om meer inzicht te verkrijgen in de ontwikkeling van schade bij lage golfbrekers heeft Vidal *et al.* (1991) een aantal proeven uitgevoerd waarin het schadegebied is opgesplitst in de voorzijde, de achterzijde en de kruin. In deel A van dit rapport worden de resultaten van dit onderzoek van Vidal vergeleken met een serie lage golfbreker-proeven van Van der Meer (1988). De gemeten schaden bij de proeven van Van der Meer werden op eenzelfde manier als bij Vidal opgesplitst en hiermee vergeleken. Dit is gedaan om de consistentie van deze nieuwe benaderingswijze te verifiëren.

Vervolgens wordt in deel B een serie proeven behandeld die voor dit afstudeeronderzoek zijn uitgevoerd bij het Waterloopkundig Laboratorium "De Voorst". Het doel van deze proeven was het bepalen van de invloed van de materiaalfactoren van stortsteen op de stabiliteit van de bovenlaag van lage golfbrekers. Dit om de strenge ontwerpeisen uit de praktijk te toetsen op hun bestaansrecht.

Deel A

Vergelijking proefgegevens Vidal en Van der Meer

2 Aanleiding en doel onderzoek

In 1988 heeft Van der Meer een aantal modelproeven voor lage golfbrekers met verschillende kruinhoogten uitgevoerd. Met behulp van deze gegevens heeft hij een formule voor de stabiliteit van lage golfbrekers bepaald. Bij dit onderzoek is alleen gekeken naar de schade-ontwikkeling aan een deel van de kruin en aan de voorzijde van de model-golfbrekers. Vervolgens heeft Vidal *et al* (1991) ook een model-onderzoek gedaan naar de stabiliteit van lage golfbrekers. Ook hij gebruikte hierbij verschillende kruinhoogten. Vidal hield wel rekening met de schade-ontwikkeling aan de gehele golfbreker. Ook verdeelde Vidal de schade in 3 secties; de achterzijde, de kruin en de voorzijde (zie § 3.1.1).

In dit deel zullen de proeven van Van der Meer worden ge-heranalyseerd. De schade van de hele constructie zal in ogenschouw worden genomen en zal evenals bij Vidal in 3 secties worden verdeeld. Vervolgens zullen de resultaten worden vergeleken met die van Vidal. Getracht zal worden om de bijdrage van de eerder genoemde secties aan de totale schade-ontwikkeling vast te stellen. Tevens zal de invloed van de kruinhoogte op de stabiliteit worden onderzocht.

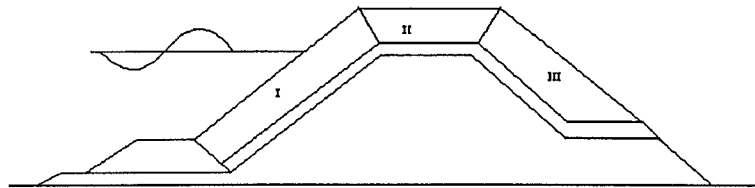
3 Theorie

3.1 Definities

In deze paragraaf worden een aantal in dit rapport veel gebruikte termen gedefinieerd.

3.1.1 Verdeling schadegebied in drie secties

Om het proces van schade aan de golfbreker beter te doorgronden wordt de schade van de constructie verdeeld in drie secties, te weten de voorzijde (I), de kruin (II) en de achterzijde (III) (figuur 3.1).



Figuur 3.1: Indeling in secties

Als het erosiegebied per sectie bekend is, kan aan de hand hiervan het schadegetal per sectie worden bepaald (zie § 3.1.3).

3.1.2 Vrijboord

De verticale afstand tussen de waterspiegel en de kruin is gedefinieerd als het vrijboord. Verschillende onderzoekers gebruiken verschillend materiaal waardoor de te vergelijken doorsneden andere afmetingen hebben. Om toch een vergelijking te kunnen maken tussen de vrijboorden wordt er vaak uitgegaan van een dimensieloos vrijboord.

Het vrijboord kan dimensieloos worden gemaakt door het als verhoudingsgetal ten opzichte van de golfhoogte of de nominale diameter te schrijven:

$$R = \frac{R_c}{H_s} \quad \text{of} \quad R = \frac{R_c}{D_{n50}}$$

Waarin:

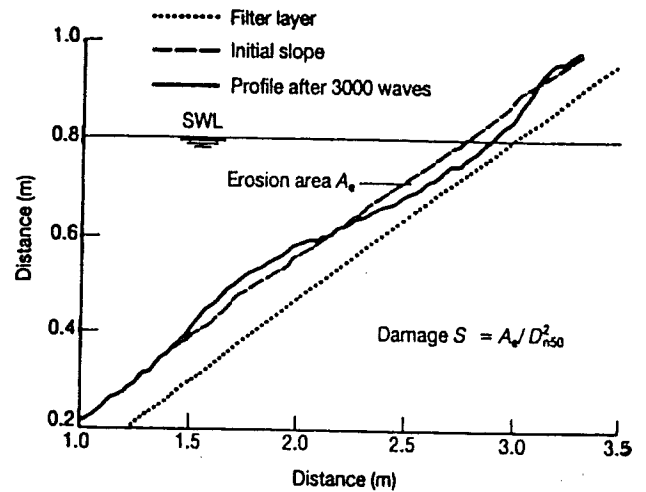
R	= dimensieloosvrijboord	[-]
R_c	= vrijboord	[m]
H_s	= golfhoogte	[m]
D_{n50}	= nominale diameter	[m]

Bij de vergelijking in dit rapport is gekozen voor een dimensieloos vrijboord ten opzichte van de nominale diameter D_{n50} . De reden hiervoor is dat er al een gedeelte van de gegevens op deze wijze was uitgewerkt.

3.1.3 Schade en stabiliteit

Schade

De schade wordt vastgesteld door de toestand van het talud voor de proeven te vergelijken met de toestand van het talud na de proeven. Aan de hand van deze vergelijking wordt een erosiegebied vastgesteld (figuur 3.2). De schade is dan gedefinieerd als:



Figuur 3.2: Erosie gebied

$$S = \frac{A_e}{D_{n50}^2} \quad \text{met} \quad D_{n50} = \left(\frac{M}{\rho_s} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Waarin:

S	= schadegetal	[-]
A_e	= opp. erosiegebied	[m ²]
D_{n50}	= nominale diameter	[m]
M	= massa steen	[kg]
ρ_s	= dichtheid steen	[kg/m ³]

Het schadegetal S kan worden geïnterpreteerd als 1 tot 1.4 maal het aantal verplaatste stenen in een breedte van één D_{n50} van de golfbreker [Van der Meer 1993].

Het niveau van schade waarbij er sprake is van begin van schade of bezwijken van de golfbreker, hangt onder andere af van de helling van het voortalud, de materiaaleigenschappen en de relatieve doorlatendheid.

Stabiliteit

Het stabiliteitsgetal N_s is gedefinieerd als:

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} \quad \text{met} \quad \Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$$

Waarin:

N_s	= stabiliteitsgetal	[-]
H_s	= significante golfhoogte	[m]
Δ	= relatieve dichtheid	[-]
ρ_w	= dichtheid water	[kg/m ³]
ρ_s	= dichtheid steen	[kg/m ³]
D_{n50}	= nominale diameter	[m]

Het verhoudingsgetal tussen de golfhoogte en de steenparameters wordt bepaald door de golfparameters, het aantal golven, de relatieve doorlatendheid en de geometrie van de golfbreker.

Het stabiliteitsgetal N_s kan op verschillende manieren worden gebruikt. Door bijvoorbeeld uit te gaan van een bepaalde N_s kan de benodigde verhouding tussen de golfhoogte en steendiameter worden bepaald. Ook kan, uitgaande van een gegeven golfhoogte, de steendiameter die nodig is voor een bepaalde stabiliteit bij een gekozen waarde van het schadegetal S worden bepaald.

3.2 Rekenmodel Van der Meer

Een zeer veel toegepaste methode om de stabiliteit van de toplaag van een golfbreker te voorspellen is de methode Van der Meer. Gebaseerd op werk van Thompson en Shuttler (1975) en op een grote hoeveelheid proeven uitgevoerd bij het Waterloopkundig Laboratorium vond hij de volgende formules:

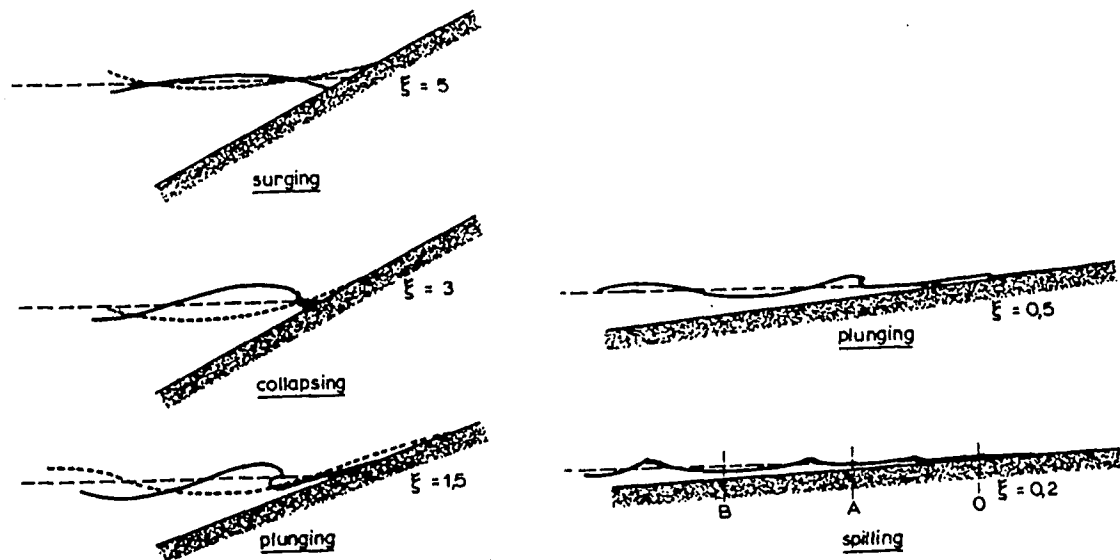
$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 6.2 P^{0.18} \left(\frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} \xi_m^{-0.5} \quad (3.1)$$

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 1.0 P^{-0.13} \left(\frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} \sqrt{\cot \alpha} \xi_m^P \quad (3.2)$$

Waarin:

P	=	relatieve doolathendheid constructie	[-]
S	=	schadegetal	[-]
N	=	aantal golven	[-]
ξ	=	brekerparameter	[-]

Formule (3.1) wordt toegepast bij brekende golven (plunging waves), voor niet brekende golven (surging waves) geldt formule (3.2) (zie figuur 3.3).



Figuur 3.3: Golfotypen

Bovenstaande formules zijn afgeleid voor 'hoge' golfbrekers, d.w.z. golfbrekers met een zodanige kruinhoogte dat weinig overslag optreedt. De schadegebieden zullen bij deze golfbrekers voornamelijk aan de voorzijde en eventueel aan de kruin ontstaan. De opgetrede schade is dan ook uitsluitend gemeten aan de voorzijde en aan de halve kruin (figuur 3.4).

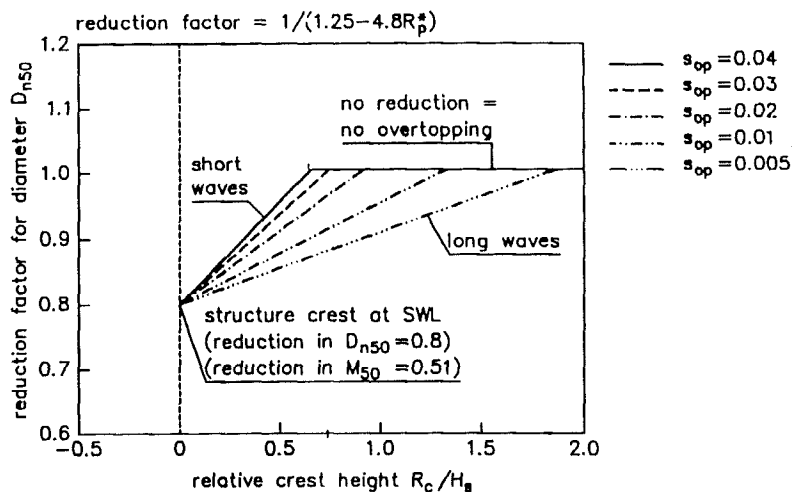
Bij lage constructies is deze situatie anders. Zowel aan de voor-, achterzijde als aan de kruin kan nu aanzienlijke schade optreden (figuur 3.5). Dit maakt de constructie stabiel, omdat de golfenergie nu over een groter oppervlak van de constructie wordt gedissipeerd.



Figuur 3.4: Schadegebied Van der Meer

Figuur 3.5: Schade bij lage golfbreker

Gebaseerd op een klein aantal proeven met lage golfbrekers heeft Van der Meer als aanvulling op zijn stabiliteitsformules, een reductie van de nominale diameter D_{n50} voor de bouw van lage golfbrekers voorgesteld (figuur 3.6).



Figuur 3.6: reductie D_{n50} voor lage golfbrekers

Met deze methode kan de steendiameter worden gereduceerd tot maximaal 80%, afhankelijk van de kruinhoogte en golfsteilheid. Op de geldigheid van deze benadering wordt ingegaan in § 6.3.

4 Proeven Van der Meer

4.1 Inleiding

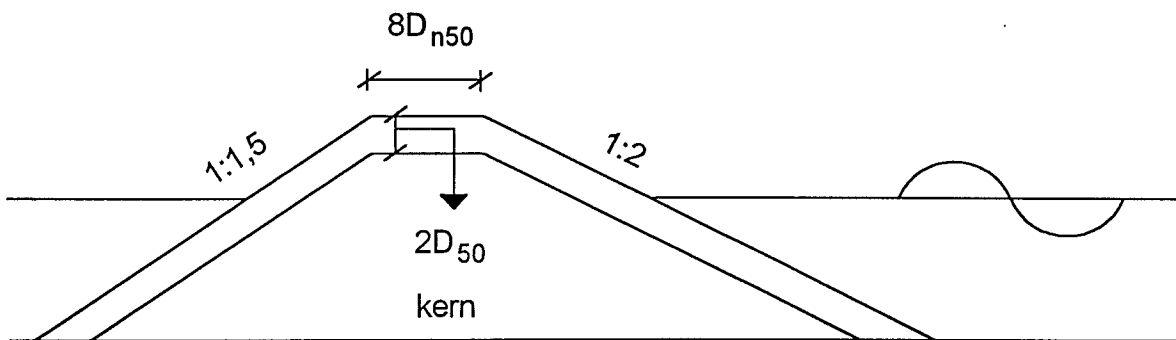
In 1988 heeft Van der Meer [1988] een aantal proeven gedaan ter bepaling van de stabiliteit van lage golfbrekers. Met deze proeven en een groot aantal proeven met hoge golfbrekers heeft Van der Meer zijn formules bepaald. Ook de reductie op de steendiameter voor golfbrekers met een lage kruin is afgeleid aan de hand van deze proeven (zie §3.2).

De volledige proefgegevens en de gemeten schaden staan vermeld in bijlage A1.

4.2 Beschrijving fysisch model

4.2.1 Doorsnede

De geteste doorsnede is weergegeven in figuur 4.1. De bodem voor de constructie had een helling van 1:30 en de breuksteen werd op de kern geplaatst zonder een tussenliggende filterlaag.



Figuur 4.1: Doorsnede golfbreker

4.2.2 Materiaal

Het gebruikte materiaal is samengevat in tabel 4.1:

	Bovenlaag	Kern
D_{n50} [m]	0.0344	0.0190
D_{85}/D_{15} [-]	1.25	1.5
ρ [kg/m ³]	2600	2600

Tabel 4.1: Gebruikt materiaal

4.3 Uitgevoerde proeven

Een complete proevenserie bestond uit de volgende stappen:

- taludprofiel meting
- proef met 1000 golven
- tweede taludprofiel meting
- proef met 2000 golven
- laatste taludprofiel meting

Totaal werd één constructie belast met 3000 golven. Na een complete serie werd de toplaag verwijderd en herbouwd. Eén proefserie bestond uit vijf proeven met gelijke golfperioden en verschillende golfhoogten. De proeven zijn samengevat in tabel 4.2:

serienr.	proeven	vrijboord R_c [m]	periode T_p [s]
1	1-5	0	1.96
2	6-11	0	2.56
3	12-16	0.125	2.56
4	17-20	0.125	1.96
5	21-26	-0.10	1.96
6	27-31	-0.10	2.56

Tabel 4.2: Proeven Van der Meer

4.4 Relatie aantal golven met schade

Omdat er na 1000 golven een tussenpeiling is gedaan kan de verhouding tussen de schade na 1000 en 3000 golven worden vastgesteld.

De verhouding tussen de schade voor een verschillend aantal golven is onderzocht door Van der Meer. Hij analyseerde daarbij gegevens van Thompson en Shuttler (1975). Hieruit volgde de relatie:

$$S = 0.014\sqrt{N}$$

Waarin:

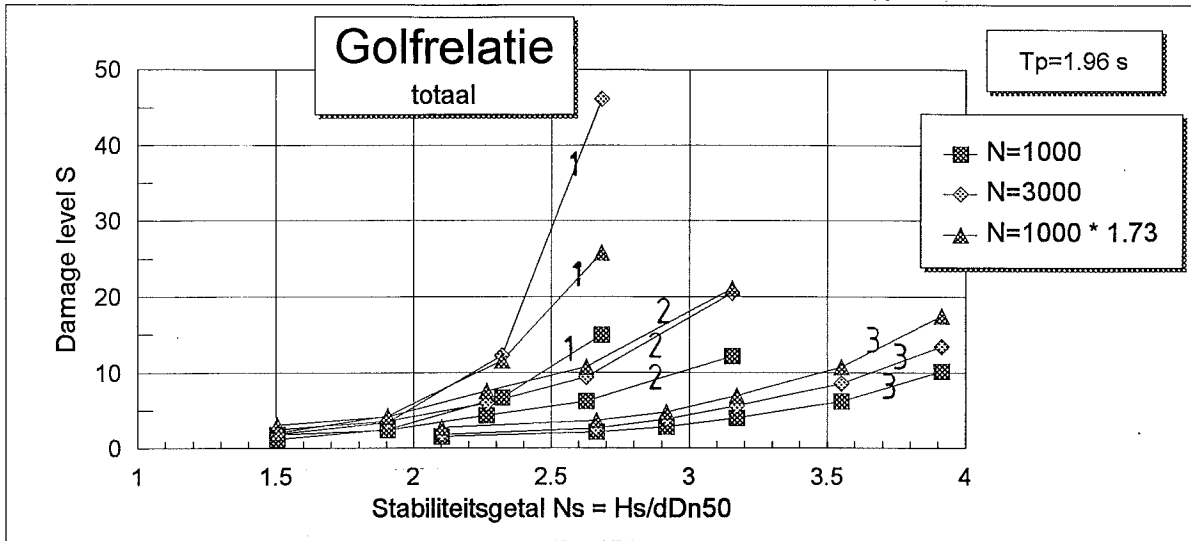
S	=	schadeniveau	[-]
N	=	aantal golven	[-]

Uit dit verband blijkt dat de schaden voor twee situaties met verschillende aantallen golven zich verhouden als de wortels uit deze golfaantallen. In het onderhavige geval geldt:

$$\frac{S_{3000}}{S_{1000}} = \sqrt{3} = 1.73$$

Voor het gehele scala aan proeven van Van der Meer [1988], waaruit de in dit rapport beschreven proeven afkomstig zijn, was het gemiddelde van S_{3000}/S_{1000} gelijk aan 1.64 en bleek de standaardafwijking 0.30 te zijn. Voor de in dit rapport beschreven proeven met een lage dam is de benadering iets minder goed. Het gemiddelde is 1.49 en de standaardafwijking 0.44. Beide variaties zijn berekend voor $2 < S < 17$.

Voor de totale golfbreker met $T_p = 1.96$ s is de invloed van het aantal golven op het verband tussen N_s en S afgebeeld in figuur 4.2.



Figuur 4.2: Relatie aantal golven

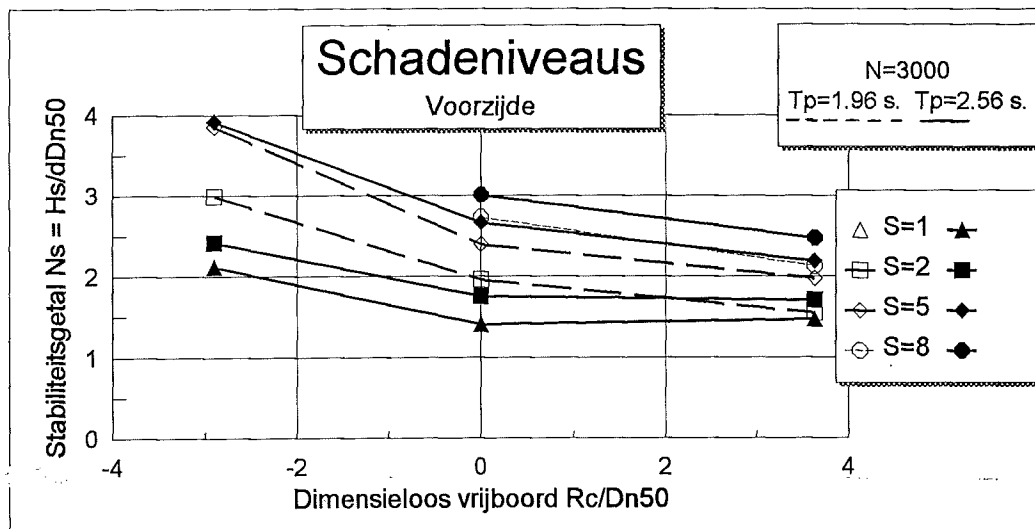
In deze figuur zijn voor drie verschillende proeven de relaties tussen de schade en het aantal golven afgebeeld. De nummers 1, 2 en 3 staan respectievelijk voor de proeven 5, 1 en 4, zie tabel 4.2.

4.5 Resultaten per sectie

In deze paragraaf zullen per sectie en voor het totaal de invloed van het vrijboord en het niveau van schade op de stabiliteit worden gepresenteerd en geanalyseerd. Deze schadeniveaus zijn gemeten na 3000 golven, voor twee verschillende golfperioden. De niveaus variëren van begin van schade ($S=1$) tot bezwijken ($S=8$).

Voortalud

In figuur 4.3 is het stabiliteitsgetal $H_s/\Delta D_{n50}$ uitgezet tegen het dimensieloze vrijboord $R=R_c/D_{n50}$ voor twee verschillende golfperioden. De getrokken lijnen staan voor $T_p=2.56$ s en de gestippelde voor $T_p=1.96$ s.



Figuur 4.3: Stabiliteit voorzijde

De kleinste stabiliteit treedt op voor het grootste vrijboord (behalve voor $S=1$ en $S=2$). De mate van afname van stabiliteit wordt kleiner met toenemend vrijboord. Hieruit zou kunnen worden afgeleid dat er een hogere orde relatie bestaat tussen R en N_s .

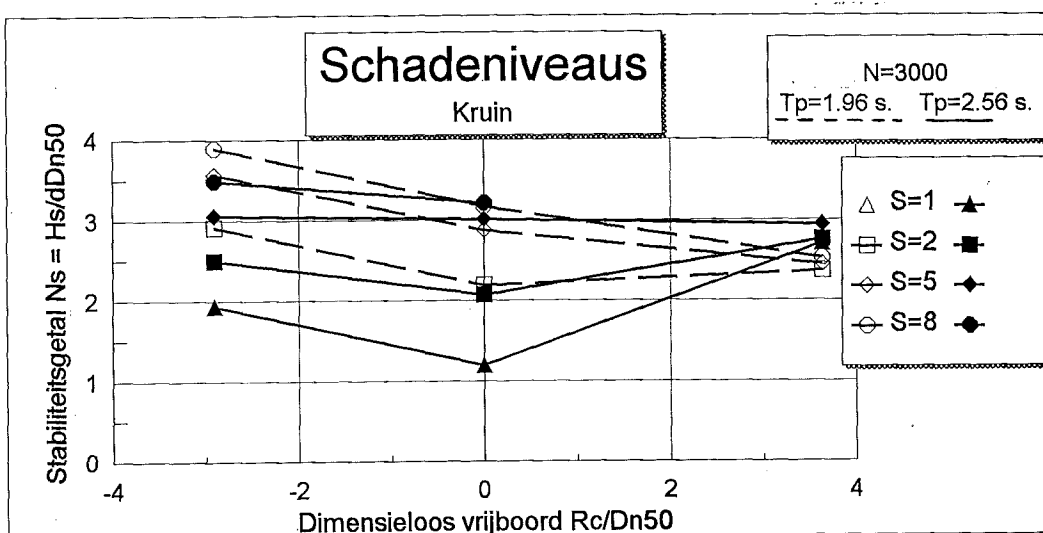
Voor de negatieve vrijboorden liggen de waarden van N_s voor de verschillende T_p 's verder uit elkaar dan voor de twee overige vrijboorden. Dit houdt in dat naarmate de positieve kruinhoogte afneemt, de schadegetallen elkaar minder snel opvolgen en dat er dus meer tijd rest om te reageren op opgetreden schade; de constructie wordt "minder bros".

De golfperioden hebben een verschillende invloed op de stabiliteit. Deze invloed varieert met de verschillende schadeniveaus. Voor lage schade ($S=2$) is de periode $T_p=2.56$ s de maatgevende golfperiode voor de kruin op zeeniveau en lager. Bij $S=2$ levert het positieve vrijboord en $T_p=1.96$ s de laagste stabiliteit op. Voor hogere schadeniveaus ($S=5,8$) is de kortere golfperiode $T_p=1.96$ s bepalend.

Verder valt op dat de "broosheid" voor $T_p=1.96$ s groter is dan die voor $T_p=2.56$ s.

Kruin

De schade voor kruin is weergegeven in figuur 4.4:



Figuur 4.4: Stabiliteit kruin

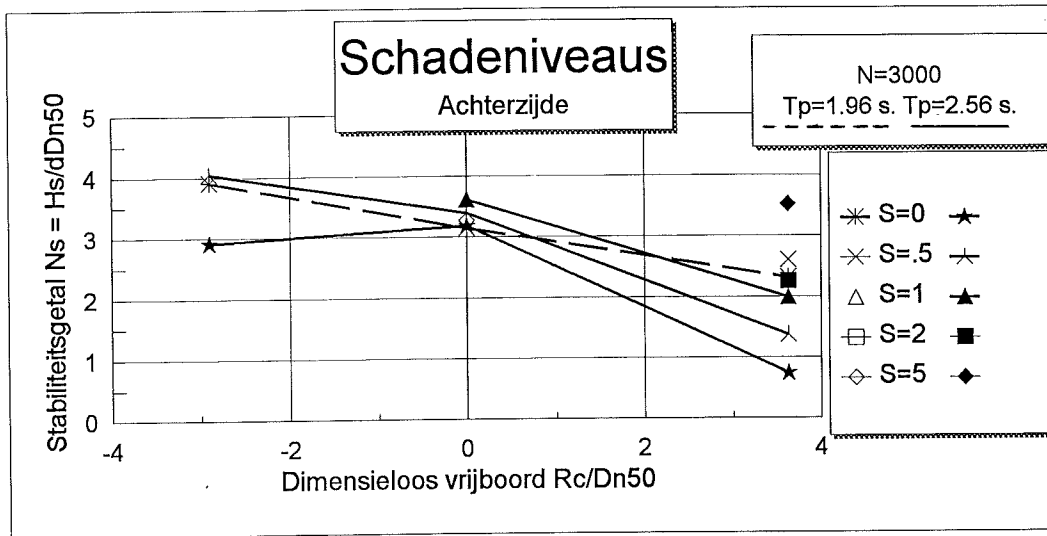
Uit deze grafiek blijkt dat voor $S > 2$ het minimum van het stabiliteitsgetal verschuift naar grotere waarden van het dimensioneloze vrijboord R . De relatie tussen N_s en R verandert ook met deze toename. Lijkt er voor $S < 2$ nog een curve te bestaan, bij $S=5$ is deze overgegaan in een monotoon dalende lijn.

Bij $R > 0$ is de schade-ontwikkeling zeer snel, waardoor er een gevaarlijke situatie kan ontstaan. Voor $R=0$ is er weinig invloed van T_p op de schade-ontwikkeling. Voor $R > 0$ is de korte periode maatgevend. Voor $R < 0$ is de invloed van T_p beter te zien en blijkt de langste golf maatgevend.

De conclusie kan worden getrokken dat de kruin verschillende maatgevende golfperioden voor de verschillende vrijboorden heeft.

Achtersalud

Aan de achterzijde is de beschikbare informatie over de stabiliteit nogal beperkt (figuur 4.5):

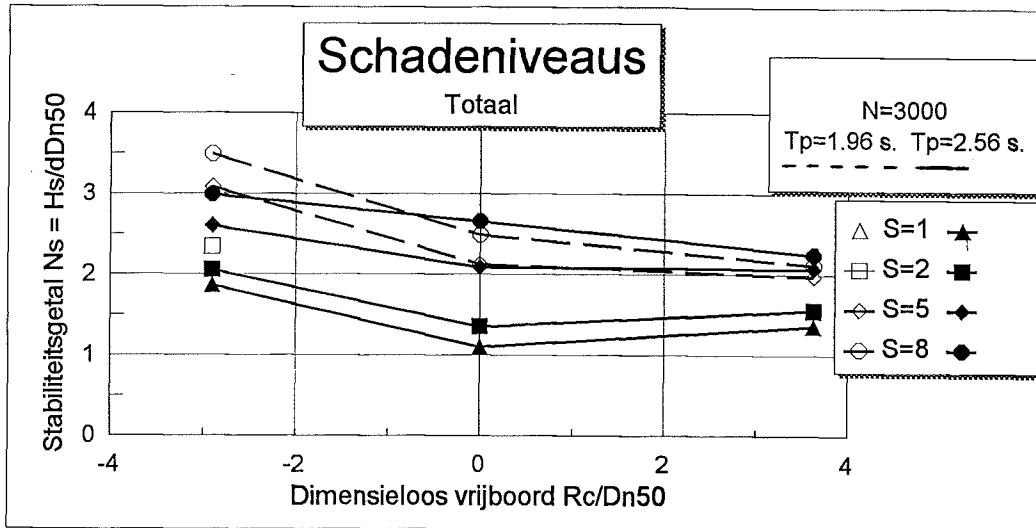


Figuur 4.5: Stabiliteit achterzijde

Er kan echter worden geconcludeerd dat de stabiliteit snel afneemt met een toenemend vrijboord. Verder lijkt de langste golf, $T_p = 2.56$ s maatgevend. De constructie is zeer "bros" voor $R=0$, verdere ontwikkeling van de schade dan $S=1$ is hier niet bekend, waardoor dit niet maatgevend is.

Totaal

Figuur 4.6 toont de stabiliteit voor de totale constructie:



Figuur 4.6: Stabiliteit totale constructie

Voor het totaal neemt de stabiliteit toe naarmate het vrijboord lager wordt. Voor de overige twee vrijboorden verschilt de stabiliteit tussen de verschillende golfperioden weinig. De minimum stabiliteit verschuift van $R=0$ naar $R>0$. Voor de wat hogere waarden van de stabiliteit is het minimum dus kennelijk tussen de twee hogere vrijboorden te vinden.

De snelle opeenvolging van de schaden voor $R>0$ is waarschijnlijk te wijten aan de invloed van de kruin (zie figuur 4.3). De periode heeft niet veel invloed op de ontwikkeling van schade. Alleen voor $R<0$ overheerst duidelijk de lange golf, voor de overige twee vrijboorden is het verschil gering.

4.6 Evaluatie en maatgevende parameters

Na het bestuderen van de schade-ontwikkeling op de verschillende secties, weten we dat de invloed van zowel het dimensieloze vrijboord $R = R_c/D_{n50}$ als van de golfperiode T_p per sectie nogal verschilt. Tabel 4.3 laat voor verschillende vrijboorden zien, op welke plaats (voor-, boven- of achterzijde) de schadeontwikkeling begint ($S=2$) en waar hij maatgevend is voor hogere schade ($S=5$). Bovendien wordt aangegeven van welke golfperiode hierbij sprake is:

R	$S=2$		$S=5$	
	Sectie	T_p (s)	Sectie	T_p (s)
-	voor	2.56	kruin	2.56
0	voor	2.56	voor	1.96
+	voor	1.96	voor	1.96

Tabel 4.3: Maatgevende parameters per vrijboord

De kruin domineert dus de schade voor $R < 0$, met een bijbehorende golfperiode van $T_p = 2.56$ s en voor aanzienlijke schade ($S=5$). In de overige gevallen is de voorzijde maatgevend, met $T_p = 2.56$ s voor lage schade en hoewel in tegenspraak met de theorie van Van der Meer, met $T_p = 1.96$ s voor hogere schade. Opgemerkt dient te worden dat voor de maatgevende voorzijde bij een positief vrijboord de constructie ook nog eens "bros" is.

Tabel 4.4 laat per sectie en voor het totaal voor de beide schadeniveaus zien bij welk vrijboord de stabiliteit het kleinst is, weer met bijbehorende periode:

Sectie	$S=2$		$S=5$	
	R	T_p (s)	R	T_p (s)
voor	+	1.96	+	1.96
kruin	0	2.56	+	1.96
achter	+	2.56	+	2.56
totaal	0	2.56	+	1.96

Tabel 4.4: Maatgevende parameters per sectie

Hier valt op dat de algemeen maatgevende periode $T_p = 1.96$ s lijkt te zijn. In sommige gevallen geeft echter de langere golf de hoogste schade, zodat bij een ontwerp beiden parameters in ogenschouw moeten worden genomen.

5 Proeven Vidal

5.1 Inleiding

Vidal *et al.* (1991) heeft onderzoek gedaan naar de stabiliteit van golfbrekers met lage kruin. Hij deed dit 3-dimensionaal, om ook de schade-ontwikkeling aan de golfbrekerkop te kunnen vaststellen. In dit hoofdstuk zullen schade-ontwikkelingen van de als 2-dimensionaal interpreteerbare secties worden beschreven, zoals uitgewerkt door Vidal. De resultaten zullen vervolgens worden vergeleken met een proevenserie van Van der Meer.

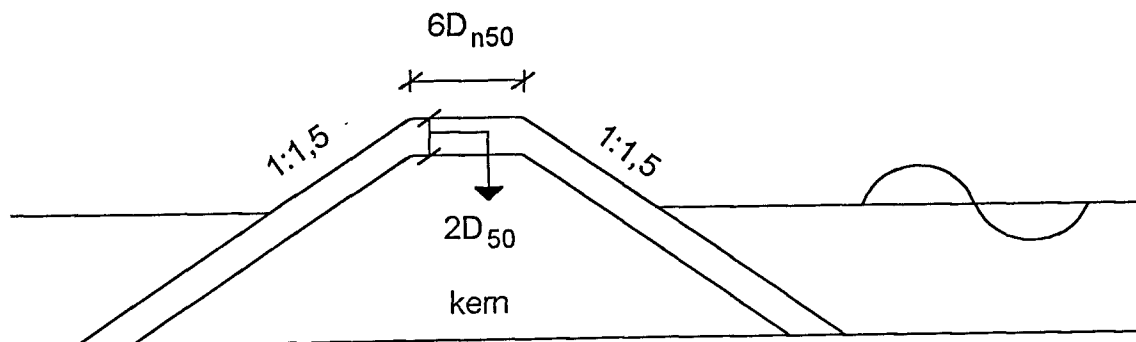
Voordat de vergelijking met de proeven van Van der Meer kan worden gemaakt moeten de schadegetallen van de kruin worden gecorrigeerd. De definitie die Vidal voor het gebied van de kruin heeft gehanteerd is namelijk niet gelijk aan de definitie zoals beschreven in paragraaf 3.1.1. Vidal heeft aan beide zijden van de kruin een stuk van het voor- en achtertalud bij het schadegebied geteld. Deze stukken van het voor- en achtertalud zijn dus dubbelgeteld. De correctie hierop zal worden toegepast in hoofdstuk 6.

De uitgebreide proefgegevens en gemeten schaden zijn opgenomen in bijlage A2.

5.2 Beschrijving fysisch model

5.2.1 Doorsnede

De doorsnede zoals getest door Vidal is weergegeven in figuur 5.1. De bodem voor de constructie was horizontaal en de breuksteen werd geplaatst zonder een filterlaag.



Figuur 5.1: Doorsnede golfbreker Vidal

5.2.2 Materiaal

Het materiaal dat Vidal voor zijn proeven heeft gebruikt is samengevat in tabel 5.1:

	Bovenlaag	Kern
D_{n50} [m]	0.0249	0.0190
D_{n85}/D_{n15} [m]	0.0264	0.0224
ρ [kg/m ³]	2650	2650

Tabel 5.1: Materiaal Vidal

5.3 Uitgevoerde proeven

In totaal zijn er door Vidal 35 proeven uitgevoerd. Bij deze proeven is de periode constant gehouden terwijl de golfhoogte werd opgevoerd. Dit geeft als resultaat dat de golfsteilheid varieert. De golfsteilheid is gedefinieerd als:

$$s = \frac{2\pi H_s}{g T_m^2}$$

Deze manier van testen is inmiddels achterhaald, omdat is gebleken dat de stabiliteit afhankelijk is van de golfsteilheid [Van der Meer 1988]. Een overzicht van de uitgevoerde proeven is gegeven in tabel 5.2:

Proefnr.	Waterdiepte d [cm]	Kruinhoogte h [cm]	h-d [cm]	T _p [s]	H _s [cm]
1,4,5,2,3	40	40	0	1.4	5,8,8,10 ,13
13	60	60	0	1.4	15
9,6,7,8	45	40	-5	1.4	8,10,13,15
14,15	65	60	-5	1.4	15,18
12,10,11	38	40	2	1.4	8,10,12
16,17	58	60	2	1.4	5,18
18,19,20,21, 22, 23	56	60	4	1.4	5,8,10,13, 16,19
24,25,26,27 ,28,29	54	60	6	1.4	6,8,10,12, 14,16
30,31,32,33	58	60	2	1.8	6,9,12,15
34,35	54	60	6	1.8	8,11

Tabel 5.2: Proeven Vidal (1991)

Voor de proeven met een periode van 1.4 s werden 3000 golven gegenereerd, voor de proeven met 1.8 s 2600 golven.

5.4 Resultaten per sectie

Om voor de verschillende secties de stabiliteit tegen het vrijboord te kunnen uitzetten, wordt eerst per vrijboord de schade tegen de stabiliteit uitgezet. Vervolgens worden voor vaste schadegetallen de bijbehorende stabiliteiten afgelezen, waarbij dan ook de vrijboorden bekend zijn. Vidal heeft vier niveaus van schade gedefinieerd, die per sectie verschillen.

De verschillende schadeniveaus die zijn gebruikt, zijn:

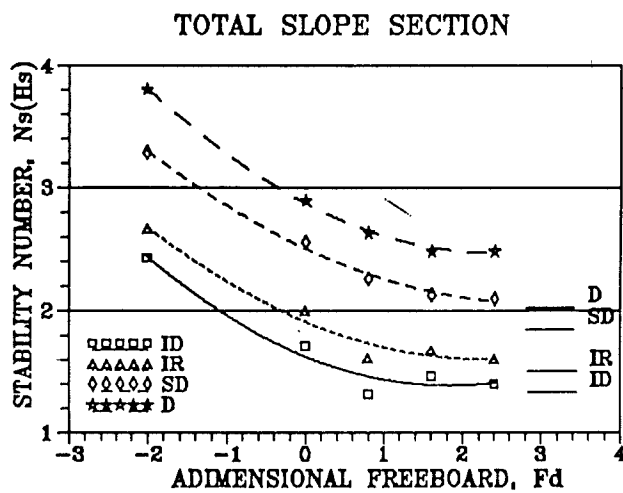
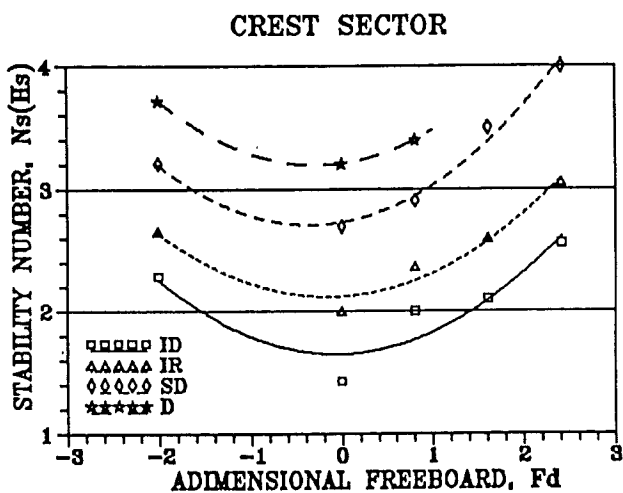
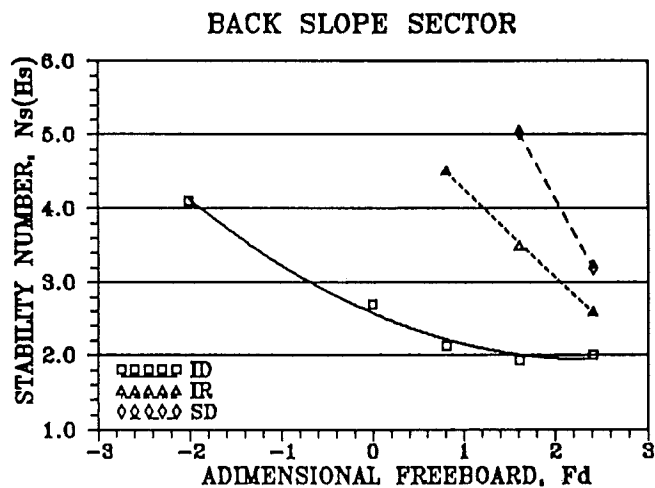
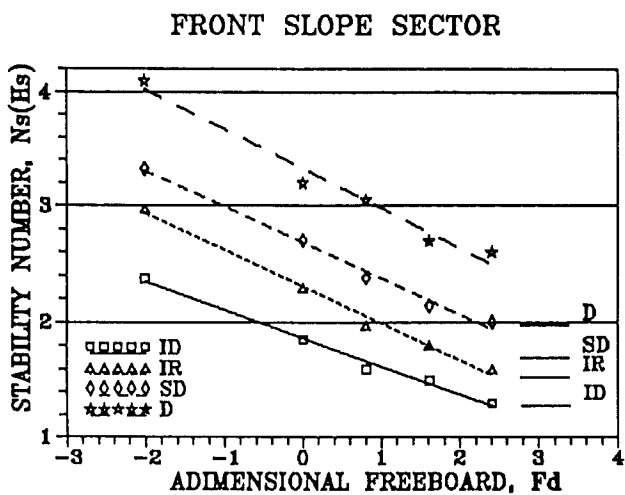
- ID voor initialisatie van schade: Een klein aantal stenen is verplaatst over een afstand die groter is dan de nominale diameter D_{n50} ,
- IR voor Iribarren schade: De gaten in de buitenste laag zijn dusdanig groot dat de golven de tweede laag kunnen aanvallen en de stenen van deze laag kunnen verplaatsen,
- SD voor grote schade: De tweede laag voldoet aan de definitie van ID,
- D voor falen: Materiaal van de tweede en evt. volgende lagen is verplaatst, de golfbreker voldoet niet meer aan de ontwerpisen.

Tabel 5.3 laat zien met welke schadeniveaus S deze definities volgens Vidal corresponderen:

	S_{Totaal}	S_{Voor}	S_{Kruin}	S_{Achter}
ID	1.5	1.0	1.0	0.5
IR	2.5	2.5	2.5	2.0
SD	6.5	4.0	5.0	3.5
D	12	9.0	10	---

Tabel 5.3: Definitie schadeniveau S voor de proeven van Vidal (1991)

Figuur 5.2 laat de resultaten per sectie zien. Zowel voor de drie secties als voor het totaal is er een duidelijke trend te zien, welke per sectie voor de verschillende niveaus van schade consistent zijn.



Figuur 5.2: Schade per sectie en voor het totaal Vidal

6 Vergelijking proeven Van der Meer en Vidal

6.1 Inleiding

De parameters die Vidal bij zijn proeven heeft gebruikt zijn niet geheel gelijk aan die van Van der Meer. Zo heeft Vidal gebruik gemaakt van een voortalud met een helling van 1:1.5, terwijl Van der Meer hiervoor 1:2 heeft gebruikt. Ook had Vidal een andere D_{n50} , waardoor zijn golven lager bleven. Een overzicht van de verschillen is in tabel 6.1 weergegeven:

Parameter		Van der Meer		Vidal	
D_{n50}	[m]	0.0344		0.0249	
ρ_{steen}	[kg/m ³]	2610		2650	
H_s	[m]	0.0727-0.2293		0.047-0.152	
T_p	[s]	1.96	2.56	1.4	1.8
s_p	[-]	0.014-0.036	0.010-0.021	0.015-0.049	0.010-0.026
B_{kruin}	[D_{n50}]	8		6	
R_c/D_{n50}	[-]	3 .. -2.9		2.4 .. -2	

Tabel 6.1: Parameters Vidal en Van der Meer

Het valt op dat de steilheden die Vidal voor zijn proeven heeft gebruikt, over het algemeen lager zijn dan die van Van der Meer. Naar alle waarschijnlijkheid zal hier dan ook meer schade optreden. Verder is te zien dat de kruinbreedte van Van der Meer groter is dan die van Vidal, waardoor er wat minder schade aan achterzijde van de golfbreker zal ontstaan.

De vergelijking tussen de beide proeven is als volgt uitgevoerd: Van alle proeven is met behulp van de proefgegevens van bijlage A1 en A2 de stabiliteit tegen het vrijboord uitgezet. Vervolgens zijn uit deze grafieken voor gekozen schadeniveaus de bijbehorende stabiliteitsgetallen afgelezen. Omdat de kruinhoogte van de verschillende proeven bekend is kunnen we vervolgens een grafiek maken waarin we de stabiliteit uitzetten tegen het vrijboord, voor de gekozen vaste schadeniveaus.

De schade die over de totale constructie ontstaat moet dan wel worden verdeeld over de verschillende secties. Als uitgangspunt is gekozen voor de volgende verdeling: Voorzijde 50%, achterzijde en kruin ieder 25% (tabel 6.2). De werkelijke verdeling van de schade zal variëren met het vrijboord. De aan de secties toegekende waarden zijn dan ook niet meer dan een schatting voor deze verdeling.

	S_{Totaal}	S_{Voor}	S_{Kruin}	S_{Achter}
Schade verdeling	100 %	50%	25%	25%
Begin van schade/ ontwerpschade	2	1	0.5	0.5
Behoorlijke schade	5	2,5	1,25	1,25
Ernstige schade	8	4	2	2
Bezwijken	12	6	3	3

Tabel 6.2: Gekozen Schadeverdeling over de secties

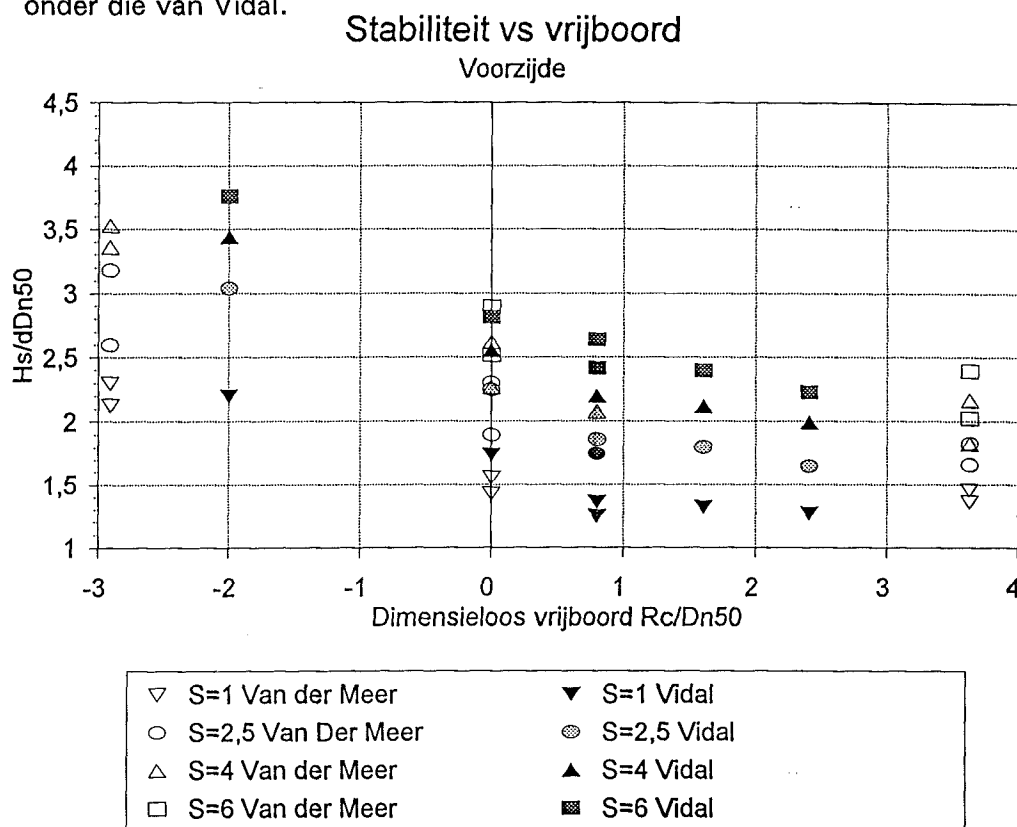
In dit hoofdstuk zullen per sectie de stabiliteiten voor de in tabel 6.2 genoemde schadeniveaus van de beide onderzoekers in één grafiek worden gezet. Per sectie zullen steeds twee grafieken worden gepresenteerd. De eerste met een viertal schadegetallen, waarvan de waarde afhankelijk van de sectie varieert van $S=0.5$ tot $S=12$. In de tweede grafiek wordt alleen de ontwerpschade $S=2$ weergegeven.

In deze laatste grafiek wordt tevens een algemene trend gezocht voor het verloop van de stabiliteit buiten het bereik van de meetgegevens. Het bereik van R_c is in deze grafieken uitgebreid. Deze trend is gebaseerd op een algemene beschouwing die is opgenomen in bijlage A3. Het doel van deze laatste grafiek is inzicht te krijgen in de schadeverdeling over de secties, met variërend vrijboord. Dit inzicht kan bij het ontwerp zijn nut hebben.

6.2 Vergelijking stabiliteitsgetallen Vidal en Van der Meer

6.2.1 Stabiliteit voortalud

In figuur 6.1 is de stabiliteit tegen het vrijboord uitgezet voor de gegevens van Vidal en Van der Meer. De schadeniveaus zijn: $S = 1$, $S = 2.5$, $S = 4$ en $S = 6$. De resultaten komen voor alle schadeniveaus redelijk goed overeen. Alleen voor een negatief vrijboord van R_c/D_{n50} van 2.9 blijven de resultaten van Van der Meer iets onder die van Vidal.



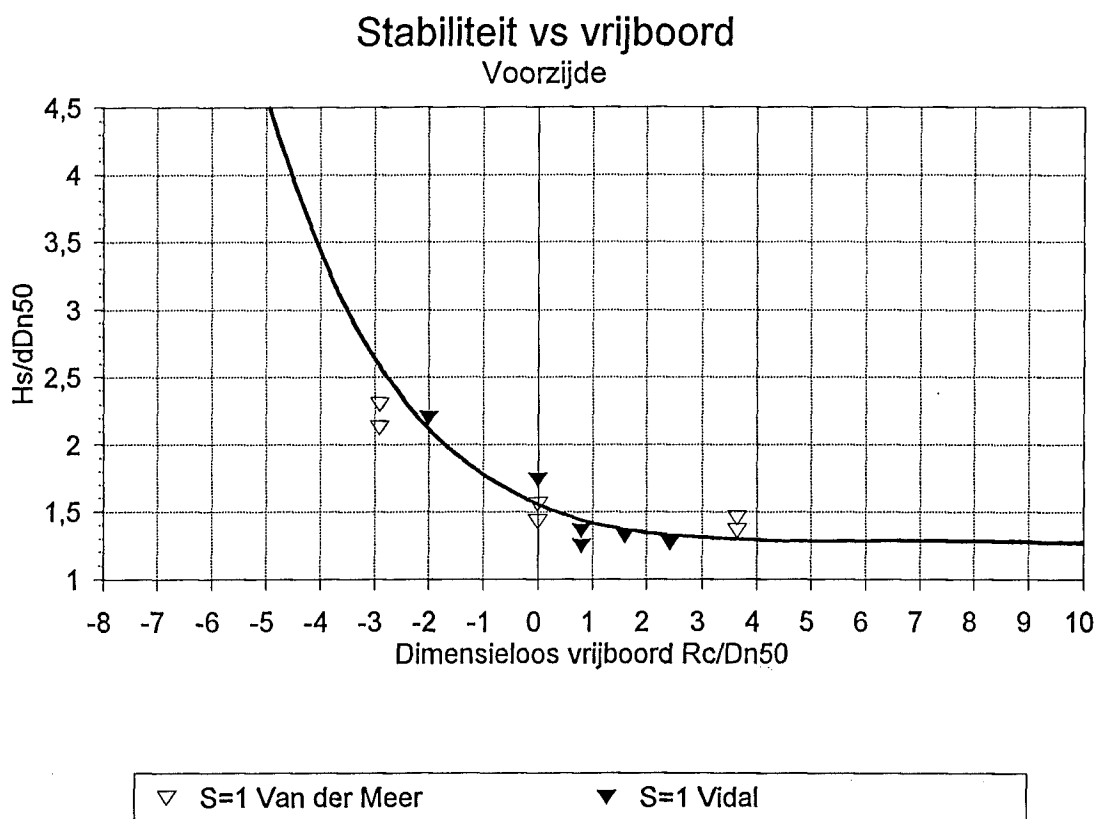
Figuur 6.1: Stabiliteit voorzijde Vidal en Van der Meer voor vaste schadegetallen

Figuur 6.2 geeft de proeven van Vidal en Van der Meer weer voor $S = 1$. De trend die de beide proeven aangeven komt erg goed overeen, zeker gezien het feit dat de parameters die de verschillende onderzoekers hebben gehanteerd niet geheel overeenkwamen (zie § 6.1). De uiterste waarden van de vrijboorden die Van der Meer heeft gebruikt zijn hoger resp. lager dan die van Vidal en vullen deze dus goed aan. Nu blijft de vraag over wat het verloop van de stabiliteit zal zijn als het vrijboord naar respectievelijk + of - oneindig zou gaan. Om dit te bepalen zijn vele aanvullende proeven noodzakelijk. Voorlopig is het echter wel

mogelijk om een voorspelling van dit verloop te geven, zij het dat dit niet nauwkeuriger dan trendmatig mogelijk is.

Voor een positief toenemend vrijboord is de waarde van $H_s/\Delta D_{n50}$ eenvoudig te bepalen. Als het vrijboord toeneemt is er namelijk geen overslag meer en gedraagt de constructie zich volledig volgens de Van der Meer formules. De bijbehorende waarde voor de stabiliteit met het schadeniveau van $S=1$ is dan $H_s/\Delta D_{n50} = 1.3$.

Voor een negatief afnemend vrijboord is het verloop wat minder gemakkelijk te voorspellen. Wel is duidelijk dat de stabiliteit steeds toe zal blijven nemen met een afnemend vrijboord tot nul. Verder wordt de stabiliteit nooit oneindig groot omdat er met een zeer kleine D_{n50} altijd nog wat transport zal optreden. Beide trends duiden op een scheve asymptoot.

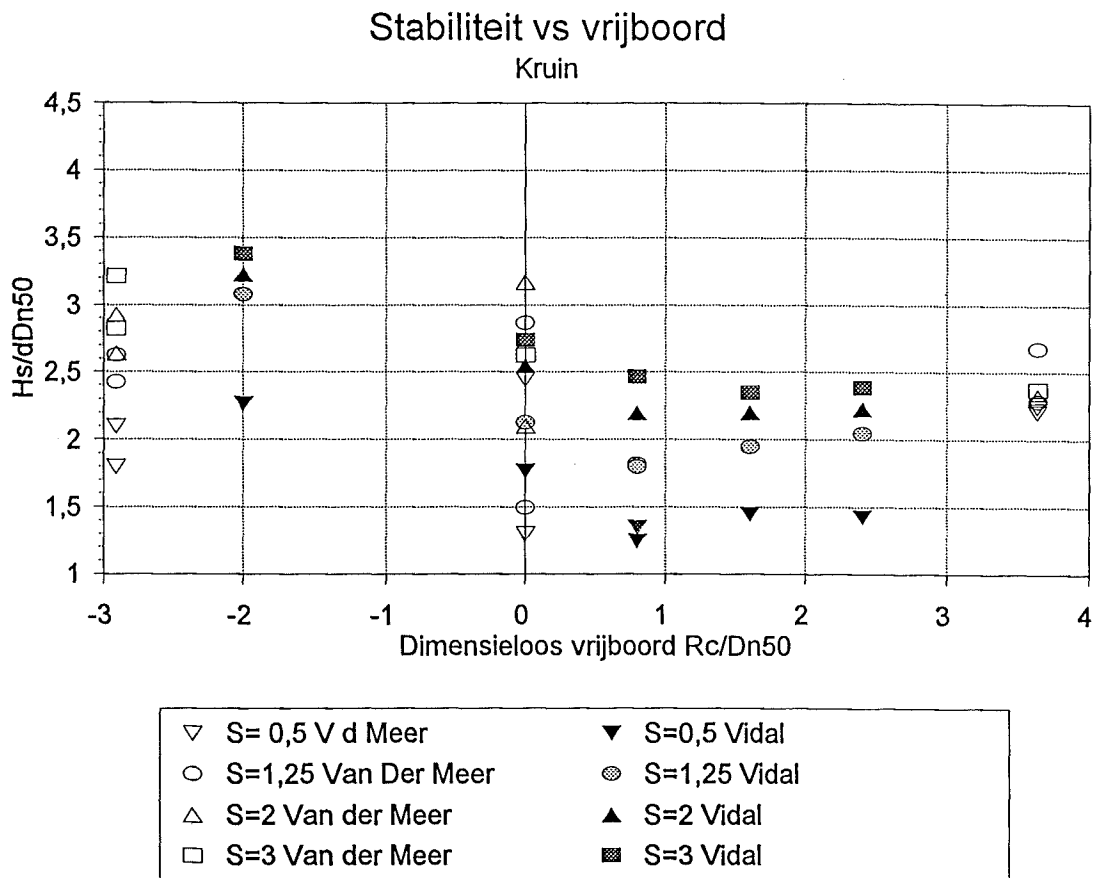


Figuur 6.2: Stabiliteit voorzijde Vidal en Van der Meer voor ontwerp schade

6.2.2 Stabiliteit kruin

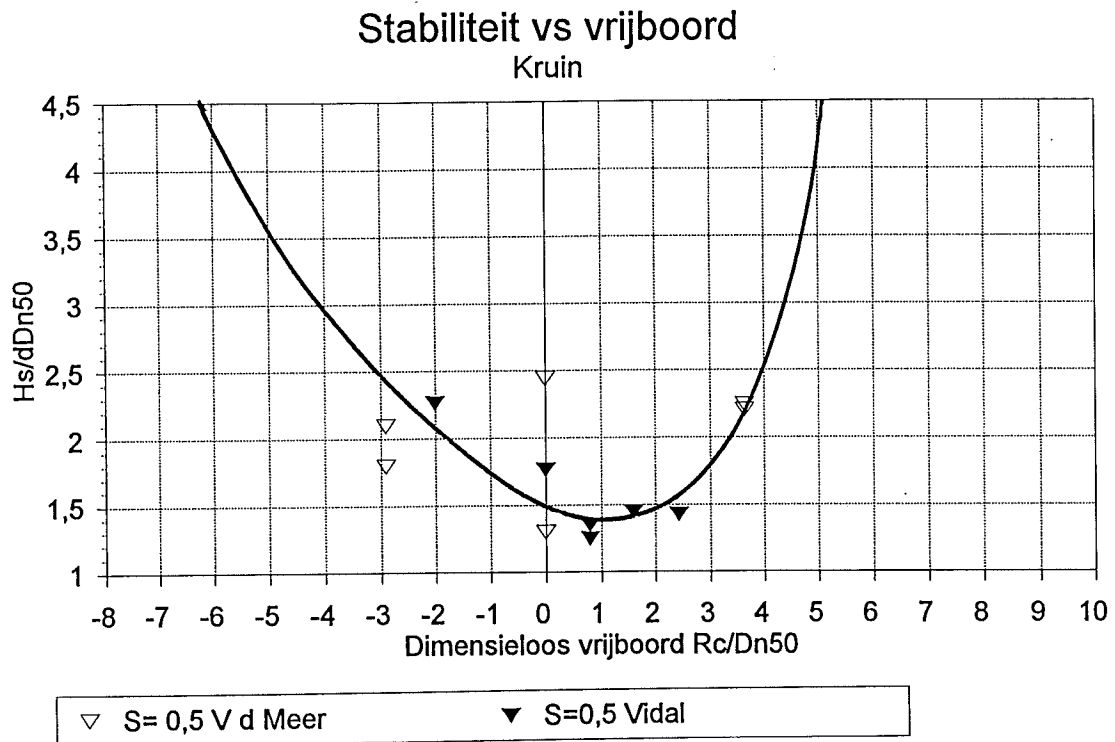
Zoals aangegeven in § 4.1 kunnen de waarden voor de stabiliteit die Vidal heeft gegeven niet zonder meer worden gebruikt voor de vergelijking met de proeven van Van der Meer, aangezien hij een andere definitie voor de kruin heeft gehanteerd. In de nu volgende vergelijking zijn de gegevens van Vidal gecorrigeerd door van de schade voor de totale sectie die van het voor- en achtertalud af te trekken. Op deze manier blijft dus slechts de waarde voor de schade van de kruin volgens de definitie van § 3.1.1 over (zie bijlage A2).

De punten voor de kruin in grafiek 6.3 liggen minder goed bij elkaar dan die van de voorzijde. Vooral met de kruinhoogte gelijk aan het waterniveau is er nogal wat verschil in de gegevens. Globaal is de trend echter wel duidelijk en ook te verklaren. Vanuit een positief vrijboord gezien neemt de stabiliteit af bij het dalen van het vrijboord tot een minimum voor ca $1 \times D_{n50}$. Daarna neemt de stabiliteit weer toe omdat de golfenergie voor een gedeelte de kruin kan passeren.



Figuur 6.3: Stabiliteit kruin Vidal en Van der Meer voor vaste schadegetallen

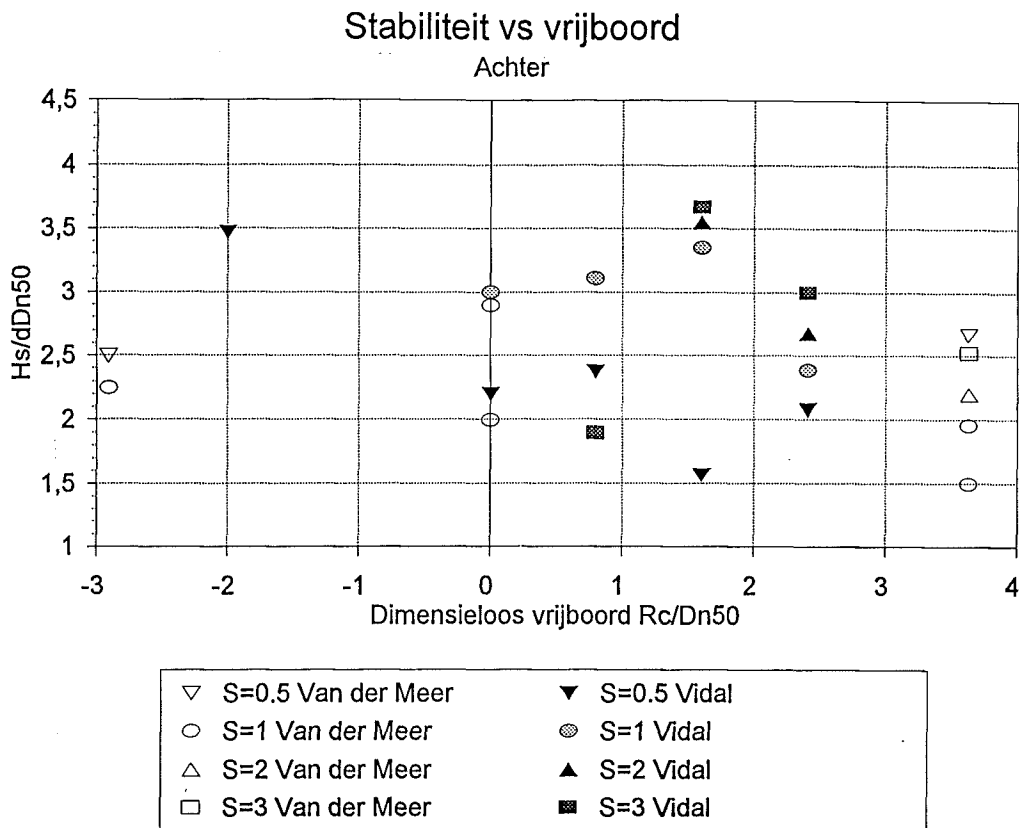
In figuur 6.4 is weer alleen de ontwerpschade van de kruin weergegeven, $S=0.5$. De kruin is voor de negatieve vrijboorden de meest kwetsbare sectie. Als we een asymptoot voor de positieve vrijboorden proberen vast te stellen, speelt de schade die wordt veroorzaakt door over de kruin schietend water een rol. Voor dit criterium is de kruinhoogte maatgevend. Voor een doolattende constructie zoals die van Vidal en Van der Meer is de maximale runup $2 H_s$ [Van der Meer 1993]. Voor de onderzochte proeven staat dit gelijk aan $5 D_{n50}$. Bij deze waarde van R_c is de stabiliteit dus nagenoeg oneindig. Voor de negatieve vrijboorden geldt hetzelfde als voor de voorzijde, namelijk dat de stabiliteit naar een scheve asymptoot zal tenderen. Wel is de kruin wat gevoeliger is voor schade omdat hij dichterbij het waterniveau ligt.



Figuur 6.4: Stabiliteit kruin Vidal en Van der Meer voor ontwerpschade

6.2.3 Stabiliteit achtertalud

Voor het achtertalud zijn de gegevens divers (figuur 6.5). Waarschijnlijk hebben de verschillende parameters die de beide onderzoekers hebben gebruikt een redelijk groot effect op de schade-ontwikkeling van de achterzijde.



Figuur 6.5: Stabiliteit Vidal en Van der Meer voor vaste schadegetallen

Als we in figuur 6.6 een asymptoot proberen te vinden voor het positieve vrijboord, kunnen we stellen dat de achterzijde niet meer wordt aangevallen als er gaan water meer over de kruin komt. Dit is bij een kruinhoogte van $5 D_{n50}$ (zie kruin). De asymptoot vabn de negatieve vrijboorden zal weer een scheve zijn.

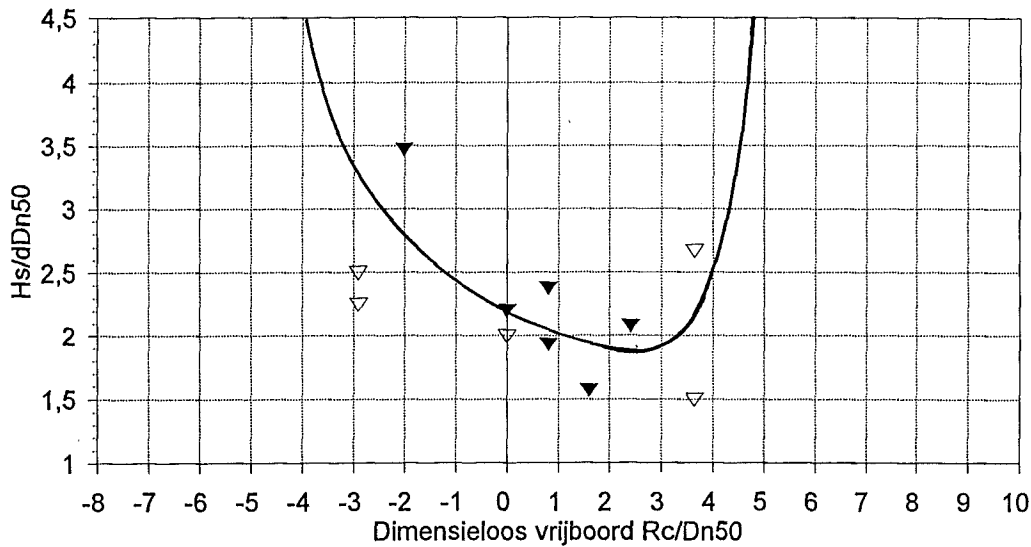
Verder zien we dat bij een kruinhoogte van ca. $3 D_{n50}$ er een knik in de lijn optreedt. Deze doet vermoeden dat er hier sprake is van een discontinuïteit in het stabiliteitsverloop. Als we de doorsneden van de betreffende proeven bekijken (figuur 6.7) zien we dat bij dezelfde golfhoogten een geheel ander beeld in de vervorming van de constructie optreedt.

Bij proef 20 wordt de voorzijde zodanig aangevallen dat er aan de achterzijde een extra hoeveelheid materiaal wordt gedeponeerd. Bij proef 16 is er over de gehele constructie minder schade, maar aan de achterzijde treedt ook enige

schade op. Blijkbaar is de energie hier beter verdeeld gedissipeerd over de constructie. De wijze van energie-dissipatie hangt af van de golfsteilheid. Bij proef 16 was de golfsteilheid 0,015, terwijl deze bij proef 20 $s=0,025$ bedroeg.

Stabiliteit vs vrijboord

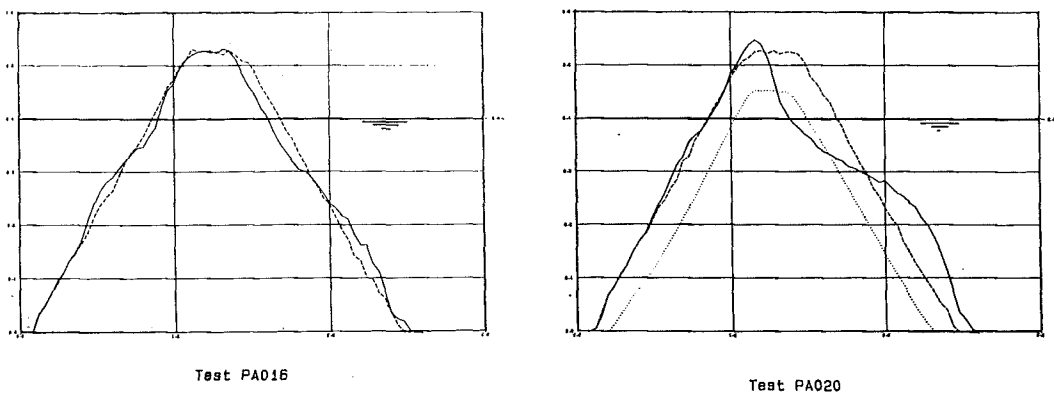
Achter



▽ S=0.5 Van der Meer ▼ S=0.5 Vidal

Figuur 6.6: Stabiliteit achterzijde Vidal en Van der Meer voor ontwerpschade

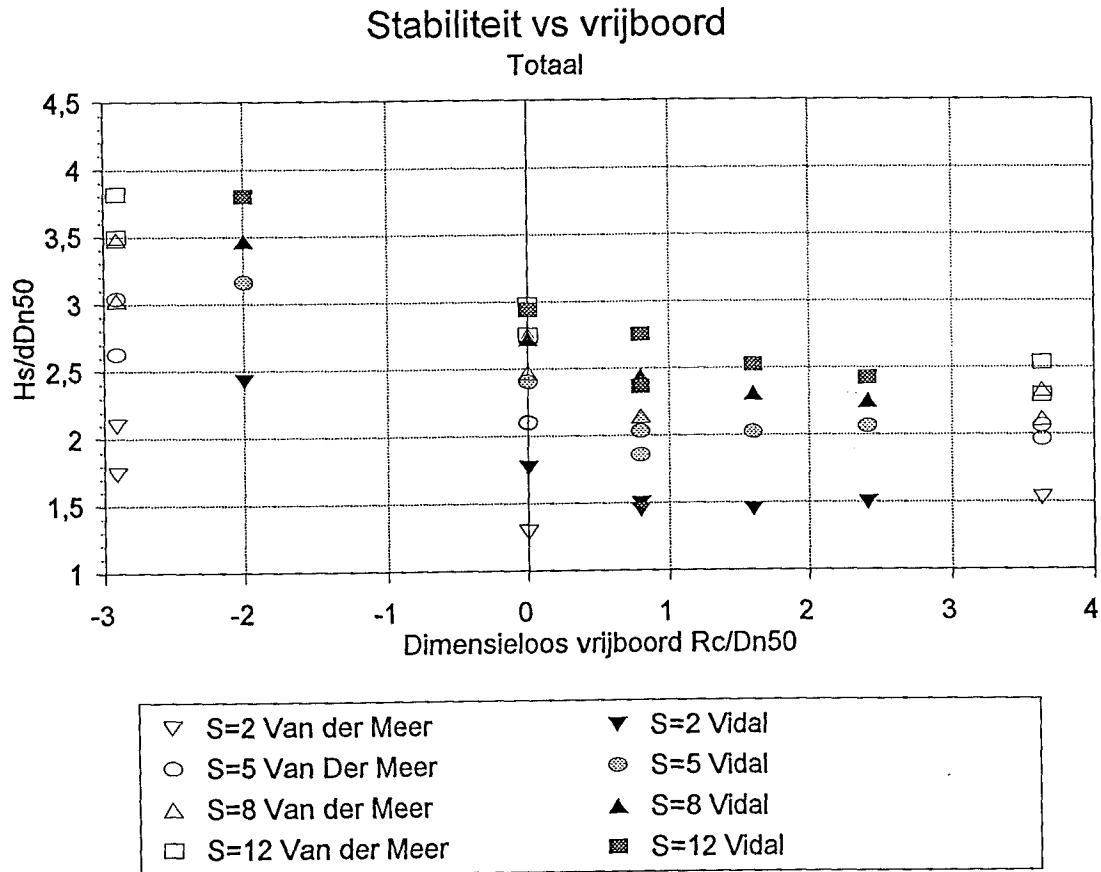
Beide proeven hadden een golfhoogte van 15 cm. Kennelijk is de stabiliteit van de achterzijde dus sterk afhankelijk van de golfsteilheid en kan een langere golf gemakkelijker de achterzijde aanvallen. Hier spelen ook nog een aantal andere parameters een rol, zoals de breedte van de kruin en de hellingshoek van het voortalud. Deze laatste werden niet gevarieerd.



Figuur 6.7: Doorsneden proeven 16 en 20

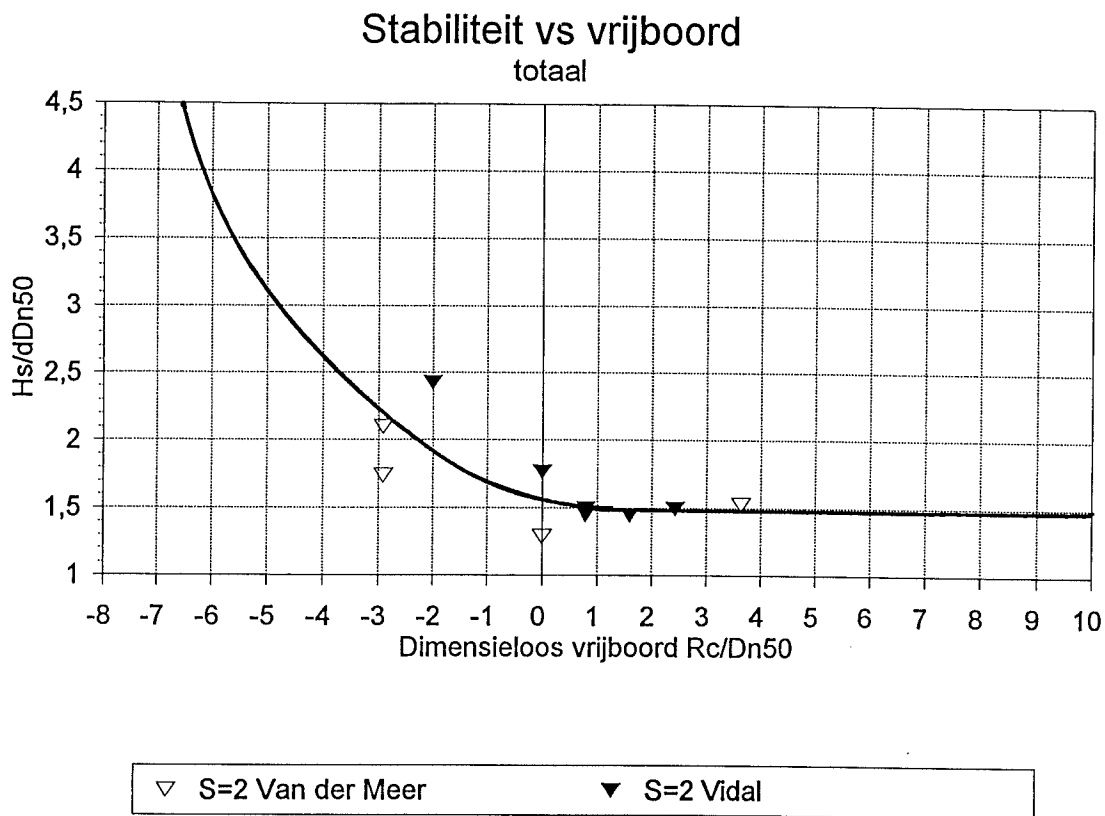
6.2.4 Totale stabiliteit

Voor het totaal komen de stabiliteitsgetallen vrij goed overeen. Alleen voor het negatieve vrijboord liggen de waarden van de Van der Meer proeven weer wat lager (figuur 6.8).



Figuur 6.8: Stabiliteit totaal Vidal en Van der Meer voor vaste schadeniveaus

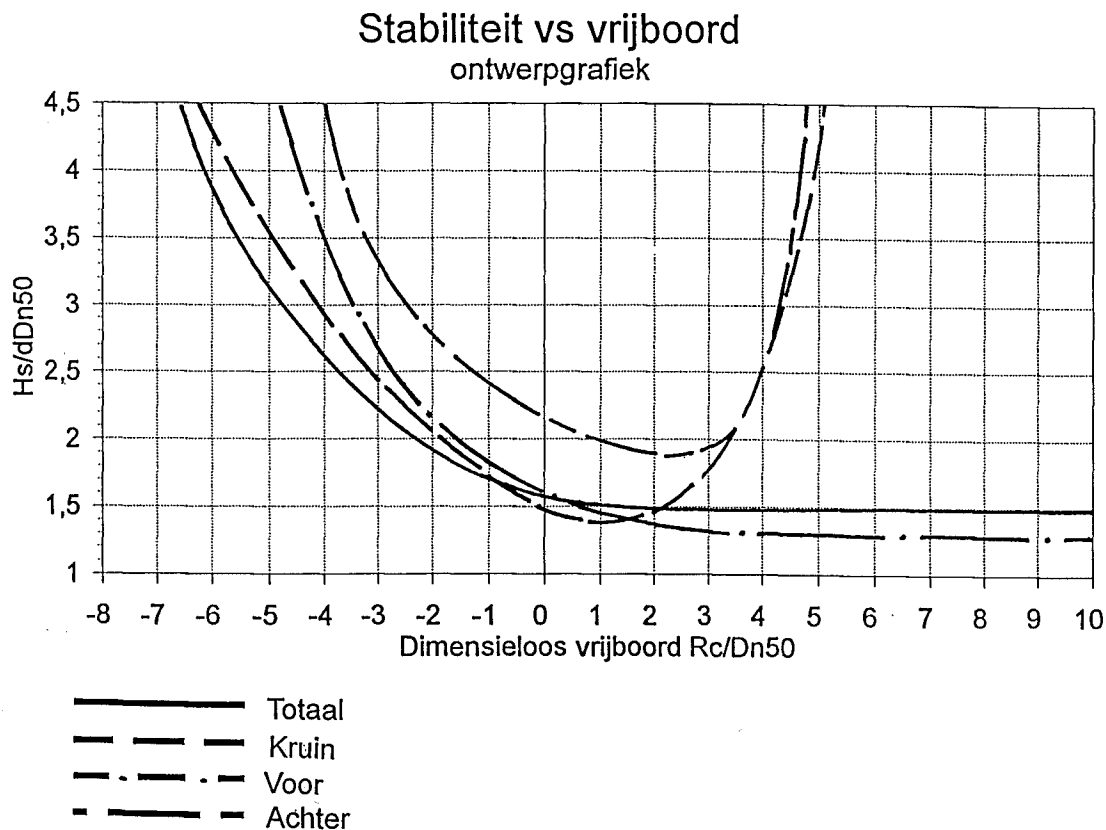
Voor de totale constructie kunnen we voor het positieve vrijboord de stabiliteit volgens het Van der Meer model uitrekenen. De waarde van $H_s/\Delta D_{n50}$ is dan 1.5, deze horizontale asymptoot sluit goed aan bij de proefgegevens van zowel Vidal als Van der Meer (figuur 6.9). Ook hier geldt voor de waarde van de stabiliteit bij een negatief vrijboord, dat deze blijft toenemen bij afnemend vrijboord.



Figuur 6.9: Totale stabiliteit Vidal en Van der Meer voor ontwerpschade

6.3 Ontwerpgrafiek

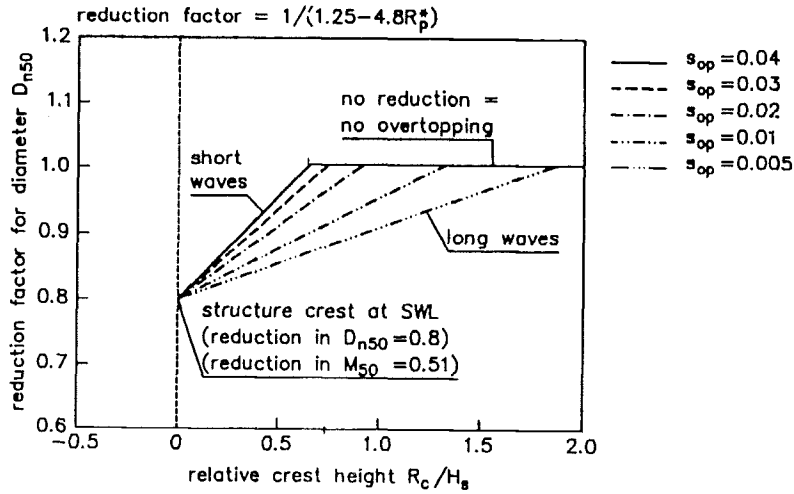
In figuur 6.10 is het stabiliteitsgedrag van de in de voorgaande paragrafen besproken secties en voor de totale constructie in één grafiek gezet. Dit is gedaan voor de gekozen schadegetallen. Opvallend is dat de achterzijde nooit maatgevend is. De maatgevende secties zijn de kruin en de voorzijde. De kruin is maatgevend van een kruin onder water tot een kruinhoogte van 1 à 2 D_{n50} , hierboven is de voorzijde de minst stabiele sectie.



Figuur 6.10: Ontwerpgrafiek

Het verloop van de stabiliteiten zoals weergegeven in deze grafiek geldt voor de ontwerpcondities zoals gebruikt door Vidal en Van der Meer: Een taludhelling van 1:1.5 tot 1:2 en een kruinbreedte van 6 tot 8 D_{n50} .

We vergelijken het gedrag van de gehele constructie nu met de reductie op de D_{n50} zoals voorgesteld door van der Meer. Het valt nu op dat de stabiliteit van de constructie niet toeneemt voordat de kruin rond het water-niveau is gedaald. De reductie (zie figuur 6.11) lijkt dus niet op te gaan indien de schade van de gehele constructie in ogenschouw wordt genomen.



Figuur 6.11: Reductie D_{n50} voor lage golfbrekers

Deel B

**Model-onderzoek naar invloed steenvorm en
gradatie op stabiliteit lage golfbrekers**

7 Aanleiding en doel onderzoek

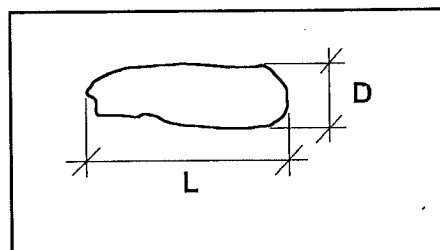
De bouw van een golfbreker vergt veel materiaal. Dit materiaal kan bestaan uit betonnen elementen of stortsteen. In het geval van de betonnen elementen, zoals tetrapodes, dolossen of kubussen, wordt ieder element afzonderlijk gefabriceerd en zullen de elementen onderling niet of nauwelijks van elkaar verschillen. In het geval dat er bij de bouw van een golfbreker stortsteen wordt toegepast ligt dit heel anders. De stortsteen zal moeten worden aangekocht bij een steengroeve. Deze steengroeve zal de vereiste hoeveelheid moeten springen uit een rotswand. Men kan over de afmetingen die de gesprongen rots uiteindelijk zal krijgen slechts een voorspelling doen aan de hand van de eerder gevonden zeefkrommen van de groeve-output. De afmetingen van de stenen kunnen verschillen van enkele centimeters tot enige meters in diameter. Verder kan het zo zijn dat de dichtstbijzijnde groeve door de daar aanwezige rotsstructuur niet de beste stenen levert, maar dankzij de kleine afstand wel de goedkoopste.

De stenen die worden gebruikt bij de bouw moeten voldoen aan een aantal eisen. Deze eisen vallen uiteen in twee delen: vorm en gradatie [CIRIA/CUR, 1991].

Vorm

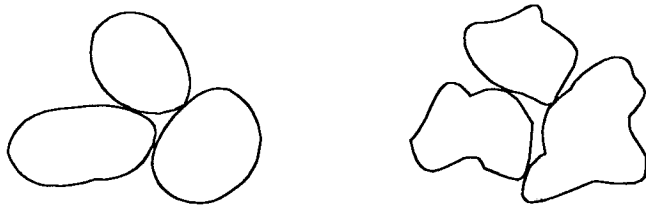
Een maat voor de vorm van een steen is de L/D verhouding (zie figuur 7.1). In dit verhoudingsgetal is L gedefinieerd als de maximale lengte tussen twee punten op de steenomtrek. D wordt bepaald door de minimale afmeting tussen twee vlakke, parallelle platen waar tussen de steen nog net kan passeren. Een steen met een L/D verhouding van 1 is dus nagenoeg een kubus, een L/D van 3 geeft aan dat de steen relatief langwerpig/plat is.

De hoeveelheid stenen met een hoge L/D waarde moet binnen bepaalde percentages van de totale hoeveelheid steen liggen. Een norm voor deze eis is dat het percentage stenen met een L/D verhouding tussen 1 en 2 niet minder dan 50 procent mag zijn, terwijl er helemaal geen stenen met $L/D > 3$ mogen voorkomen [CIRIA/CUR, 1991]. Voldoet de groeve niet aan deze eis, dan kan een deel van de output niet worden gebruikt, hetgeen inhoudt dat de goede stenen moeten worden geselecteerd. Dit kost extra inspanning en dus geld.



Figuur 7.1: Steenvorm L/D

Een ander vormeis is dat de stenen hoekig moeten zijn (zie figuur 7.2.) om zo de stabiliteit te kunnen waarborgen.



Figuur 7.2: Ronde en hoekige steen

Gradatie

Ook aan de gradatie worden vaak strikte eisen gesteld. De waarde van D_{85}/D_{15} mag niet boven ca 2.0 komen. Dit houdt in dat de groeve een gelijkvormig en uniform materiaal moet produceren.

Bovengenoemde eisen leveren, zowel vertraging als een kostentoeename van de bouw op. Merkwaardig is echter dat geen van de eisen voldoende is getest om deze eisen ook daadwerkelijk hard te kunnen maken. Wel is voor de gradatie al door een aantal onderzoekers vastgesteld [Van der Meer 1988, Allsop 1991] dat, binnen redelijke grenzen ($D_{85}/D_{15} < 2.5$), de gradatie een te verwaarlozen invloed op de stabiliteit heeft, maar voor lage golfbrekers is dit nog niet onderzocht.

Het doel van dit onderzoek is dan ook het vaststellen van de invloed van de vorm (L/D en hoekigheid) en gradatie op de stabiliteit van lage golfbrekers. Hiervoor zijn gedurende 6 weken een aantal proeven gedaan bij het Waterloopkundig Laboratorium "De Voorst". De opzet en resultaten van deze proeven worden in de volgende hoofdstukken besproken.

8 Uitvoering proeven

8.1 Steensoort en gradatie

Om de invloed van de drie parameters op de stabiliteit te kunnen bepalen zijn deze zoveel mogelijk onafhankelijk van elkaar gevarieerd. In het totaal werden 6 steensoorten getest (zie tabel 8.1).

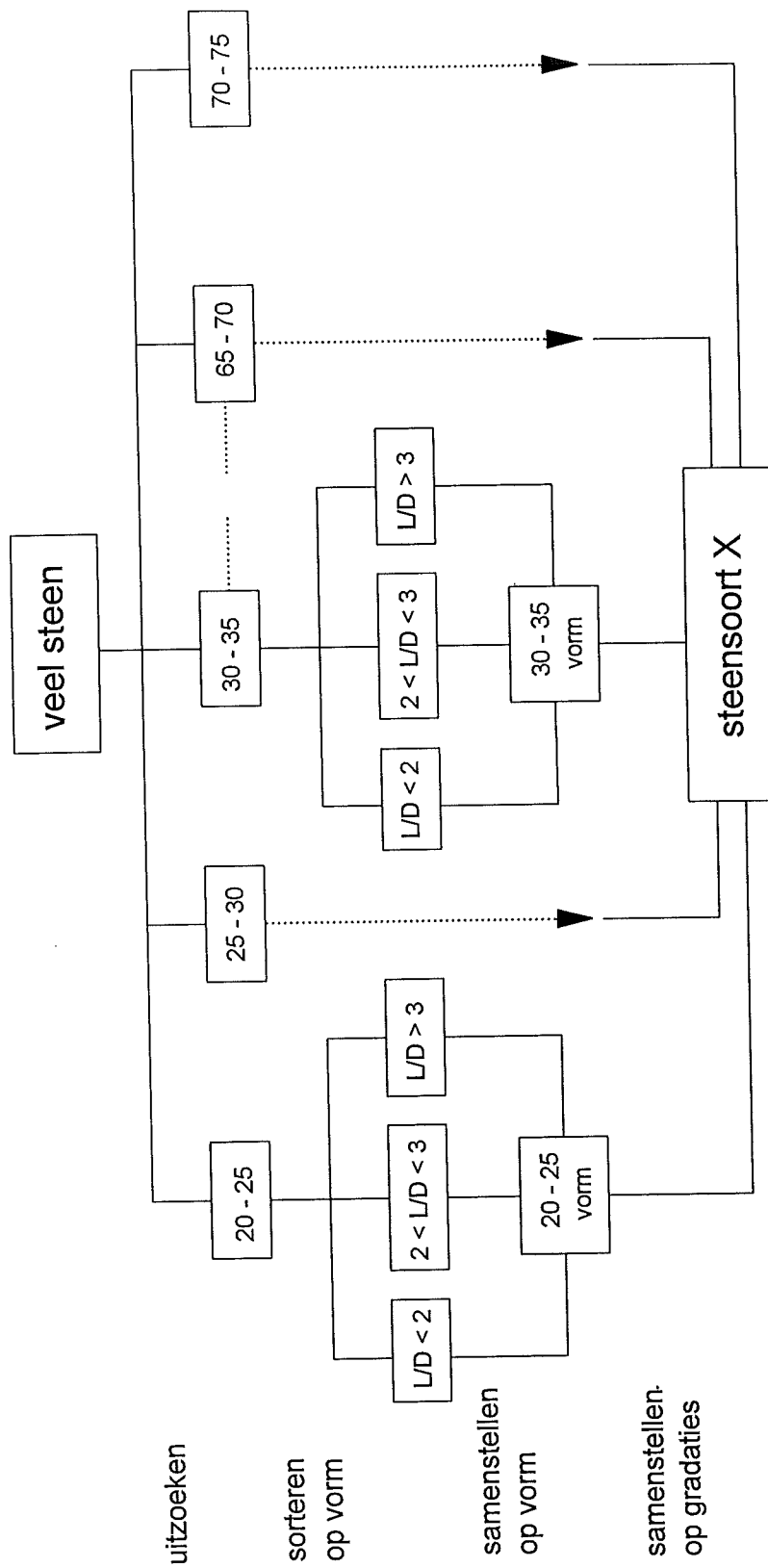
Soort nr.	Omschrijving	D_{85}/D_{15}	$L/D \geq 2$	$L/D \geq 3$
		[-]	[%]	[%]
1	hoekig	1.25	20	0
2	hoekig	1.75	20	0
3	hoekig	2.50	20	0
4	hoekig	1.75	50	15
5	hoekig/plat	1.75	80	40
6	afgerond	1.75	50	15

Tabel 8.1: Steensoorten

Bij de eerste drie steensoorten is de steenvorm constant gehouden en is de gradatie gevarieerd. Bij de steensoorten 4 en 5 is de steenvorm gevarieerd bij een constante gradatie. Tenslotte is bij steensoort 6 afgerond materiaal gebruikt, met eenzelfde steenvorm en gradatie als bij test 4. Foto's van de steensoorten zijn opgenomen in bijlage B2.

De onderling te vergelijken steensoorten zijn dus de volgende: 1, 2 en 3 voor de invloed van de gradatie; 2, 4 en 5 voor de invloed van de steenvorm en 4 en 6 voor de invloed van de hoekigheid.

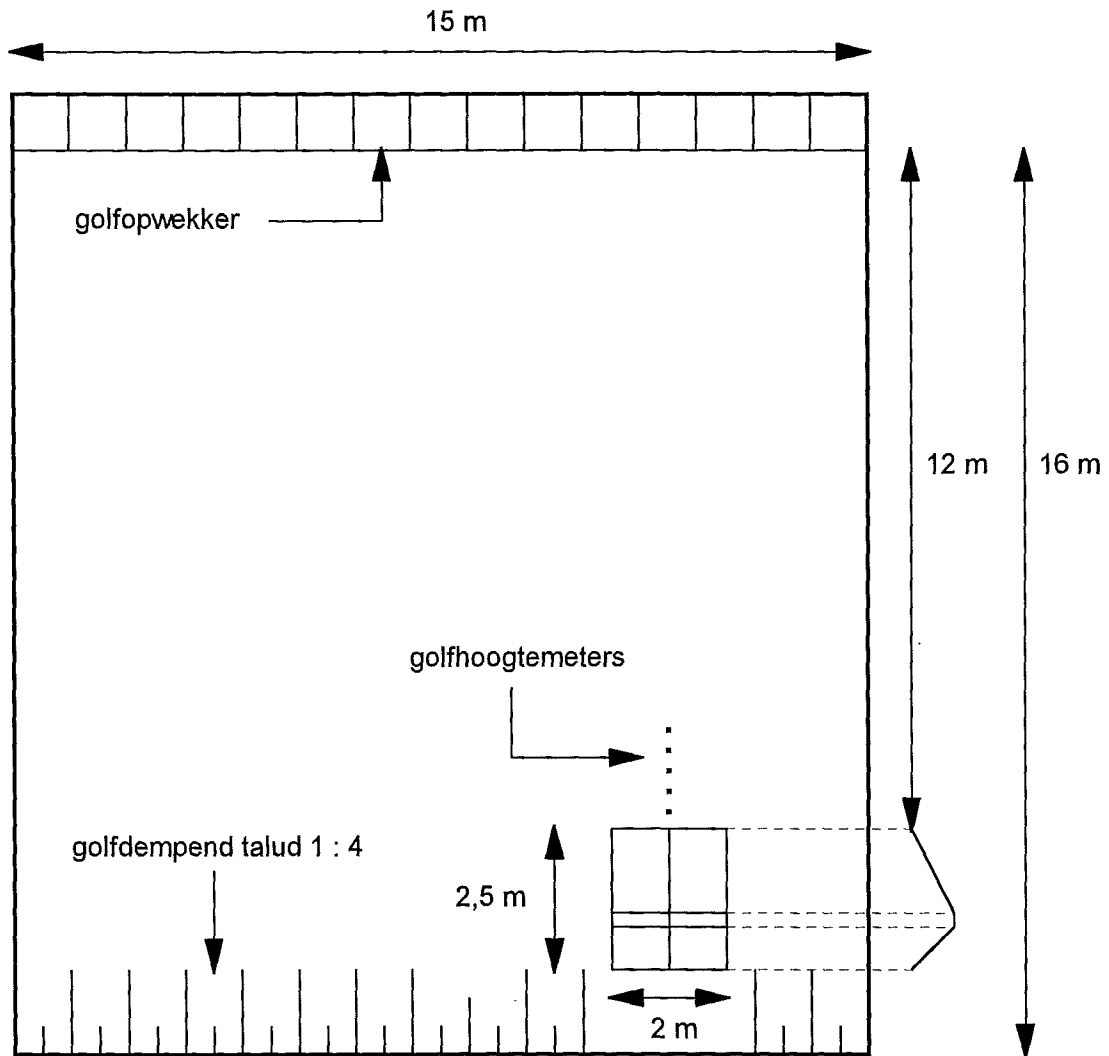
Het samenstellen van de diverse steensoorten ging als volgt in zijn werk: Uit een grote hoeveelheid porfier steen met afmetingen van 20 tot 80 mm werden fracties per 5 mm gezeefd (20-25, 25-30, 30-35, etc). Vervolgens werden deze fracties uitgesorteerd op vorm, in drie categorieën: $L/D < 2$, $2 < L/D < 3$ en $L/D > 3$. Hierna werden de uitgesorteerde hoeveelheden in de vereiste hoeveelheden weer bij elkaar gevoegd. Zo ontstonden per fractie maximaal 3 vorm-samenstellingen, die op hun beurt weer werden samengevoegd volgens de juiste gradatie (zie figuur 8.1). De zeefkrommen zijn opgenomen in bijlage B1



Figuur 8.1: Vormsamenstelling

8.2 Proefopstelling

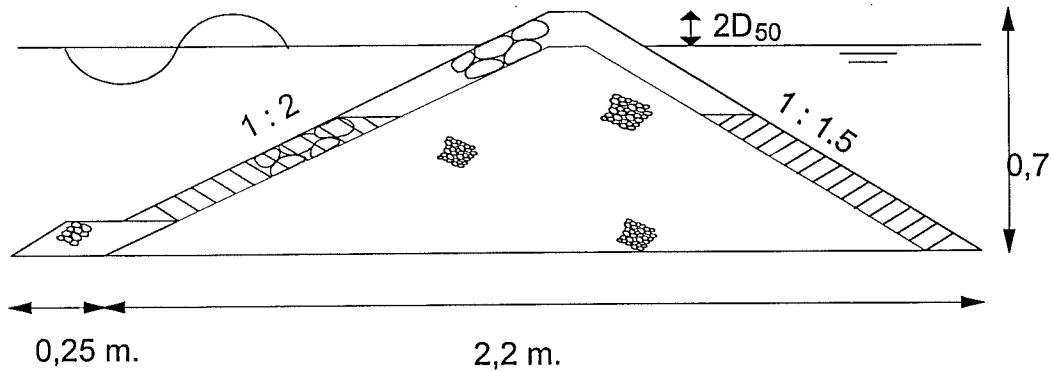
De proefopstelling volgens figuur 8.2 werd gebouwd in de Scheldebak van het Waterloopkundig Laboratorium "De Voorst". De afmetingen van de bak waren ca. 15x16 m. de golfopwekker stond op ca. 12 m van de constructie. In de bak werden twee doorsneden van 1 m breed tegelijkertijd getest.



Figuur 8.2: Proefopstelling

De gekozen doorsnede van de golfbreker is weergegeven in figuur 8.3. Het bovenste gedeelte van de constructie bestaat uit het te testen materiaal. Het gearceerde gedeelte daaronder werd gebouwd van uniform materiaal met dezelfde D_{n50} als die van het te testen materiaal. Dit materiaal werd gedurende de proeven niet vervangen omdat het op een diepte lag waarbij het niet of nauwelijks meer gevoelig zou zijn voor schade.

De golven vielen ten alle tijden loodrecht in en dempten aan het einde van de bak uit op een golfdempend-talud met een helling van ca. 1:4.



Figuur 8.3: Gekozen doorsnede

8.3 Proevenprogramma

Zoals reeds vermeld zijn er 6 verschillende steensoorten getest. Iedere steensoort werd getest met 6 verschillende golfhoogten voor 2 verschillende golfsteilheden. Per proef werd een lage en een hoge golf opgewekt, zodat er per steensoort 6 proeven (12 golven) nodig waren. Dit werd gedaan om onafhankelijke schaden te krijgen. De opbouw van één proef zag er als volgt uit:

- peiling 1 (0-peiling)
- 1000 golven (laag)
- peiling 2
- 1000 golven (hoog)
- peiling 3

Na een proef werd de bovenlaag steeds verwijderd en vervolgens weer aangebracht. In het totaal waren er per steensoort 6 proeven nodig (36), maar omdat er twee doorsneden tegelijkertijd werden getest kon dit aantal tot 18 beperkt blijven. Uitgangspunt voor deze opbouw van de proeven was dat de schade veroorzaakt door de eerste 1000 golven geen invloed zou hebben op de veel hogere tweede 1000 golven. Gesteld kan worden dat de schade die was opgetreden bij de lage golven reeds was ontstaan bij een klein aantal van de hogere golven.

De golven werden opgewekt m.b.v. een Johnswap-spectrum ($\gamma = 3.3$). Uiteindelijk zijn de volgende golfhoogtes toegepast:

Steensoort	s [-]	H_s [cm]
1&2	0,02	7,1 10,0 12,4 14,4 17,0 17,8
1&2	0,04	7,4 9,5 12,2 13,5 16,2 18,3
3&4	0,02	7,8 10,1 11,9 14,0 16,0 18,4
3&4	0,04	8,4 10,2 12,0 14,3 16,0 18,1
5&6	0,02	5,9 8,0 10,2 12,0 14,2 16,0 18,8
5&6	0,04	5,9 8,1 10,1 12,2 14,3 16,0 18,2

Tabel 8.2: Uitgevoerde proeven

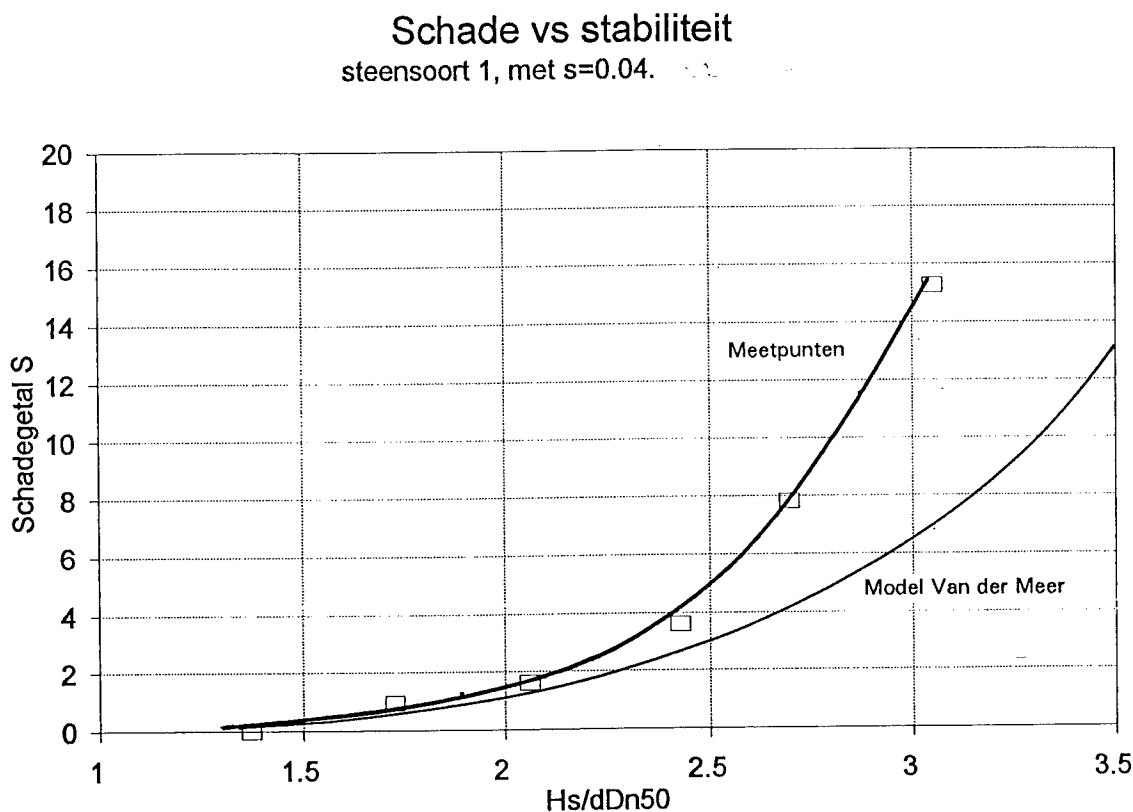
Na iedere golfhoogte werd een peiling verricht zodat de schade die door de betreffende golven werd veroorzaakt bekend was. Het is nu mogelijk per steensoort en per golfsteilheid de schade tegen de stabiliteit uit te zetten.

Per sectie van één meter werden vier peilingen verricht. Er werd iedere 3.9 cm een peilstok op de constructie gezet. De onderzijde van de peilstokken hadden een circelvormige ronding met een straal van $0.5 D_{50}$. Na afloop werden de vier peilingen gemiddeld.

9 Resultaten en interpretatie

9.1 Vergelijking resultaten met model Van der Meer

In figuur 9.1 is voor steensoort 1 de gemeten schade tegen de stabiliteit uitgezet. In deze figuur is ook de theoretische stabiliteit, volgens het model Van der Meer zoals beschreven in § 3.2, getekend (onderste lijn). Het valt op dat de voorspelling volgens dit model te laag is. Dit bleek consequent voor alle proeven zo te zijn (zie bijlage B3).



Figuur 9.1: Resultaten en theorie

De reden hiervoor is dat Van der Meer bij het opstellen van zijn theorie voor lage golfbrekers van hetzelfde schadegebied is uitgegaan als bij de theorie voor hoge golfbrekers. Bij de proeven met hoge golfbrekers, die Van der Meer als basis voor zijn theorie heeft gebruikt, ontstond de schade voornamelijk aan de voorzijde en soms aan de kruin. Bij de bepaling van de schade bij deze proeven heeft Van der Meer zich dan ook beperkt tot het gebied van de voorzijde en de voorste helft van de kruin (zie figuur 3.4). Voor de theorie voor hoge golfbrekers is dit geoorloofd omdat er zo weinig overslag is dat er aan de achterzijde nauwelijks of geen schade zal optreden. Voor lage golfbrekers is dit echter niet het geval. Bij

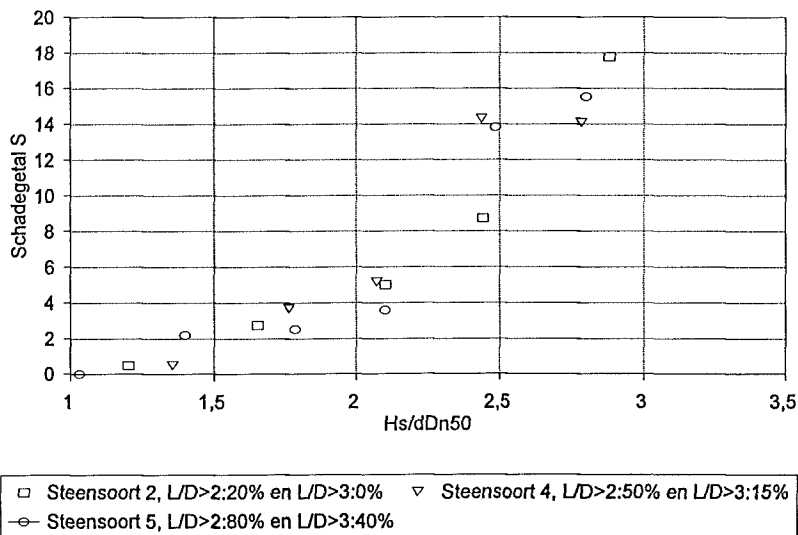
deze constructies is er zoveel overslag dat de schade aan de achterzijde niet meer kan worden verwaarloosd. De verhoogde stabiliteit die het van der Meer model te zien geeft wordt dan ook veroorzaakt door het niet meerekenen van de schade aan de achterzijde en de achterste helft van de kruin.

9.2 Invloed steenvorm op stabiliteit

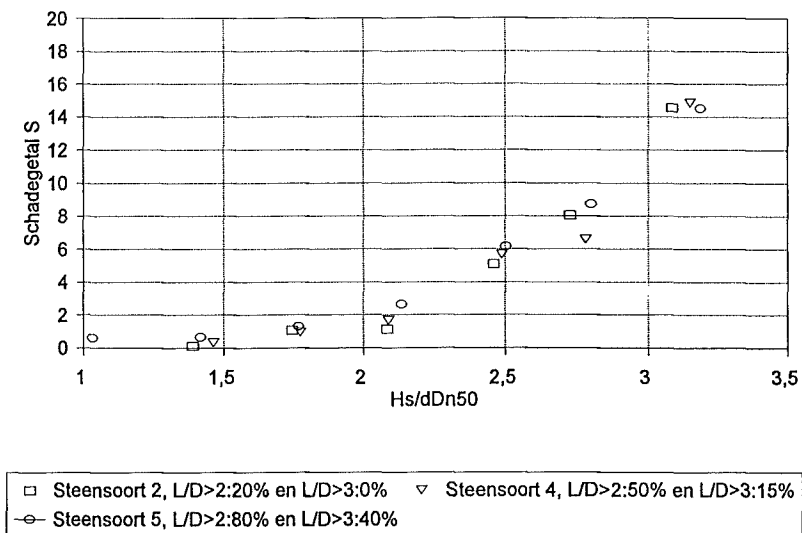
Invloed L/D

De invloed van de steenvorm is nauwelijks terug te vinden in de resultaten (figuur 9.3). Vooral bij de golfsteilheid van 0.04 vallen de 3 proeven nagenoeg over elkaar; de resultaten liggen nagenoeg op één lijn. Bij $s=0.02$ is tot een schade van $S=4$ geen verschil te ontdekken, iets daarboven is het uniformere materiaal stabiel ($H_s/\Delta D_{n50} = 2.4$). Bij een nog hoger stabiliteitsgetal is dit juist weer het minst stabiele materiaal.

Invloed vorm, met $s=0.02$
en $D_{85}/D_{15}=1.75$



Invloed vorm, met $s=0.04$
en $D_{85}/D_{15}=1.75$



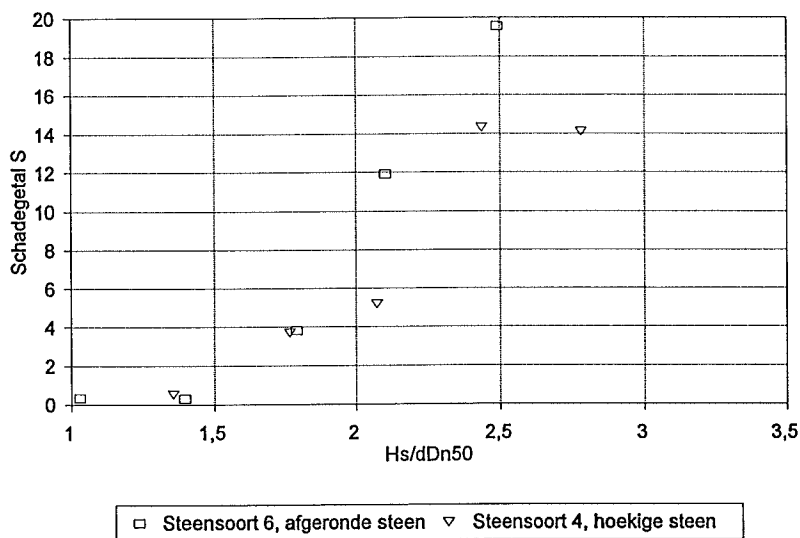
Figuur 9.3: Invloed vorm L/D op stabiliteit

Invloed hoekigheid

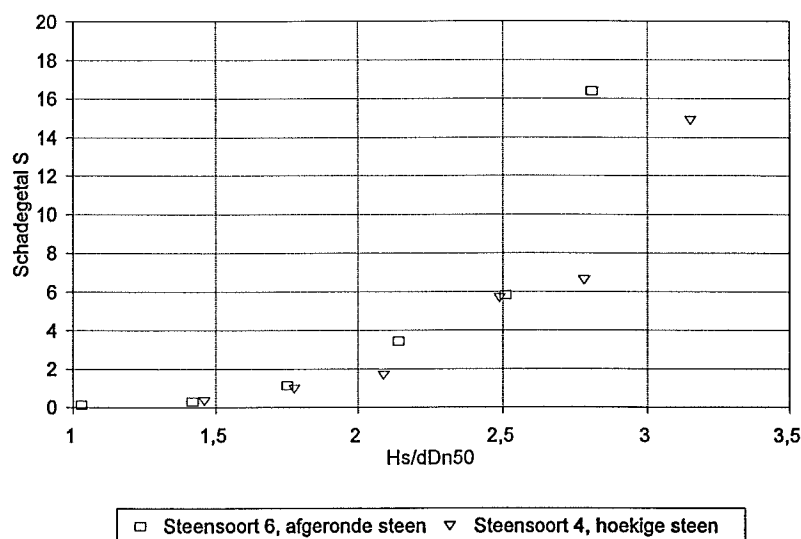
De invloed van hoekigheid op de stabiliteit van de bovenlaag is groter dan die van L/D verhouding (zie figuur 9.4). Steensoort 6 is samengesteld uit rond grind (zie tabel 8.1). Het is dan ook verbazingwekkend dat hier tot de ontwerpschade nauwelijks enig verschil is te ontdekken!

Voor een golfsteilheid van $s=0.02$ vallen de stabiliteiten tot een schadegetal 4 exact over elkaar heen. Kennelijk gaat het materiaal niet zo gemakkelijk rollen als men zou verwachten. Gaat het echter eenmaal rollen dan is de ontwikkeling van schade ook zeer progressief in vergelijking tot het hoekige materiaal.

Invloed hoekigheid met $s=0.02$
en $L/D > 2:50\%$, $L/D > 3:15\%$



Invloed hoekigheid met $s=0.04$
 $L/D > 2:50\%$ en $L/D > 3:15\%$



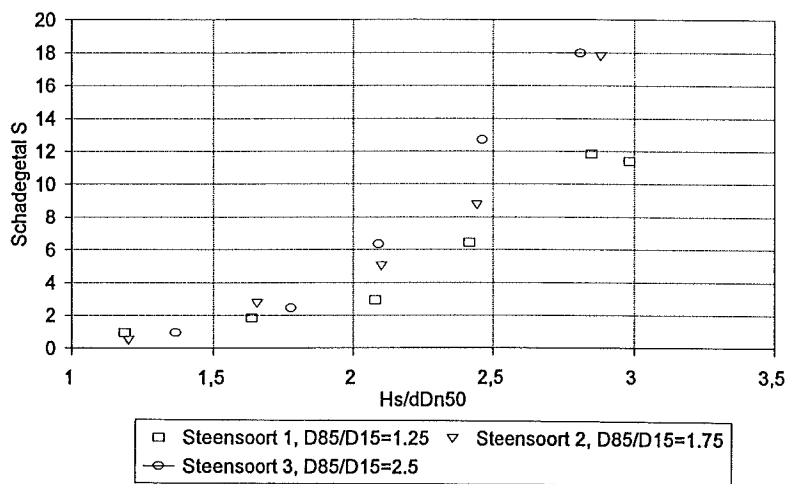
Figuur 9.4: Invloed hoekigheid op stabiliteit

9.3 Invloed gradatie op stabiliteit

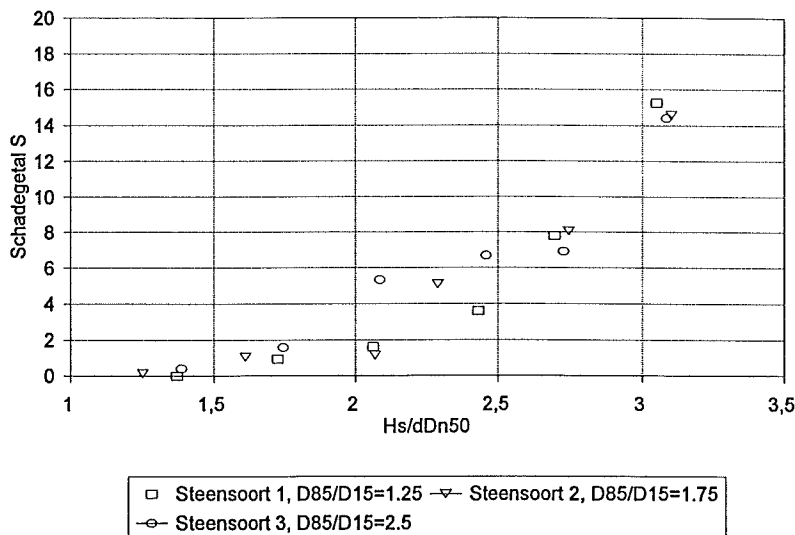
In de figuur 9.5 is voor de proeven 1, 2 en 3 de stabiliteit tegen de schadeontwikkeling uitgezet. Het valt op dat tot een schadegetal van ca. 2 er nauwelijks verschil in de schadeontwikkeling valt te ontdekken. Hierboven is bij een golfsteilheid van 0.04 wel een verschil in schadeontwikkeling te herkennen. Bij de kleinere steilheid is echter duidelijk een progressiever schadeverloop te ontdekken naarmate de golfhoogte toeneemt.

In het algemeen wordt er voor het ontwerp van een golfbreker een ontwerp-schade $S=2$ gehanteerd. Dit betekent dat het verschil in schadeontwikkeling boven $S=2$ nauwelijks van belang zal zijn.

Invloed gradatie met $s=0.02$
en $L/D > 2:20\%$, $L/D > 3:0\%$



Invloed gradatie met $s=0.04$
en $L/D > 2:20\%$, $L/D > 3:0\%$

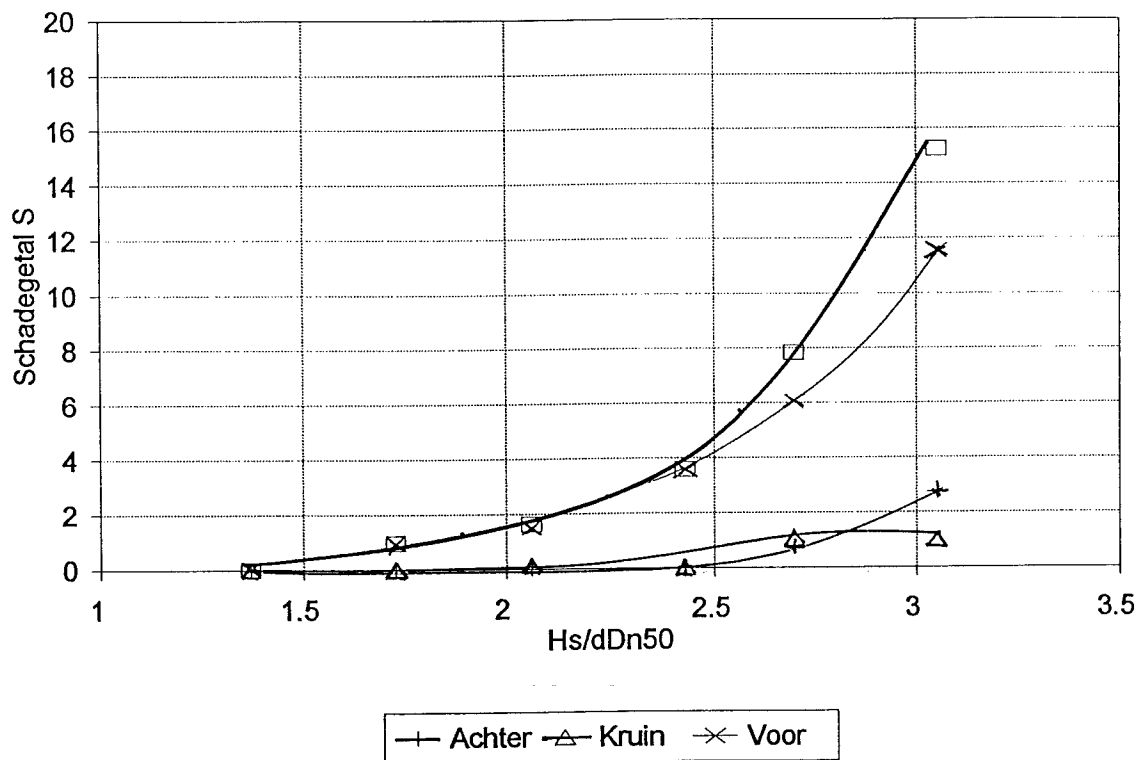


Figuur 9.5: Invloed gradatie op stabiliteit

9.4 Resultaten per sectie

De resultaten onder verdeeld naar sectie geven bij alle proeven hetzelfde resultaat. Aan de voorzijde ontstond de meeste schade, aan de kruin en achterzijde een stuk minder. Figuur 9.6 laat steensoort 1 met een golfsteilheid van 0.04 zien. De overige grafieken zijn opgenomen in bijlage B4.

Schade vs stabiliteit
steensoort 1, met $s=0.04$.



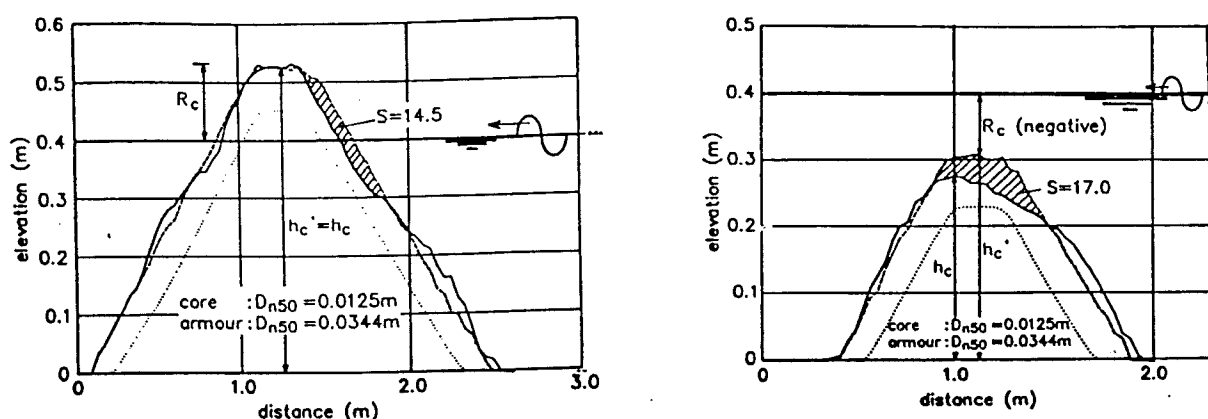
Figuur 9.6: Schadeverdeling over de secties proef 1 met $s=0.04$

10 Conclusies

10.1 Conclusies deel A

Proeven Van der Meer

Het vrijboord heeft een grote invloed op de stabiliteit van golfbrekers met een lage kruin. Vooral de stabiliteit van de verschillende secties (voor-, boven- en achterzijde) varieert sterk met deze parameter (figuur 10.1). Voor de stabiliteit van de constructie als geheel is deze invloed, binnen het onderzochte bereik van het vrijboord, minder.



De schade aan de voorzijde is nagenoeg altijd maatgevend. Voor een positief vrijboord en voor de kruin op swl. Slechts voor een negatief vrijboord en aanzienlijke schade ($S = 5$) is de kruin de minst stabiele sectie.

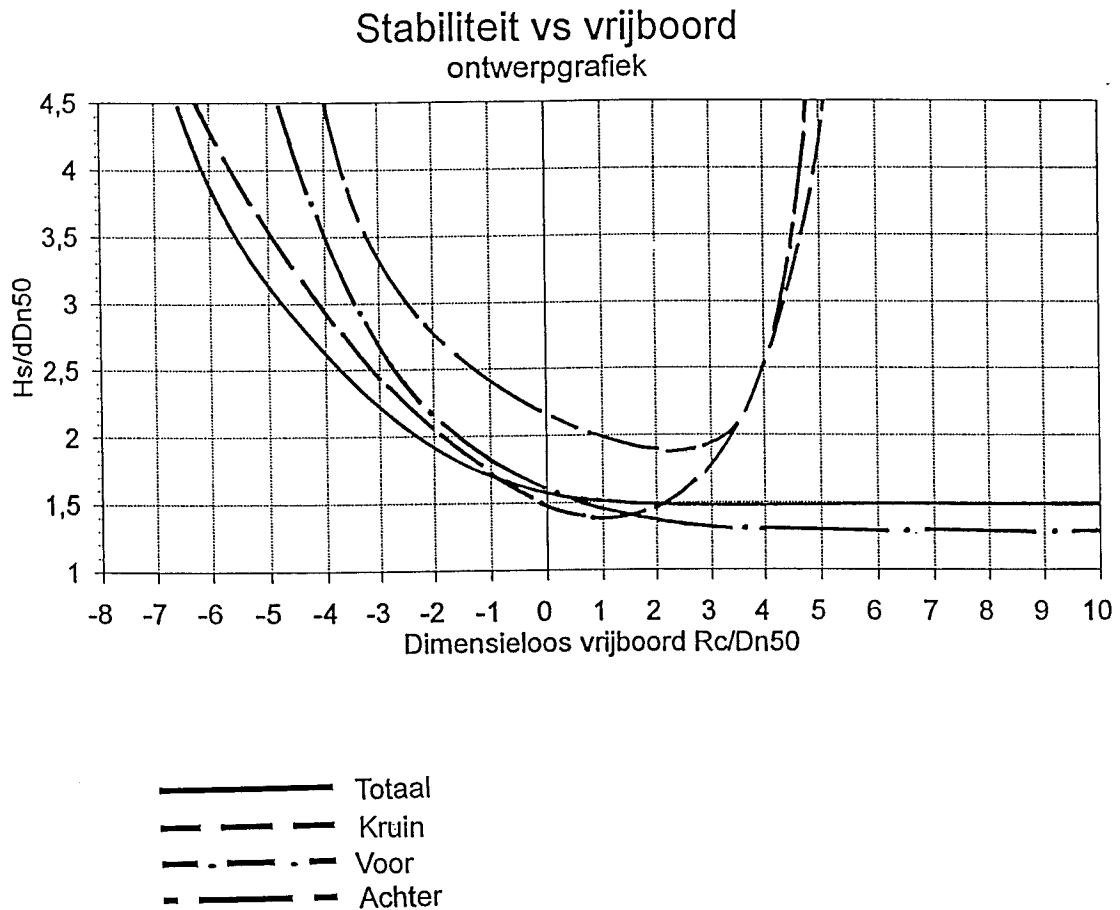
Door de invloed van de kruin varieert voor de totale sectie het vrijboord waarbij de minste stabiliteit optreedt met het schadeniveau. Voor lage schade domineert het vrijboord $R=0$ de stabiliteit, terwijl bij hogere schade het positieve vrijboord maatgevend is.

Voor de totale constructie is de invloed van de golfperiode minder dan die van het vrijboord. Meestal is de kleinste golfperiode (kortste golf) maatgevend. Voor de maatgevende secties bij een negatief vrijboord echter, is de langste golf maatgevend. Ook voor de gehele constructie is bij een laag schadeniveau de lange golf maatgevend.

Vergelijking proeven Vidal en Van der Meer

Over het algemeen komen de proefresultaten van Van der Meer en Vidal, rekening houdend met bij beide proeven structureel verschillende parameters zoals periode en kruinbreedte, redelijk goed overeen.

Het blijkt, nadat de gegevens van beide onderzoekers zijn gecombineerd tot een ontwerpgrafiek (figuur 10.2), dat de reductie op de D_{n50} zoals Van der Meer die voorstelt voor golfbrekers met een lage kruin niet opgaat. De stabiliteit blijft gelijk tot ongeveer een kruinhoogte gelijk aan de waterlijn. Pas met een kruin onder de waterlijn lijkt een reductie van de D_{n50} geoorloofd.



Figuur 10.2: Ontwerpgrafiek

De ontwerpgrafiek kan bijvoorbeeld als volgt worden gebruikt: Bij een gegeven ontwerpkuinhoogte van een golfbreker kan worden nagegaan wat de minst stabiele sectie is. Op grond hiervan kan bij de bouw een selectie in de stenen worden gemaakt door de wat zwaardere stenen bij de minst stabiele sectie toe te passen.

10.2 Conclusies deel B

De invloed van de materiaalfactoren van stortsteen, vorm en gradatie, blijken van weinig invloed op de stabiliteit van de bovenlaag van een lage golfbreker.

De invloed van de gradatie is het grootst (figuur 9.5). Een wijde gradatie ($D_{85}/D_{15} = 2.5$) zorgt boven een schadegetal van $S=2$ voor iets lagere stabiliteit dan een flauwe gradatie ($D_{85}/D_{15} = 1.25$). Tot de ontwerpschade van $S=2$ is tussen de beide stabiliteiten echter geen verschil te ontdekken.

De invloed van de hoekigheid van de stenen is tot een schadegetal van $S=4$ niet te ontdekken (figuur 9.4). Daarboven geeft de geteste ronde steen echter wel een zeer progressief schadeverloop.

De gevarieerde lengte-breedte verhouding van de stenen (L/D) geeft geen verschil in stabiliteit te zien (figuur 9.3). Een steensoort met relatief veel langwerpige/platte stenen is even stabiel als een meer gelijkvormige steensoort.

De materiaalfactoren zoals hierboven beschreven blijken dus nauwelijks aanleiding te geven voor het afkeuren van hoeveelheden steen. Het verdient dan ook aanbeveling in de toekomst bij (lage) golfbrekers minder strikt met deze eisen om te gaan dan dat heden het geval is. Met name voor de verschillen in lengte-breedte verhoudingen van de stenen kan dit een winst geven in tijd en te gebruiken materiaal. Hierbij kunnen zowel de opdrachtgever als de aannemer voordeel bij hebben.

Literatuur

d'Angremond, K., (1994). Breakwater design, Colledictaat F5, Faculteit der Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft.

Bradbury, A.P., Latham J.P., Allsop N.W.H., (1990). Rock armour stability formulae-influence of stone shape and layer thickniss, capter 108, proc. 22nd International Coastal Engineering Conference, Am. Soc. Civ. Engrs.

CUR/CIRIA Manual (1991). Manual on the use of rock in costal and shoreline engineering, CUR report 154, Gouda, the Netherlands. CIRIA special publication 83, London, United Kingdom.

Wallingford Hydraulics Research (1989). Rock armouring for coastal and shoreline structures: hydraulic model studies on the effects of armour grading, report EX 1989, Wallingford.

Kobayashi, N., Wurjanto A., Cox, D.T. (1990). Rock slopes under irregular wave attack, chapter 98, proc. 22nd International Coastal Engineering Conference, Am. Soc. Civ. Engrs.

Meer, J.W. van der, (1988). Rock slopes and gravelbeaches under wave attack, proefschrift T.U. Delft.

Meer, J.W. van der, (1990). Taluds van losgestorte materialen, stabiliteit van lage dammen en overgangsconstructies bij stortsteen onder golfaanval, Waterloopkundig laboratorium

Meer, J.W. van der, (1993). Conceptual design of rubblemound breakwaters, publications number 483, Delft Hydraulics, the Netherlands.

Schiereck, G.J., (1993). Introduction to bed bank schore protection, engineering the interface of soil and water. Colledictaat f4, Faculteit der Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft.

Vidal, C., Losada, M.A., Medina R., Mansard R., Gomez-Pina, G., (1990). A Universal analysis for the stability of both lowcrested and submerged breakwaters, chapter 128, proc. 22nd International Coastal Engineering Conference, Am. Soc. Civ. Engrs.

Symbolen

A_e	[m ²]	Erosie gebied rond stil water niveau
B	[m]	Kruinbreedte
D_{50}	[m]	Zeef diameter
D_{n50}	[m]	Nominale diameter (M_{50}/ρ_r) ^{1/3}
D_{85}	[m]	85 % waarde van zeefkromme
D_{15}	[m]	15 % waarde van zeefkromme
D_{85}/D_{15}	[-]	Gradatie bovenlaag
H_s	[m]	Significante golfhoogte
L	[m]	Golflengte
L/D	[-]	Lengte-breedte verhouding stortsteen
N_s	[-]	Stabiliteitsgetal ($H_s/[\Delta D_{n50}]$)
R_c	[m]	Vrijboord
R	[-]	Dimensieloos vrijboord (R_c/D_{n50})
s	[-]	Golfsteilheid (H/L)
S	[-]	Dimensieloos schade (A_e/D_{n50}^2)
T	[s]	Golfperiode
T_m	[s]	Gemiddelde golfperiode
T_p	[s]	Maximum golfperiode
W	[kg]	Steen gewicht
α	[deg]	Helling voortalud
Δ	[-]	Relatieve dichtheid ($[\rho_r/\rho_w]-1$)
ξ	[-]	Surf parameter
ρ_r	[kg/m ³]	Dichtheid steen
ρ_w	[kg/m ³]	Dichtheid water



Bijlagen

Inhoudsopgave bijlagen

Bijlage A1: Proefgegevens en gemeten schaden proeven Van der Meer.

Bijlage A2: Proefgegevens en gemeten schaden proeven Vidal.

Bijlage B1: Zeefkrommen van de geteste steensoorten.

Bijlage B2: Foto's geteste steensoorten.

Bijlage B3 Grafieken resultaten stabiliteit en theorie Van der Meer.

Bijlage B4: Grafieken resultaten per sectie.

Bijlage A1

Proefgegevens en gemeten schaden proeven Van der Meer.

test number	crest height (m)	waterlevel (m)	Rc (m)	Hs (m)	Hs/dDn (m)	Tz (s)	Tp (s)	
Serie	test							
1	5	0.414	0.4	0.014	0.083	1.50	1.7	1.96
	1	0.406	0.4	0.006	0.105	1.90	1.7	1.96
	2	0.406	0.4	0.006	0.125	2.27	1.71	1.96
	3	0.403	0.4	0.003	0.145	2.63	1.72	1.98
	4	0.405	0.4	0.005	0.174	3.15	1.72	1.96
2	10	0.403	0.4	0.003	0.077	1.40	2.21	2.53
	9	0.407	0.4	0.007	0.111	2.01	2.22	2.56
	6	0.411	0.4	0.011	0.134	2.43	2.21	2.56
	7	0.414	0.4	0.014	0.159	2.88	2.22	2.56
	11	0.4	0.4	0	0.176	3.19	2.21	2.56
	8	0.4	0.4	0	0.196	3.55	2.19	2.56
3	15	0.528	0.4	0.128	0.078	1.41	2.21	2.5
	14	0.523	0.4	0.123	0.112	2.03	2.19	2.56
	12	0.532	0.4	0.132	0.137	2.48	2.21	2.6
	16	0.531	0.4	0.131	0.149	2.70	2.22	2.56
	13	0.528	0.4	0.128	0.162	2.94	2.2	2.6
4	19	0.525	0.4	0.125	0.083	1.50	1.68	1.94
	18	0.526	0.4	0.126	0.105	1.90	1.68	1.96
	17	0.525	0.4	0.125	0.128	2.32	1.7	1.94
	20	0.526	0.4	0.126	0.148	2.68	1.7	1.96
5	25	0.306	0.4	-0.094	0.116	2.10	1.7	1.94
	21	0.312	0.4	-0.088	0.147	2.66	1.72	1.96
	26	0.308	0.4	-0.092	0.161	2.92	1.71	1.98
	22	0.308	0.4	-0.092	0.175	3.17	1.72	1.94
	23	0.305	0.4	-0.095	0.196	3.55	1.72	1.96
	24	0.306	0.4	-0.094	0.216	3.91	1.74	1.96
6	30	0.312	0.4	-0.088	0.11	1.99	2.18	2.56
	29	0.31	0.4	-0.09	0.137	2.48	2.18	2.56
	28	0.31	0.4	-0.09	0.161	2.92	2.18	2.56
	27	0.313	0.4	-0.087	0.193	3.50	2.18	2.53
	31	0.305	0.4	-0.095	0.219	3.97	2.16	2.6

Bron: Meer, J.W. van der, (1990). Taluds van losgestorte materialen, stabiliteit van lage dammen en overgangsconstructies bij stortsteen onder golfaanval, Waterloopkundig laboratorium

test number		for N= 1000				for N= 3000			
Serie	test	damage S total	S front	S crest	S rear	damage S total	S front	S crest	S rear
1	5	2.19	0.83	0.93	0.43	2.75	0.87	1.58	0.3
	1	2.61	1.13	1.27	0.21	3.76	1.67	1.88	0.21
	2	5.42	3.67	1.69	0.06	6.1	3.88	2.03	0.19
	3	4.22	2.57	1.52	0.13	9.66	6.93	2.42	0.31
	4	12.18	7.99	3.81	0.38	20.53	12.67	7.86	0
2	10	2.34	0.86	1.2	0.28	2.65	0.96	1.22	0.47
	9	3.03	1.83	0.83	0.37	5.02	2.7	1.91	0.41
	6	5.53	2.9	2.45	0.18	6.84	3.91	2.6	0.33
	7	5.81	2.5	2.38	0.93	8.35	3.97	3.46	0.92
	11	9.65	6.81	2.84	0	17.88	10.71	7.17	0
8	16.91	11.03	5.81	0.07	45.38	21.01	23.52	0.85	
3	15	0.68	0.68	0	0	1.46	0.75	0.18	0.53
	14	3.9	2.98	0.18	0.74	4.56	3.34	0.2	1.02
	12	5.83	3.07	0.8	1.96	9.05	5.31	0.83	2.91
	16	11.7	8.6	0.57	2.53	18.73	14.18	0.88	3.67
	13	16.87	12.84	0.75	3.28	29	19.97	4.98	4.05
4	19	1.16	1.16	0	0	1.84	1.84	0	0
	18	2.81	2.45	0.36	0	3.76	3.38	0.38	0
	17	6.69	6.69	0	0	12.27	11.93	0.34	0
	20	14.92	13.87	0.26	0.79	46.12	32.06	13.42	0.64
5	25	1.7	0.86	0.84	0	1.87	1.16	0.71	0
	21	2.38	0.49	1.54	0.35	3.67	1.15	1.82	0.7
	26	2.63	1.24	1.12	0.27	2.58	1.33	1.25	0
	22	5.74	2.99	2.22	0.53	7.02	3.21	3.63	0.18
	23	5.04	2.14	2.9	0	6.77	3.1	3.67	0
	24	10.1	4.28	5.65	0.17	13.54	5.28	8.16	0.1
6	30	1.52	0.46	0.93	0.13	2.43	0.56	1.09	0.78
	29	2.49	1.53	0.72	0.24	3.58	2.22	1.19	0.17
	28	4.86	3.05	1.67	0.14	7.42	3.39	4.03	0
	27	7.6	2.53	5.07	0	11.66	3.38	8.06	0.22
	31	13.01	4.39	8.16	0.46	16.37	5.14	10.77	0.46

Bijlage A2

Proefgegevens en gemeten schaden proeven Vidal.

Golfparameters

TEST	H _{mo}	H _s	H _{1/10}	H _{1/20}	H _{1/100}	H _{max}	T _M	T _P	GF
1	.048	.047	.058	.064	.075	.099	1.16	1.39	.758
4	.075	.073	.090	.099	.116	.142	1.17	1.40	.740
5	.075	.073	.090	.099	.116	.142	1.17	1.40	.740
2	.094	.092	.114	.123	.145	.181	1.20	1.41	.725
3	.111	.110	.134	.144	.164	.182	1.26	1.41	.678
13	.127	.126	.159	.174	.201	.238	1.22	1.40	.760
9	.076	.074	.091	.099	.116	.134	1.18	1.39	.708
6	.092	.086	.108	.118	.138	.181	1.20	1.41	.736
7	.114	.112	.139	.150	.172	.193	1.24	1.41	.710
8	.126	.124	.152	.163	.183	.207	1.28	1.41	.681
14	.133	.132	.167	.176	.209	.245	1.23	1.40	.777
15	.151	.152	.189	.205	.234	.265	1.27	1.41	.763
16	.052	.054	.062	.067	.078	.092	1.13	1.40	.727
12	.075	.073	.090	.099	.118	.159	1.18	1.41	.729
10	.094	.092	.114	.124	.143	.173	1.21	1.41	.712
11	.105	.103	.126	.137	.156	.174	1.24	1.41	.670
17	.146	.146	.181	.198	.225	.250	1.26	1.40	.747
18	.046	.045	.056	.060	.070	.079	1.13	1.41	.727
19	.079	.077	.096	.104	.123	.146	1.12	1.40	.730
20	.096	.094	.118	.129	.151	.183	1.14	1.40	.740
21	.117	.116	.146	.159	.186	.215	1.19	1.40	.760
22	.136	.136	.170	.185	.212	.244	1.24	1.41	.753
23	.151	.151	.187	.202	.231	.261	1.29	1.41	.737
24	.054	.052	.065	.070	.083	.099	1.14	1.41	.733
25	.079	.077	.096	.105	.123	.151	1.13	1.42	.737
26	.092	.090	.112	.123	.144	.169	1.15	1.41	.740
27	.110	.109	.136	.149	.175	.203	1.18	1.41	.753
28	.123	.122	.153	.167	.193	.229	1.22	1.41	.757
29	.132	.132	.165	.179	.204	.228	1.24	1.41	.747
30	.051	.050	.061	.066	.074	.090	1.41	1.82	.690
31	.080	.078	.096	.103	.116	.141	1.40	1.82	.683
32	.108	.105	.129	.139	.156	.189	1.44	1.81	.683
33	.134	.131	.161	.174	.197	.235	1.46	1.81	.677
34	.072	.070	.085	.092	.104	.112	1.43	1.82	.683
35	.099	.096	.118	.127	.142	.159	1.43	1.82	.670

Bron: Vidal, C., Losada, M.A. and Medina, R., 1991 "Stability of Mound Breakwater's Head and Trunk". Journal of waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 117, No 6. Nov/Dec, 1991.

Gemeten schade per sectie

TEST	Back Head		Front Head		Total Slope		Crest	Back Slope		Front Slope		
	S	GD	S	GD	S	GD	S	GD	S	GD	S	GD
1	0.39	ND	0.39	ND	0.45	ND	0.72	ND	0.00	ND	0.45	ND
4	1.97	ID	0.00	ND	1.27	ND	1.00	ID	0.09	ND	0.81	ID
5	0.98	ID	0.66	ND	2.08	ID	1.09	ID	0.18	ND	0.36	ND
2	2.38	IR	2.38	ID	4.74	IR	4.64	IR	0.45	ND	2.87	IR
3	3.47	IR	3.73	IR	5.15	IR	2.97	IR	0.18	ND	3.31	IR
13	12.12	D	13.73	D	17.61	D	9.83	SD	0.82	ID	9.19	D
9	0.00	ND	0.00	ND	0.00	ND	0.18	ND	0.00	ND	0.27	ND
6	0.00	ND	0.40	ND	1.63	ID	1.36	ID	0.09	ND	0.63	ND
7	0.51	ND	2.40	ID	2.53	IR	2.72	IR	0.18	ND	1.81	ID
8	0.64	ND	1.93	ID	4.54	IR	2.44	IR	0.27	ND	4.21	SD
14	1.42	ID	10.13	D	5.35	IR	4.60	IR	0.09	ND	2.72	IR
15	3.30	IR	14.33	D	10.72	SD	10.22	SD	0.54	ND	5.03	SD
16	1.16	ND	0.00	ND	1.36	ND	0.09	ND	0.18	ND	0.27	ND
12	3.55	IR	1.48	ID	3.54	IR	1.09	ID	0.27	ND	2.44	IR
10	6.35	SD	1.63	ID	6.43	IR	1.27	ID	0.27	ND	4.00	SD
11	8.62	SD	5.34	IR	8.80	SD	3.57	IR	0.63	ND	5.31	SD
17	15.38	D	23.18	D	43.76	D	8.63	SD	1.54	ID	11.83	D
18	0.71	ND	0.85	ND	0.45	ND	0.09	ND	0.00	ND	0.27	ND
19	4.36	SD	3.68	IR	4.13	IR	1.27	ID	0.36	ND	2.78	IR
20	12.18	D	13.78	D	6.68	SD	1.99	ID	0.54	ND	4.72	SD
21	18.24	D	19.14	D	22.31	D	2.62	ID	1.27	ID	11.22	D
22	-----	---	-----	---	-----	---	4.76	IR	0.91	ID	-----	---
23	-----	---	-----	---	-----	---	3.28	IR	3.17	IR	-----	---
24	1.41	ID	1.41	ID	1.09	ND	0.00	ND	0.00	ND	0.91	ID
25	8.32	SD	3.10	IR	4.08	IR	0.18	ND	0.00	ND	2.98	IR
26	16.43	D	8.92	SD	5.16	IR	0.36	ND	1.00	ND	5.62	SD
27	-----	---	12.58	IR	10.56	IR	1.10	ID	2.20	IR	11.07	IR
28	-----	---	-----	---	-----	---	1.81	ID	3.08	IR	-----	---
29	-----	---	-----	---	-----	---	2.35	IR	3.30	SD	-----	---
30	0.51	ND	0.00	ND	0.91	ND	0.36	ND	0.00	ND	0.36	ND
31	4.22	SD	4.64	IR	4.70	IR	1.81	ID	0.45	ID	3.54	IR
32	13.28	D	11.63	SD	16.49	D	3.69	IR	0.54	ND	6.79	SD
33	-----	---	16.84	D	-----	---	3.70	IR	0.27	ND	16.12	D
34	2.48	IR	0.91	ND	4.46	IR	0.27	ND	0.00	ND	2.99	IR
35	15.59	D	6.44	SD	26.55	D	0.36	ND	0.72	ND	8.87	D

Bijlage B1

Zeefkrommen van de geteste steensoorten.

Zeefkromme steensoort 1

$V_{150} = 117 \text{ gram}$ $\sim 4 = 2700$

$D_{150} = 3,51 \text{ cm}$

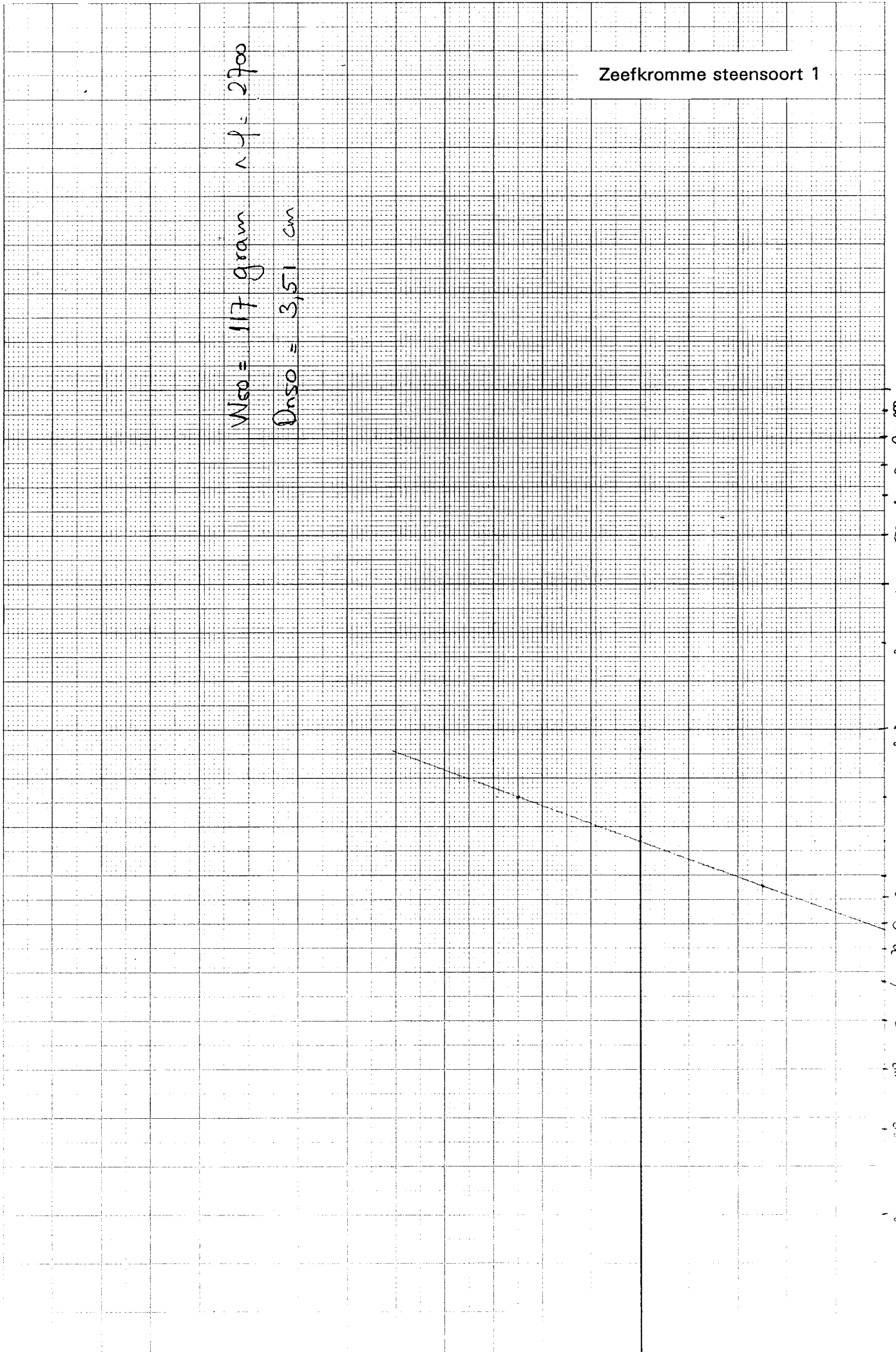
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

→ gram

100 80 60 40 20

100 80 60 40 20

20 40 60 80 100



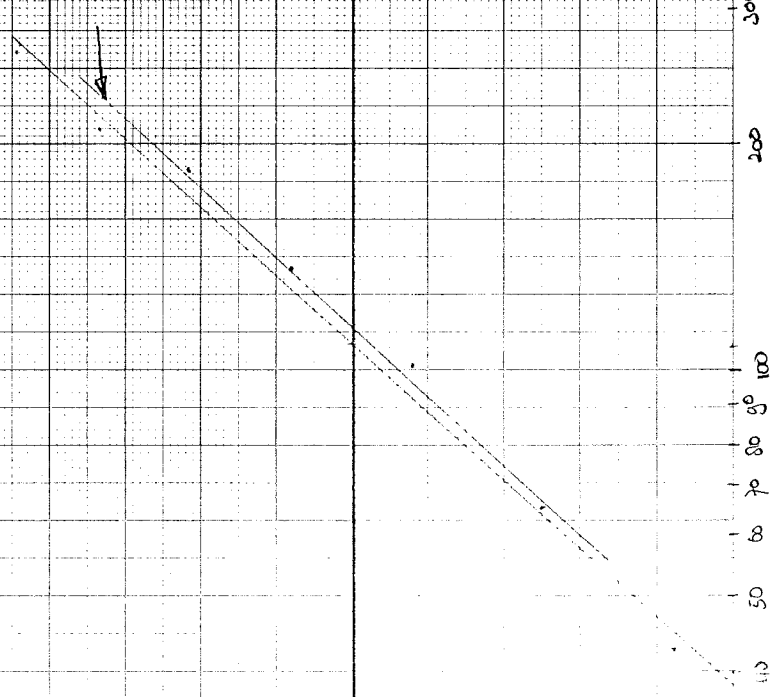
Zeefkromme steensoort 2

$W_{500} = 1131 \text{ gr}$
 $D_{500} = 3,47 \text{ mm}$

3 27 8 7 7 9 10 30 20 0

g
gram

1000 800 600 500 400 300 200 100 80 70 60 50 40 30 20 10



Zeefkromme steensoort 3

$M_{50} = 101,2 \text{ gr}$

$D_{50} = 3,35 \text{ cm}$

0 20 40 60 80 100

→ gram

1000

900

800

700

600

500

400

300

200

100

80

70

60

50

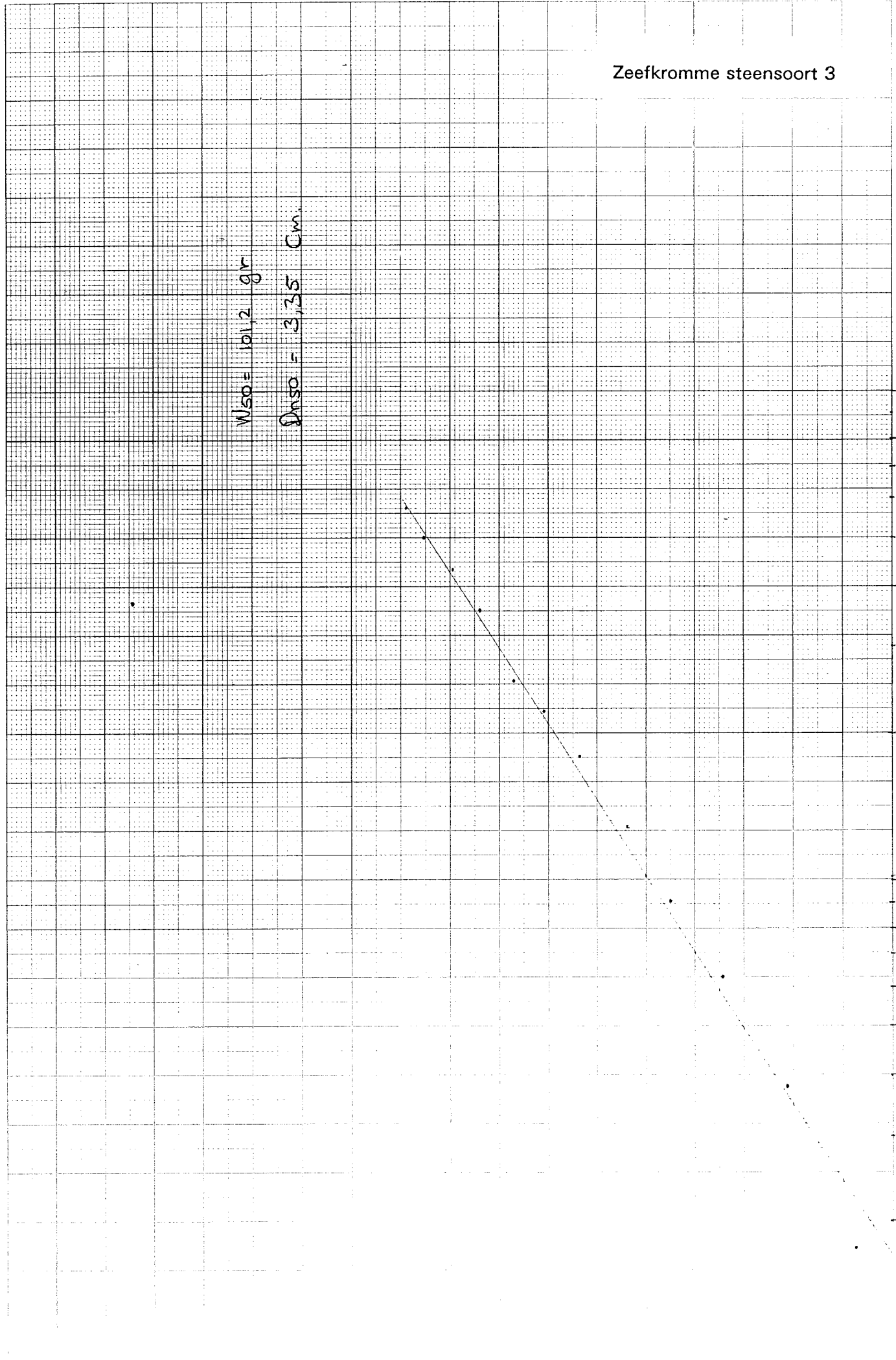
40

30

20

10

0



Zeefkromme steensoort 4

$W_{50} = 104,7$

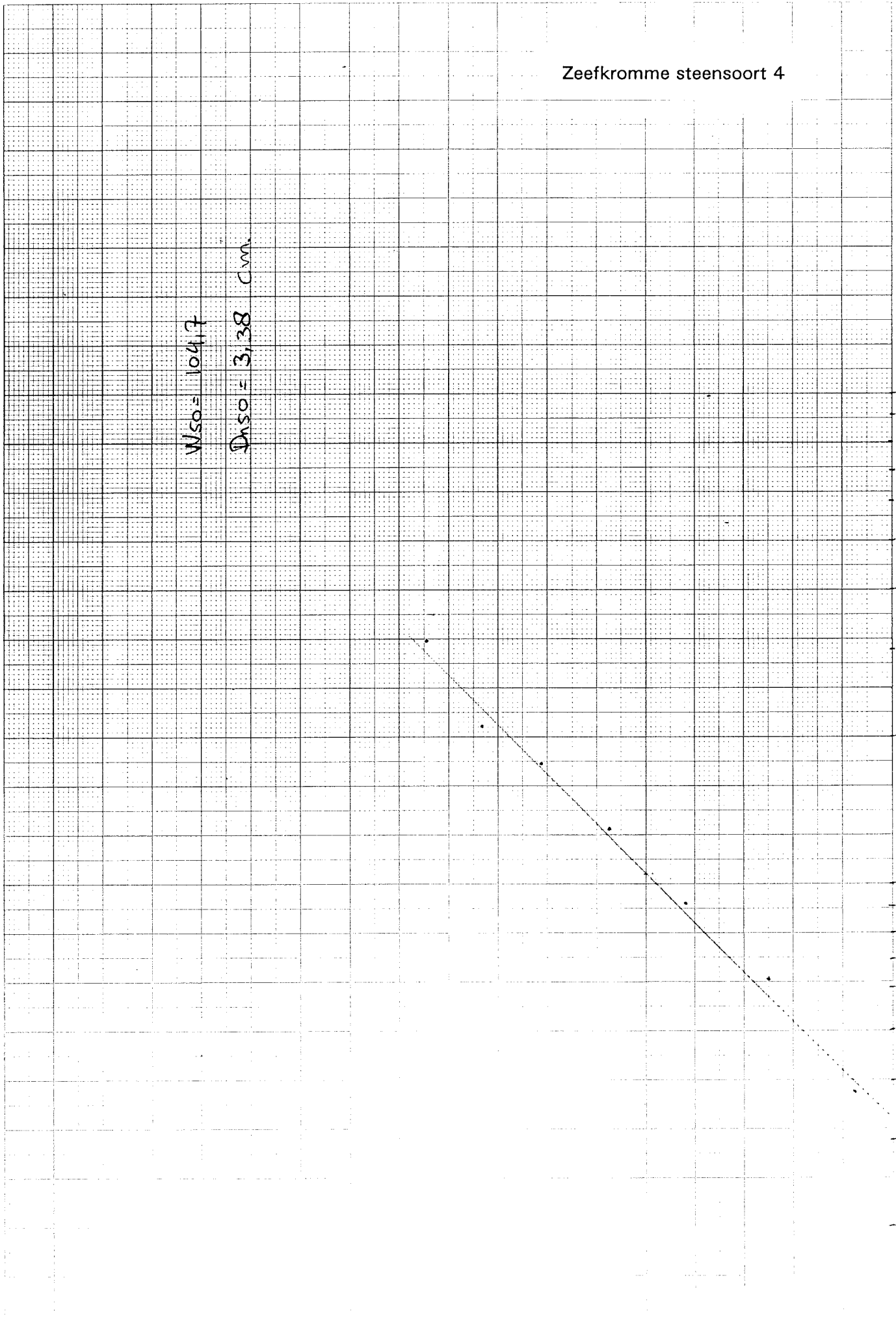
$D_{50} = 3,38 \text{ mm}$

gram
A

100
90
80
70
60
50
40
30
20

10

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11



Zeefkromme steensoort 5

$W_{50} = 102,3$

$D_{n50} = 3,36 \text{ mm}$

gram

1000

700

500

300

200

100

80

60

50

40

30

20

10

6

1

3

2)

3

2

1

3

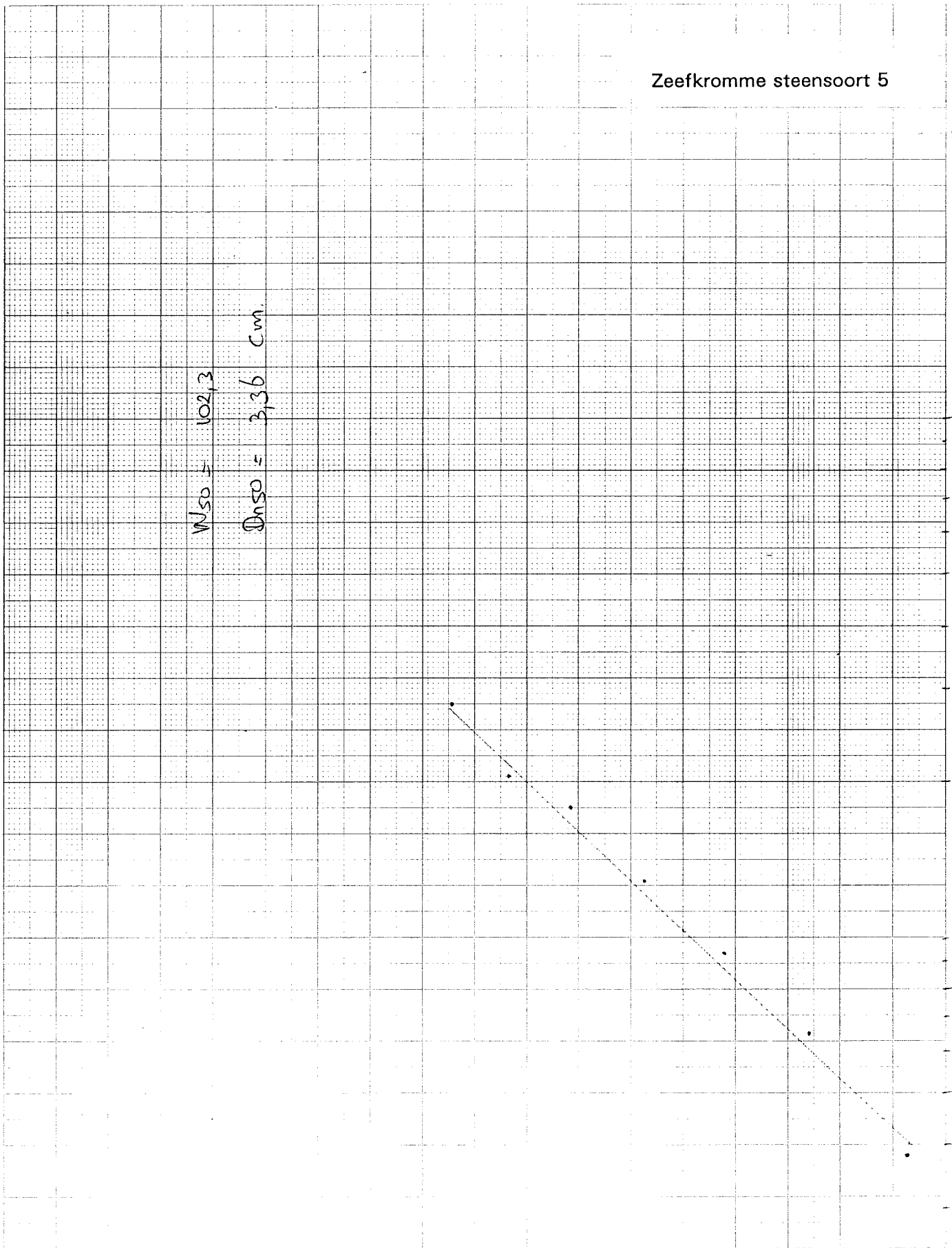
2

1

2

1

10



1000
700
500
300
200
100
80
60
50
40
30
20
10

Zeefkromme steensoort 6

$W_{50} = 112,2 \text{ gr}$
 $D_{50} = 3,68 \text{ mm}$

g/cm

1000

800

600

400

300

200

100

70

60

50

40

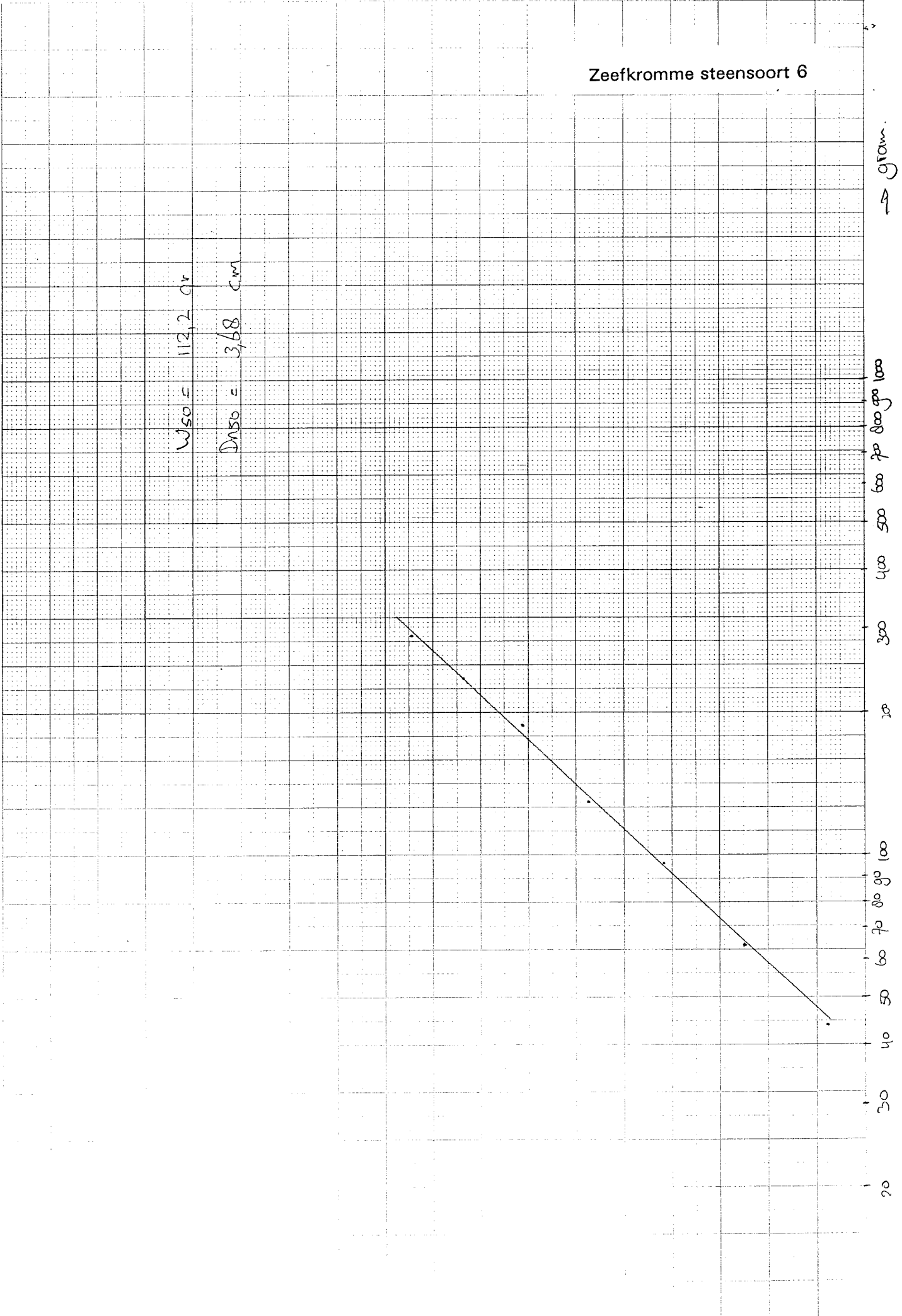
30

20

10

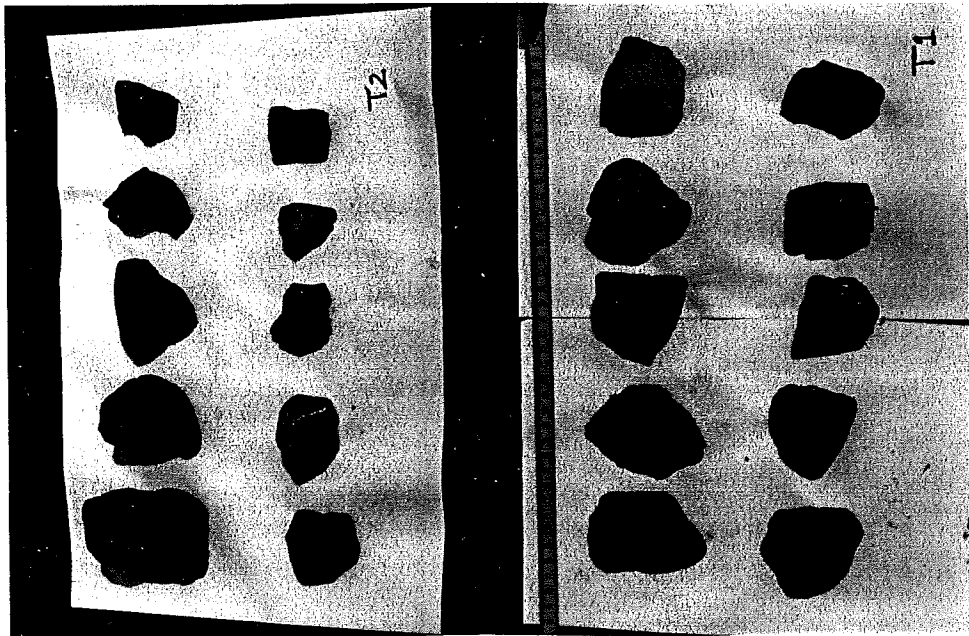
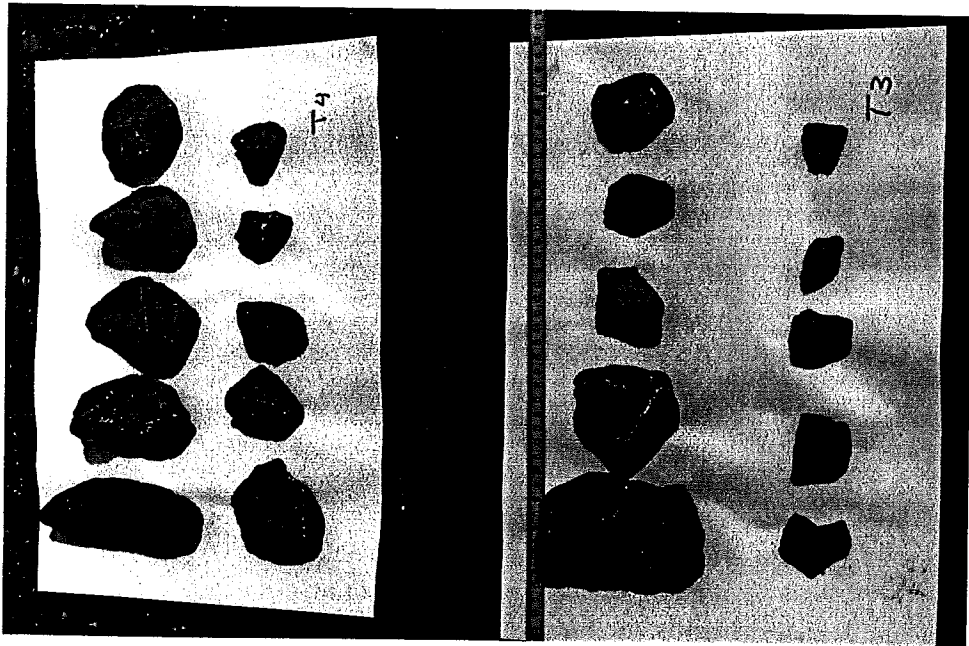
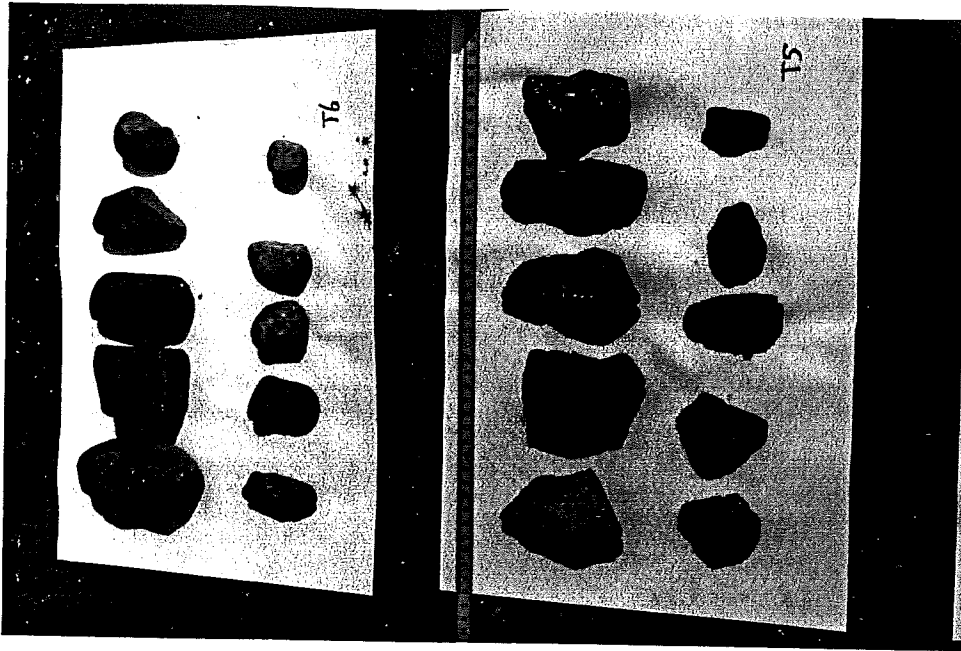
100 90 80 70 60 50 40 30 20 10

100 90 80 70 60 50 40 30 20 10



Bijlage B2

Foto's geteste steensoorten.

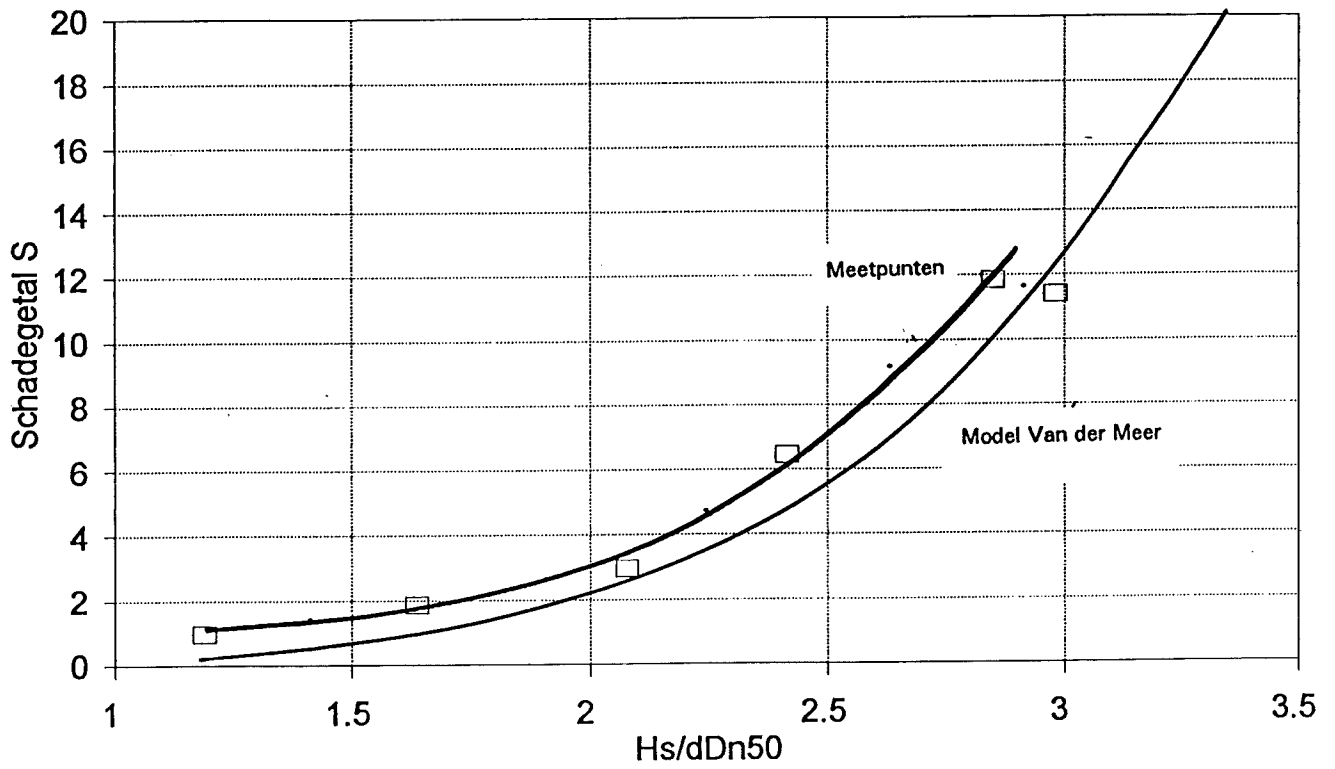


Bijlage B3

Grafieken resultaten stabiliteit en theorie Van der Meer.

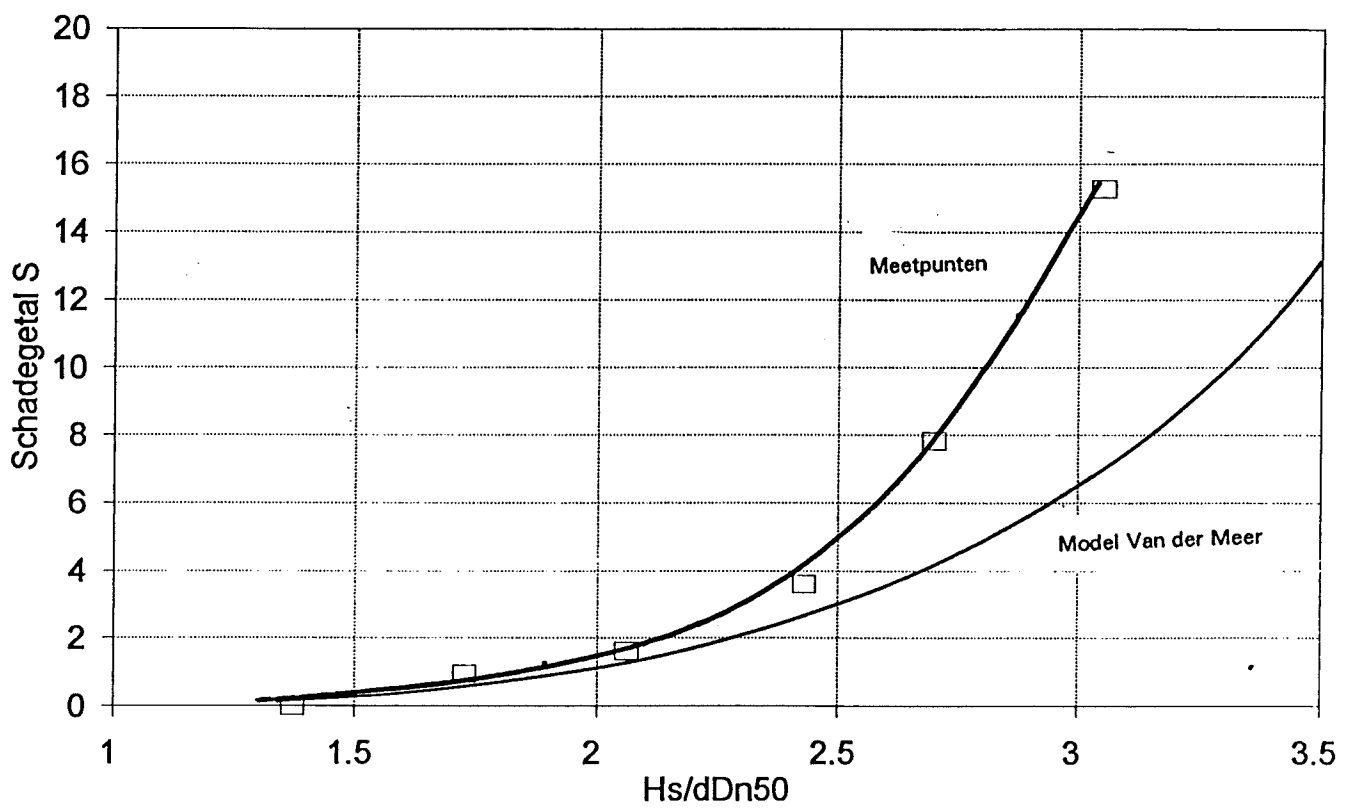
Schade vs stabiliteit

steensoort 1, met $s=0.02$



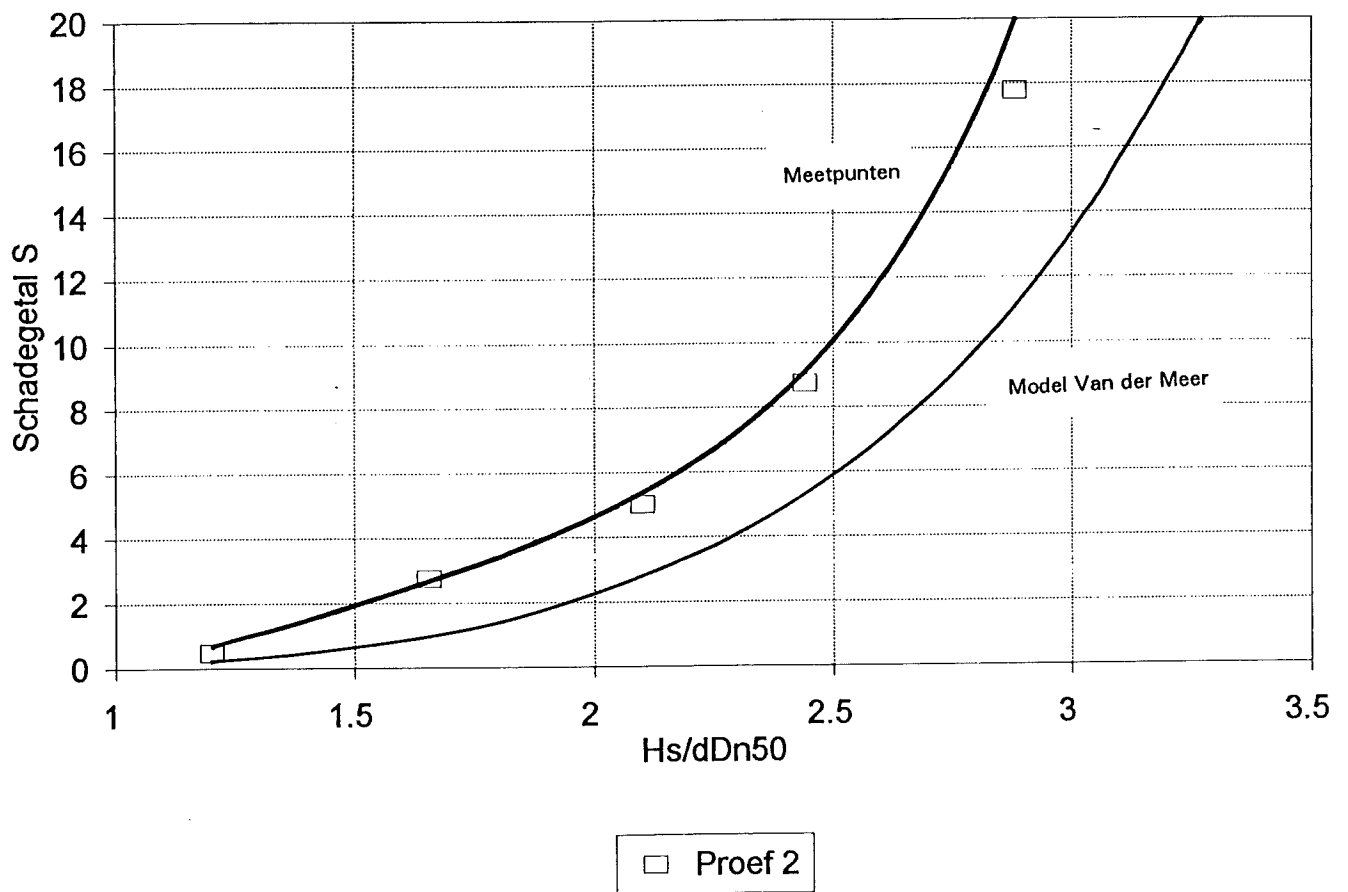
Schade vs stabiliteit

steensoort 1, met $s=0.04$.



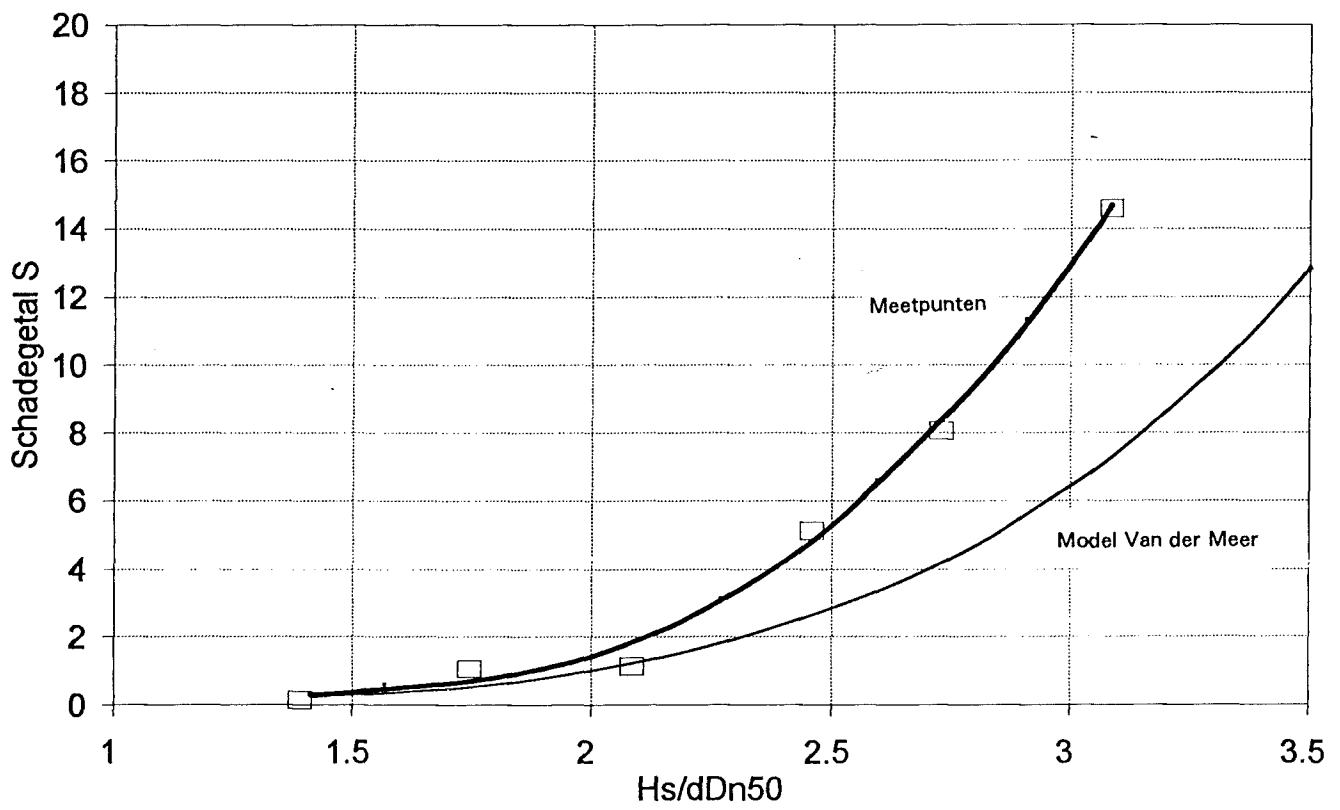
Schade vs stabiliteit

steensoort 2, met $s=0.02$



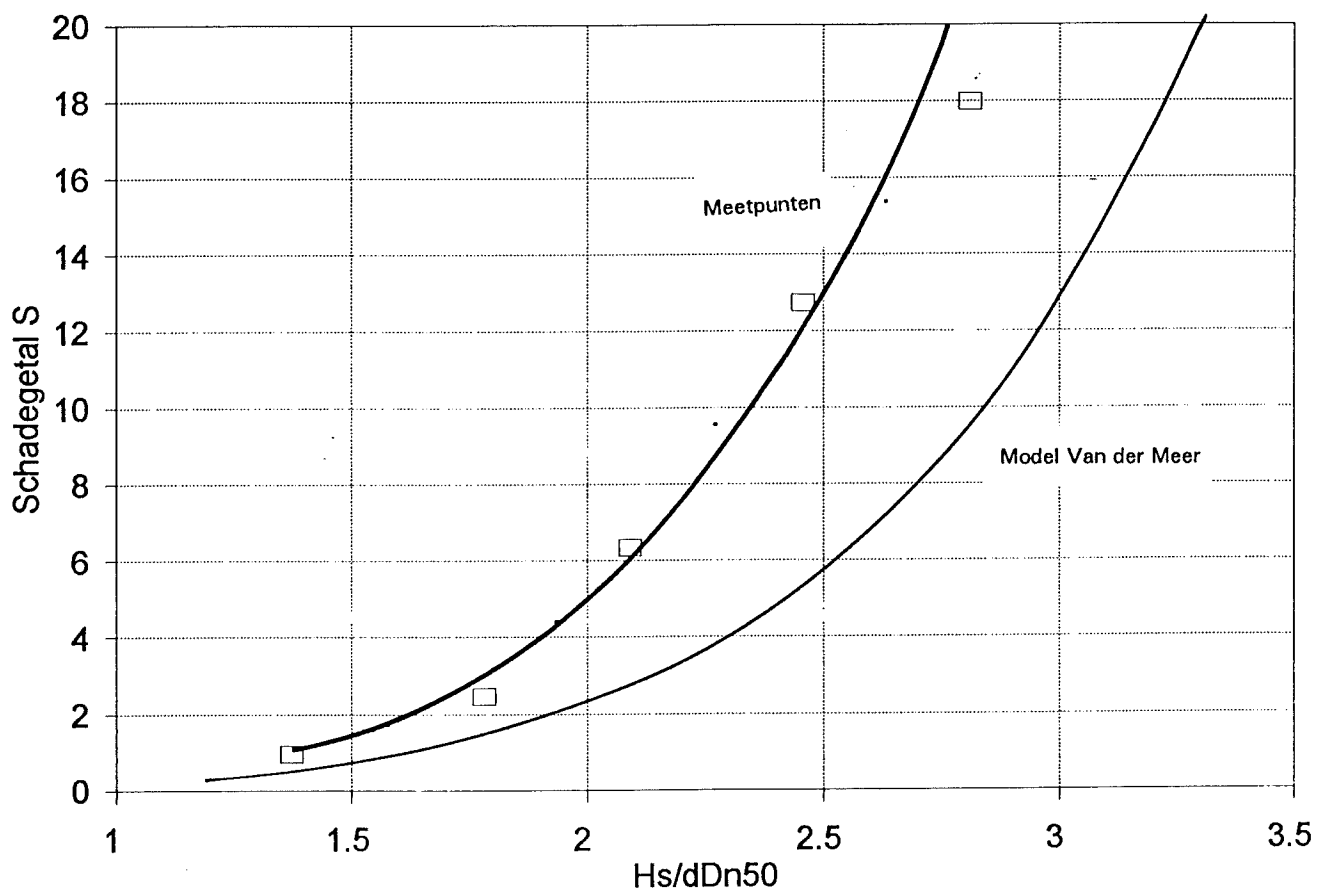
Schade vs stabiliteit

steensoort 2, met $s=0.04$.



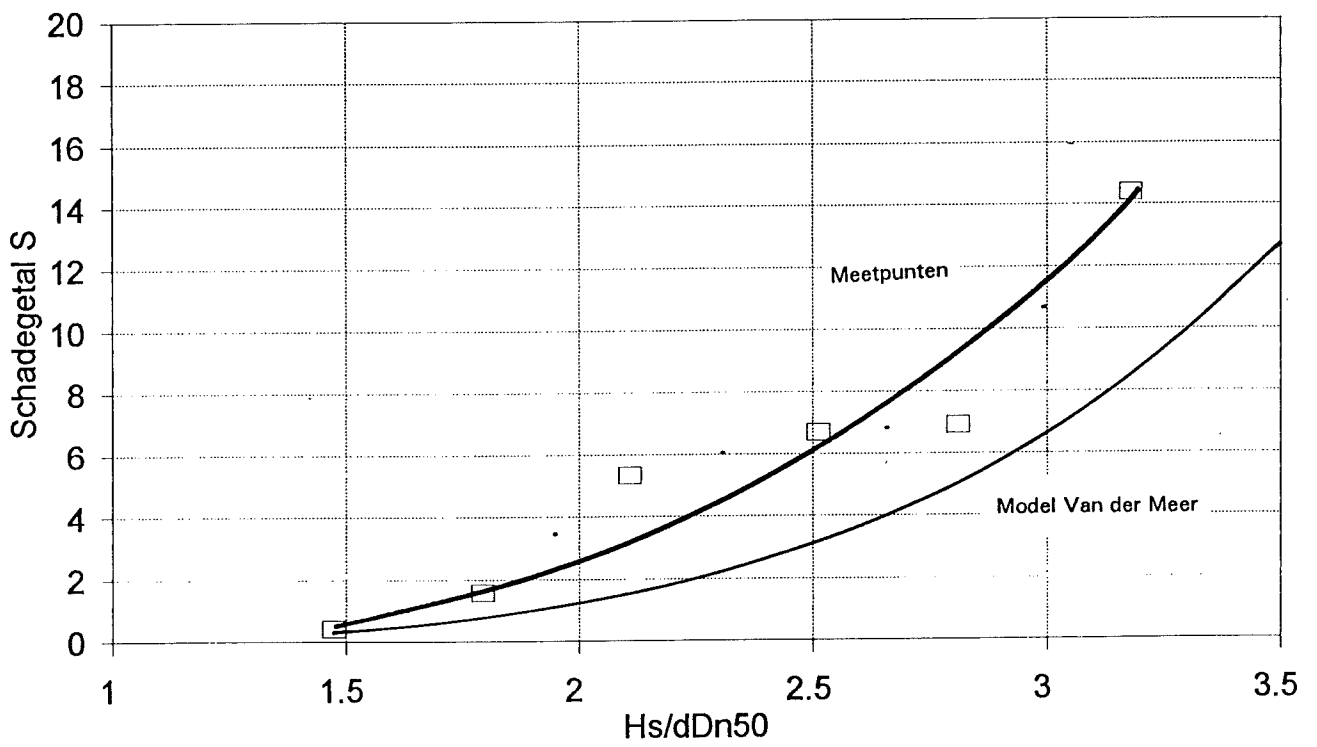
Schade vs stabiliteit

steensoort 3, met $s=0.02$



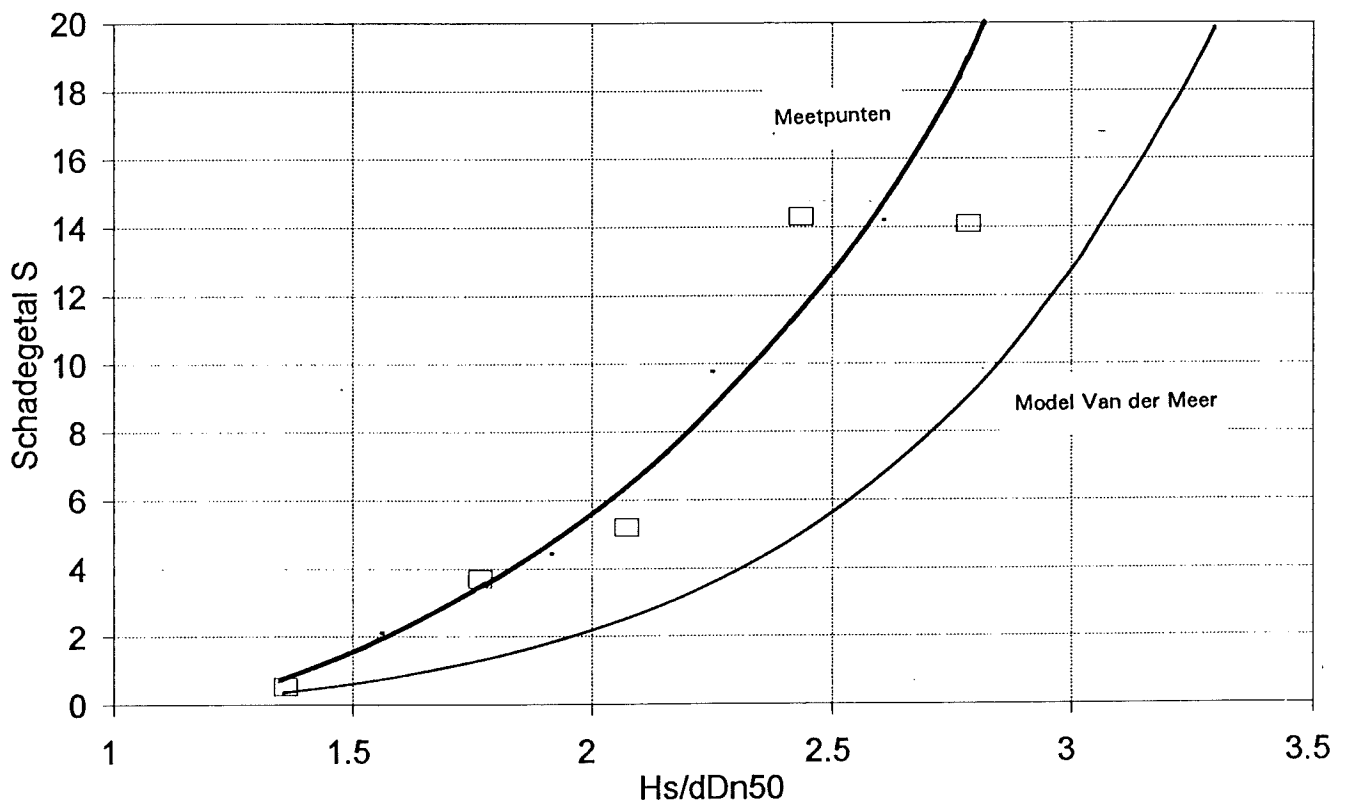
Schade vs stabiliteit

steensoort 3, met $s=0.04$



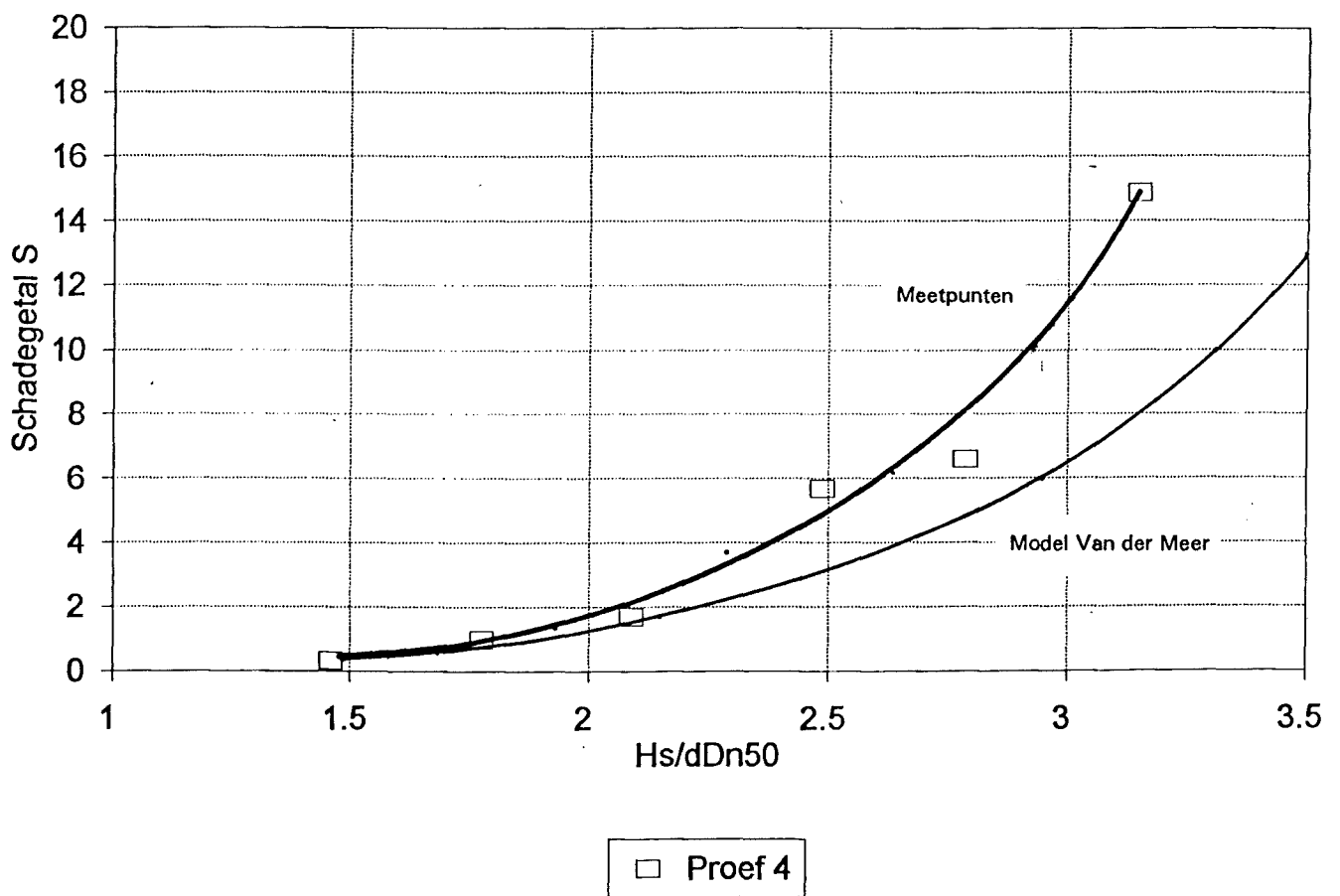
Schade vs stabiliteit

steensoort 4, met $s=0.02$



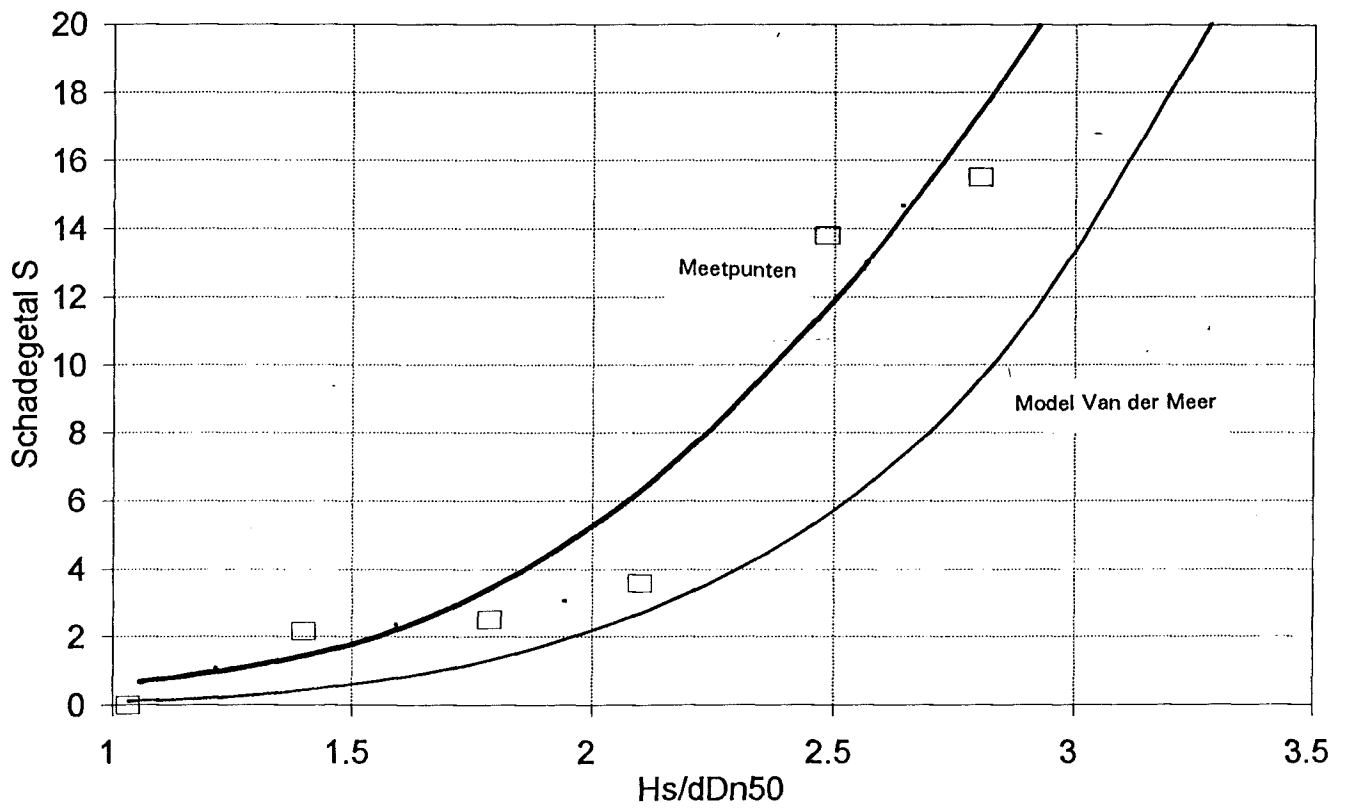
Schade vs stabiliteit

steensoort 4, met $s=0.04$



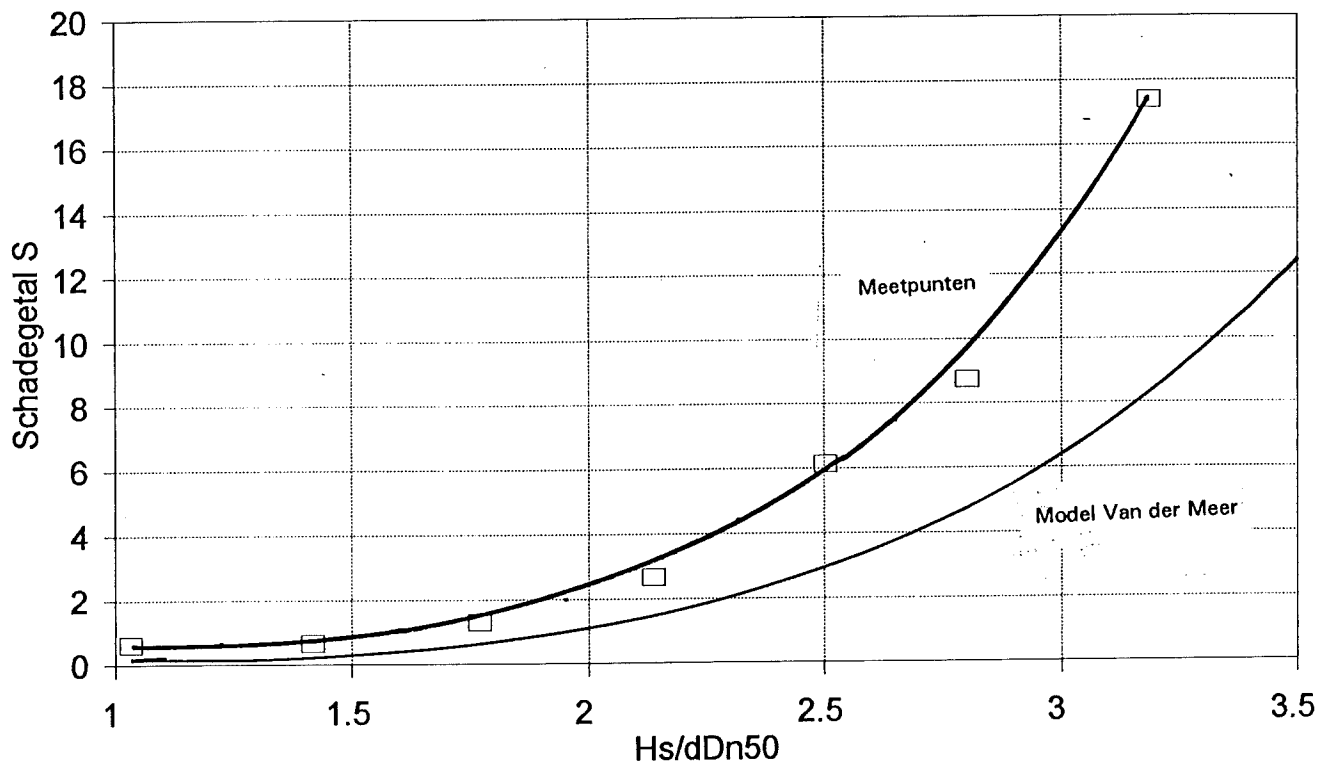
Schade vs stabiliteit

steensoort 5, met $s=0.02$



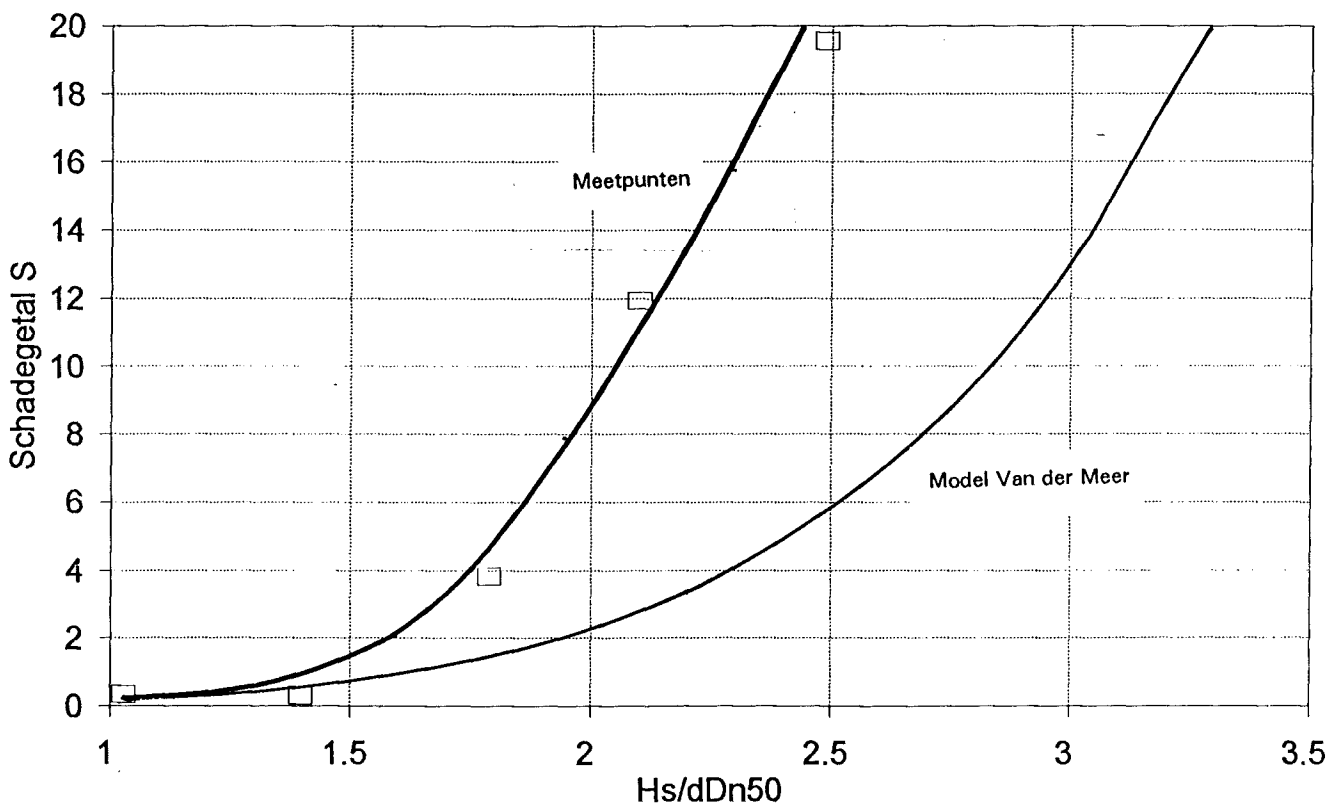
Schade vs stabiliteit

steensoort 5, met $s=0.04$



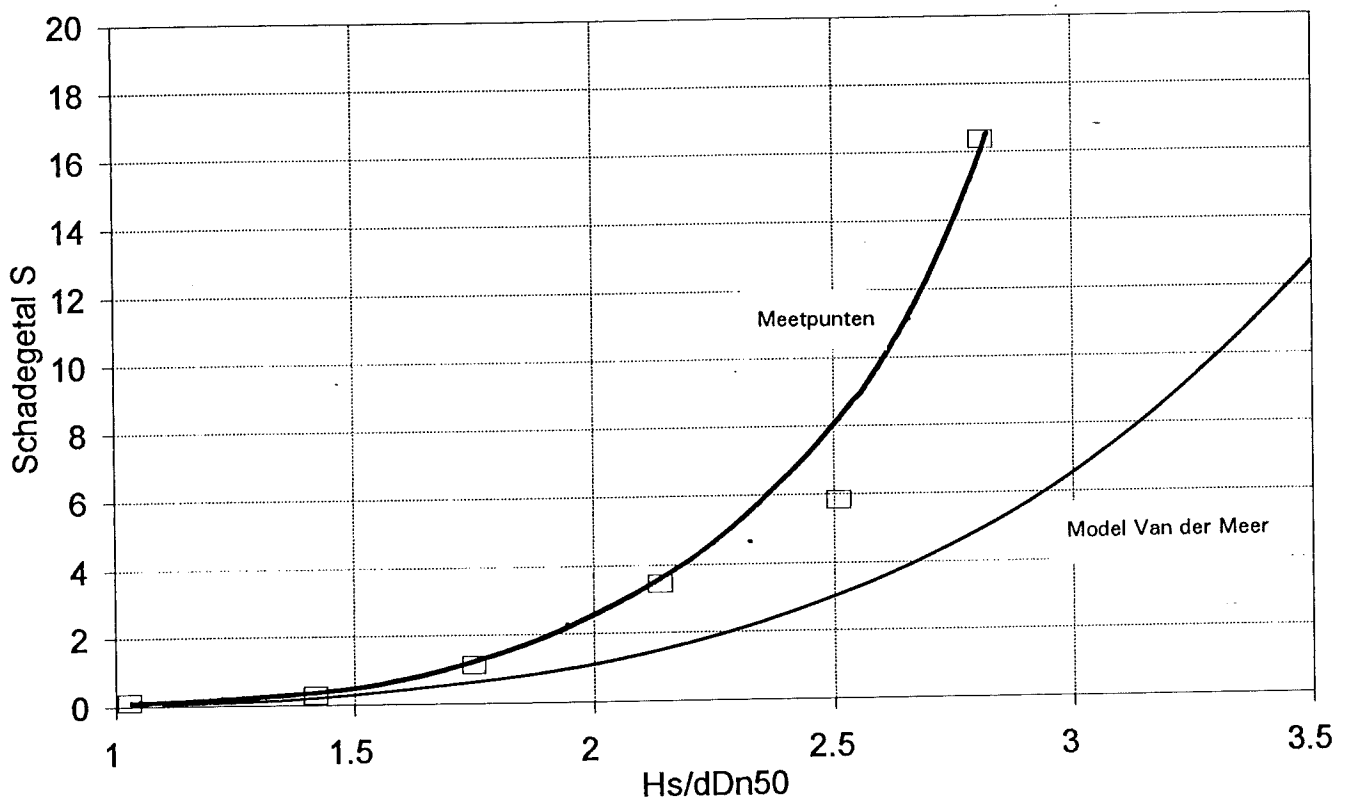
Schade vs stabiliteit

steensoort 6, met $s=0.02$



Schade vs stabiliteit

steensoort 6, met $s=0.04$

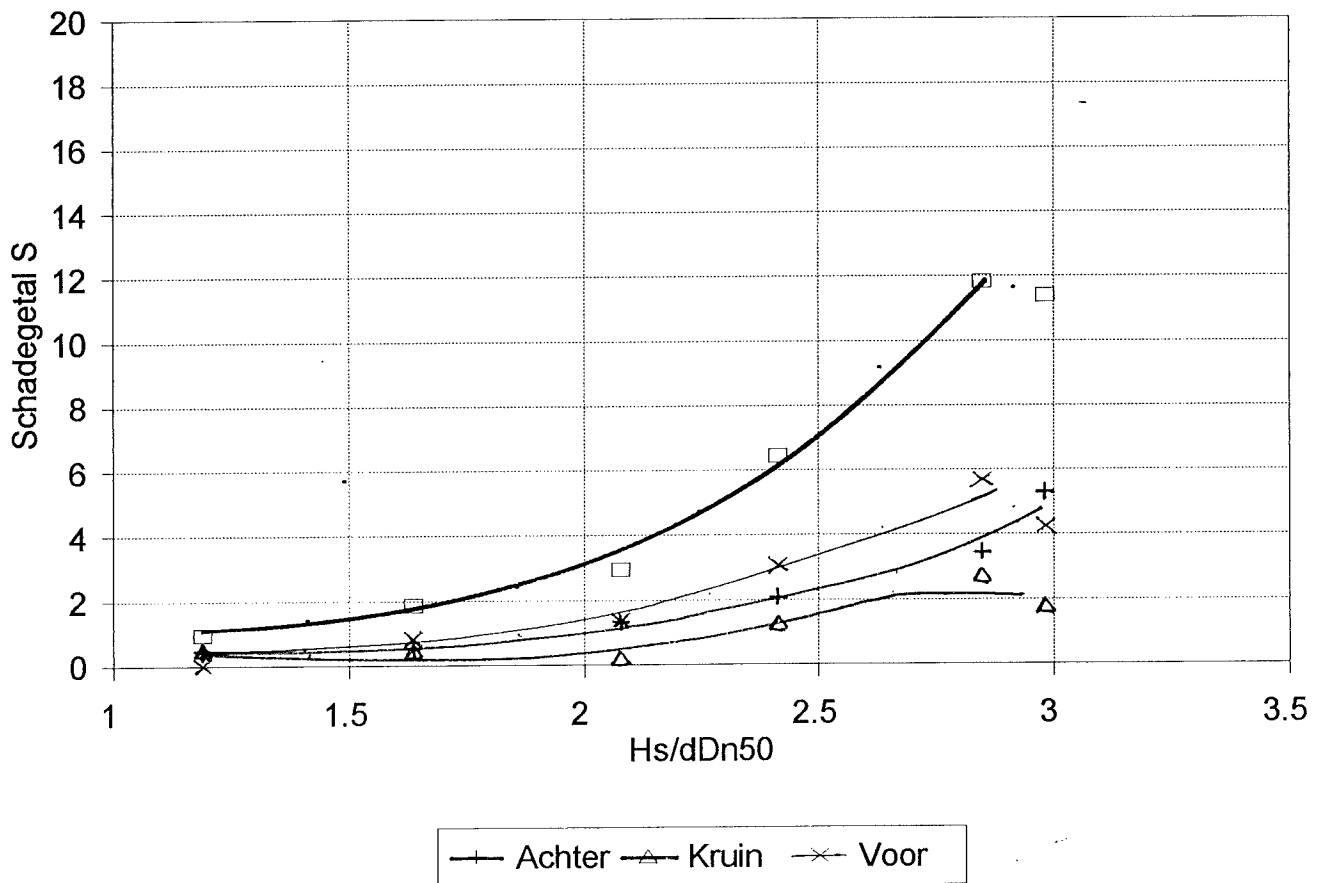


Bijlage B4

Grafieken resultaten per sectie.

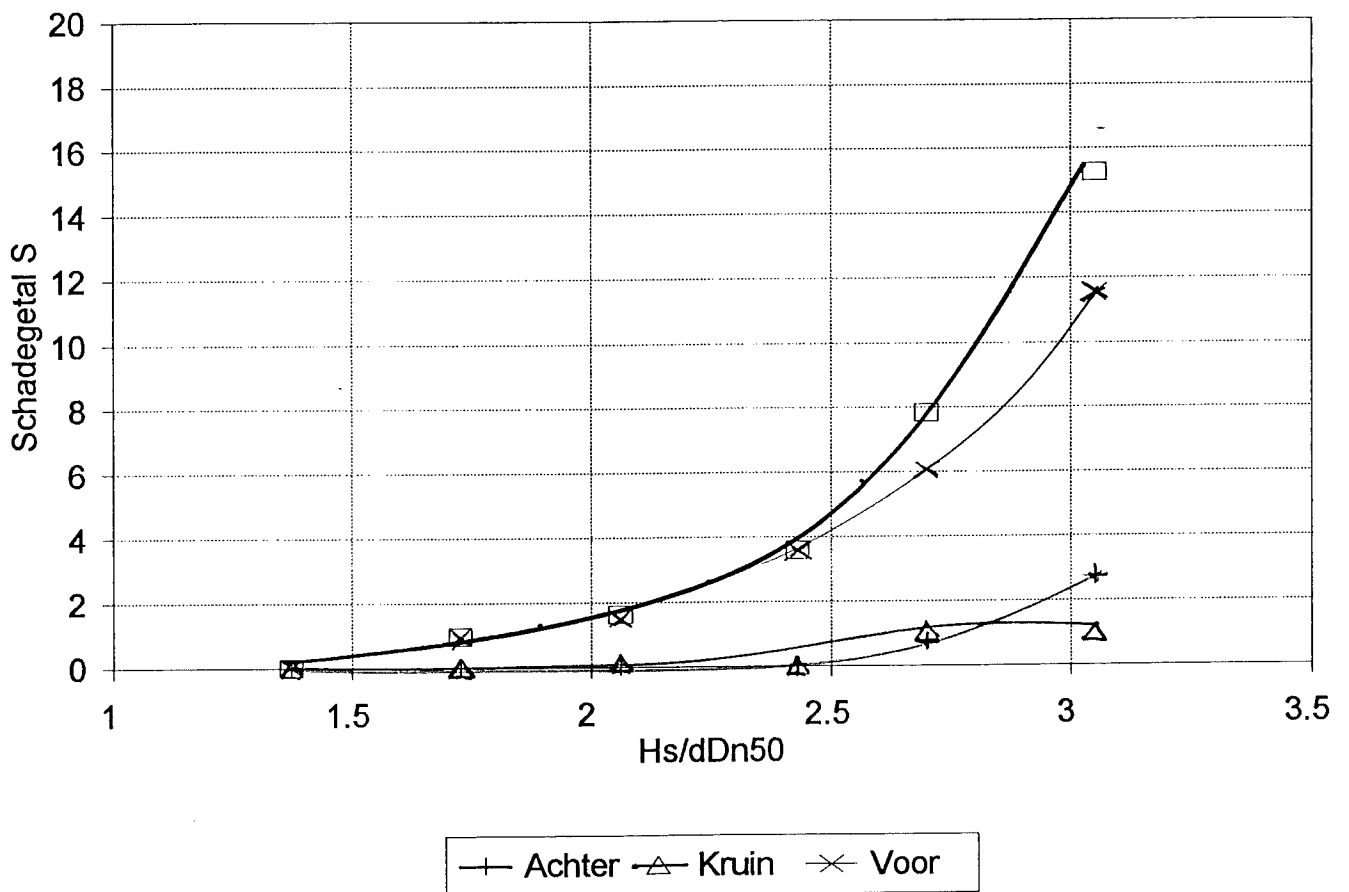
Schade vs stabiliteit

steensoort 1, met $s=0.02$



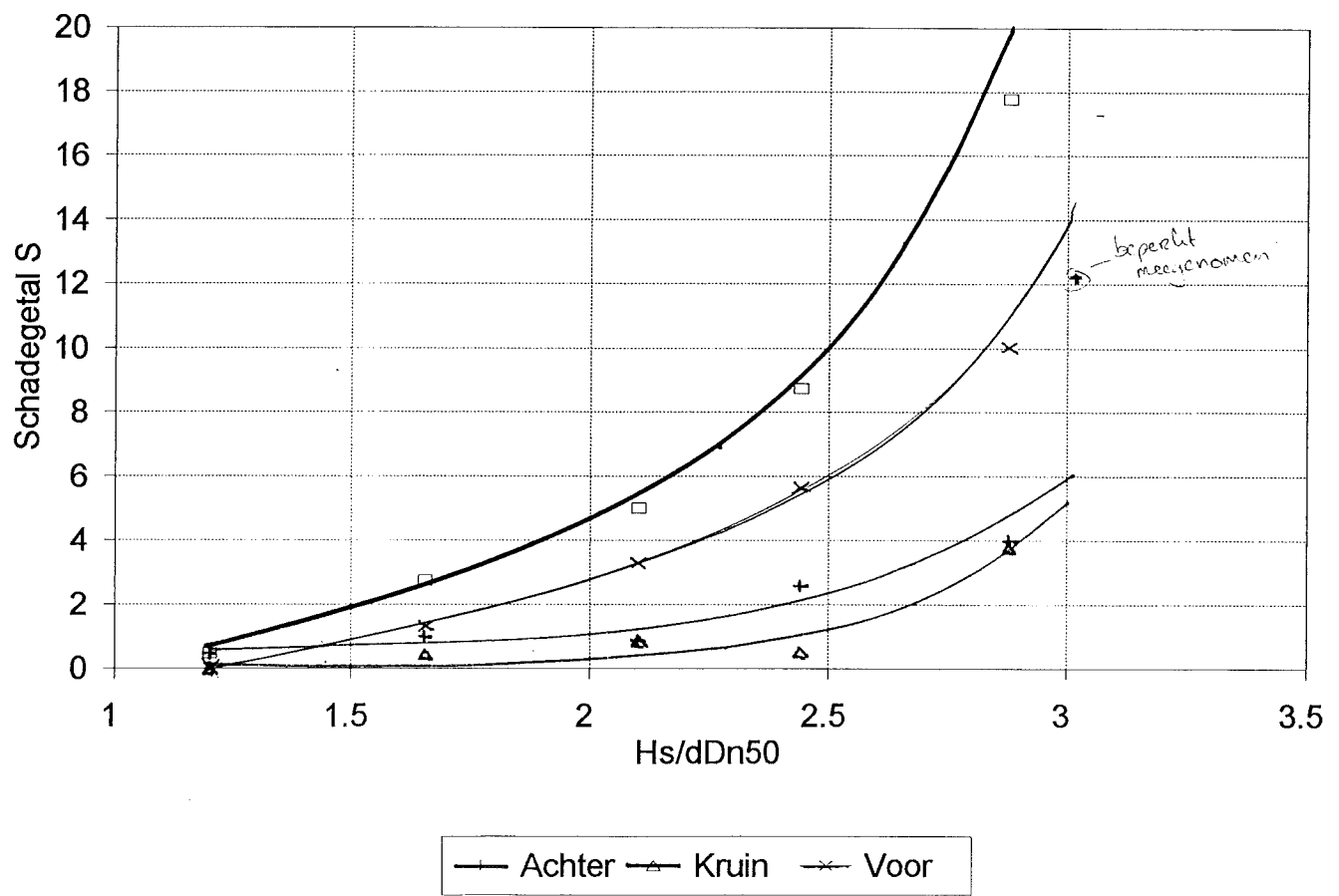
Schade vs stabiliteit

steensoort 1, met $s=0.04$.

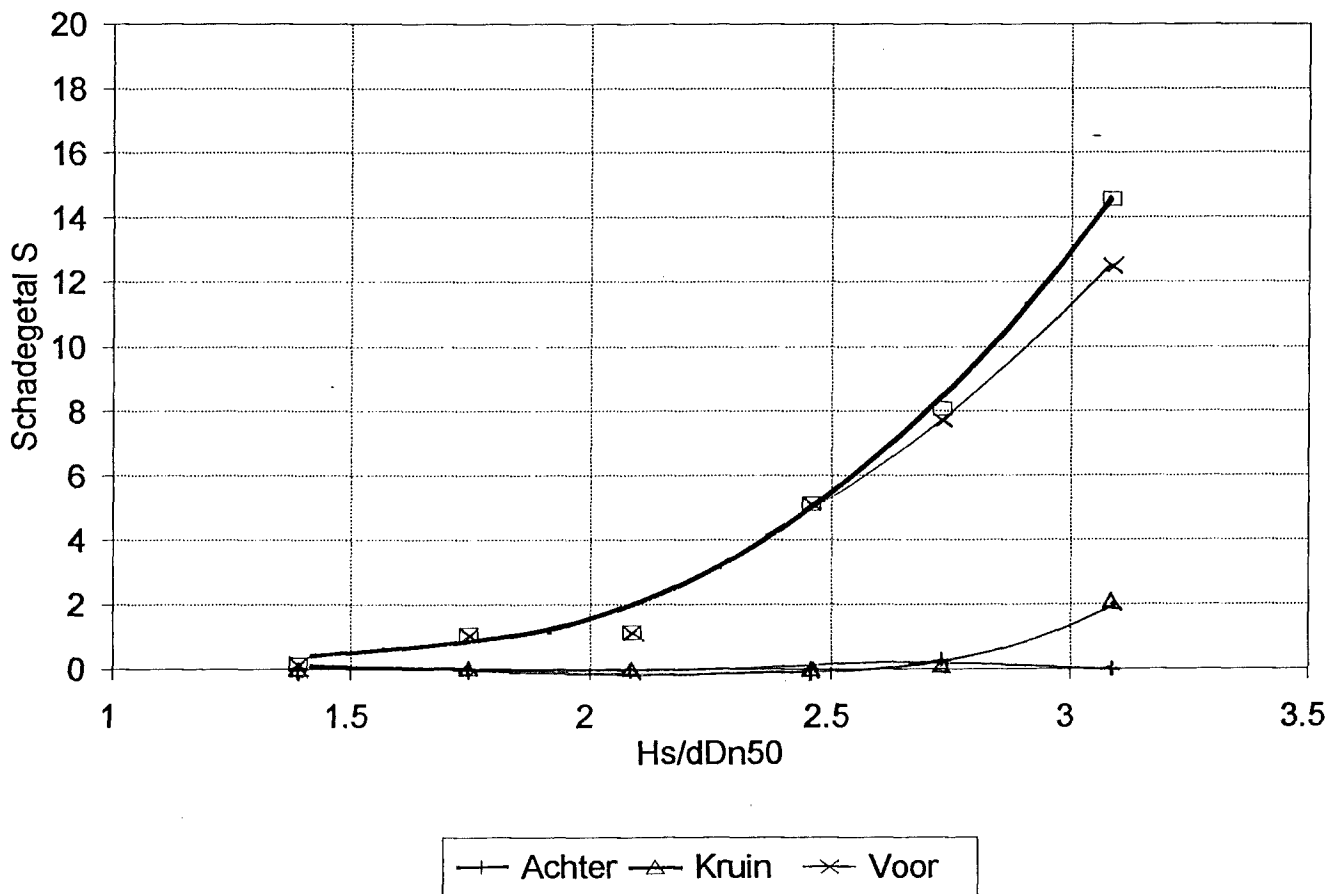


Schade vs stabiliteit

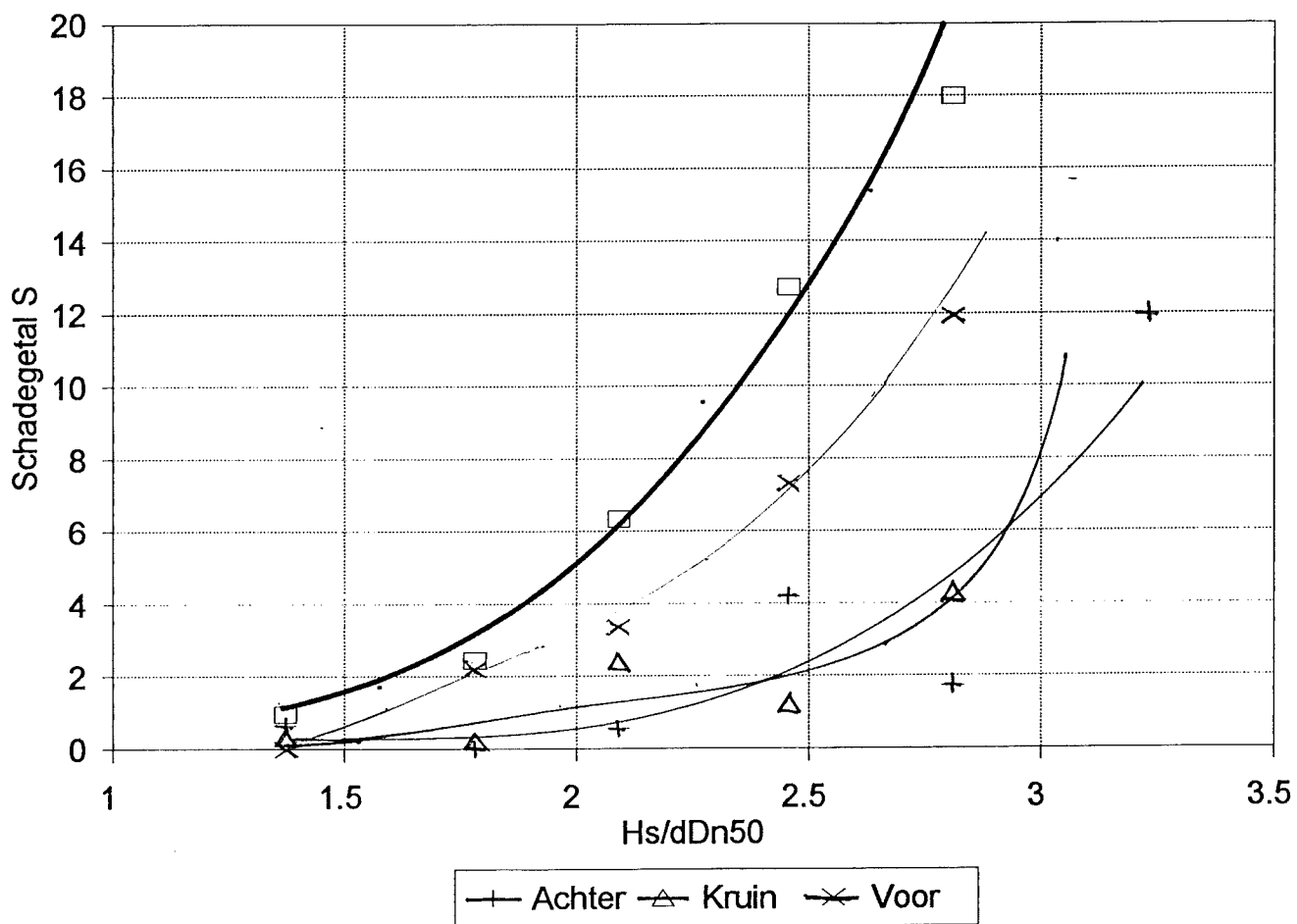
steensoort 2, met $s=0.02$



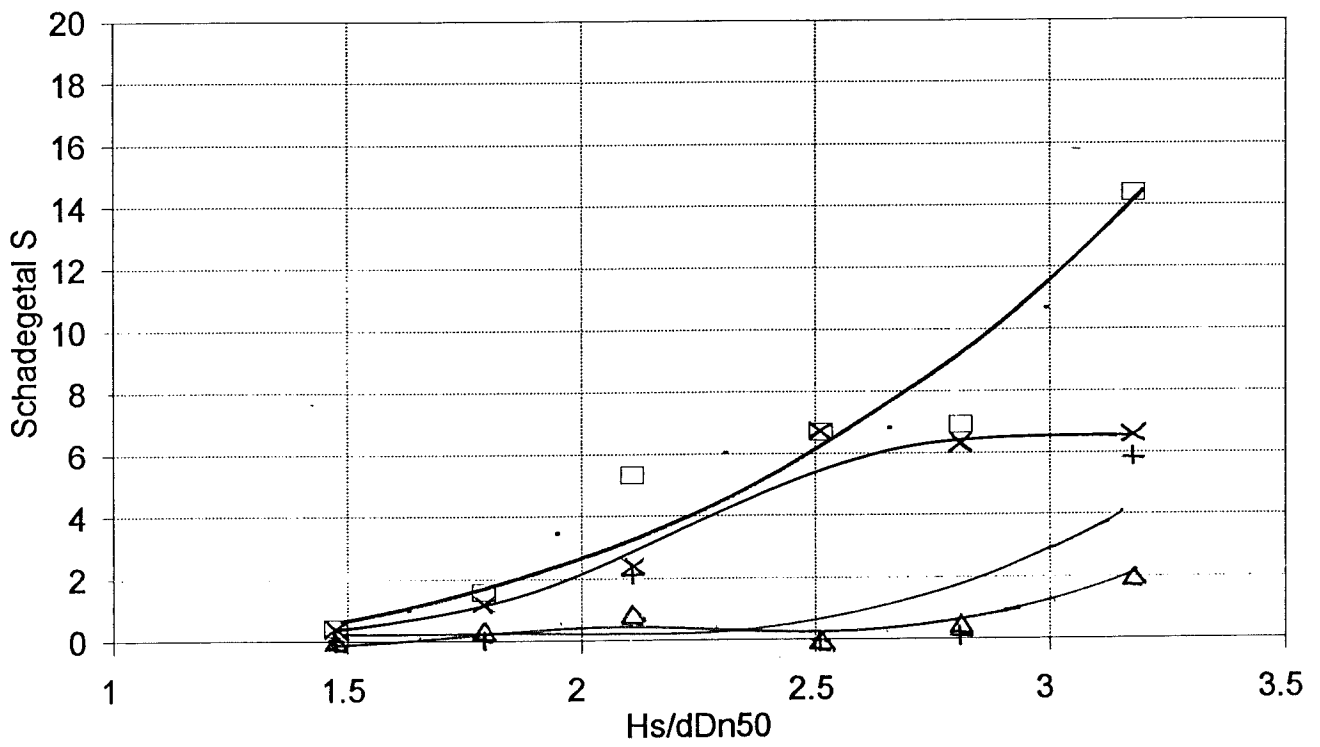
Schade vs stabiliteit steensoort 2, met $s=0.04$.



Schade vs stabiliteit steensoort 3, met $s=0.02$



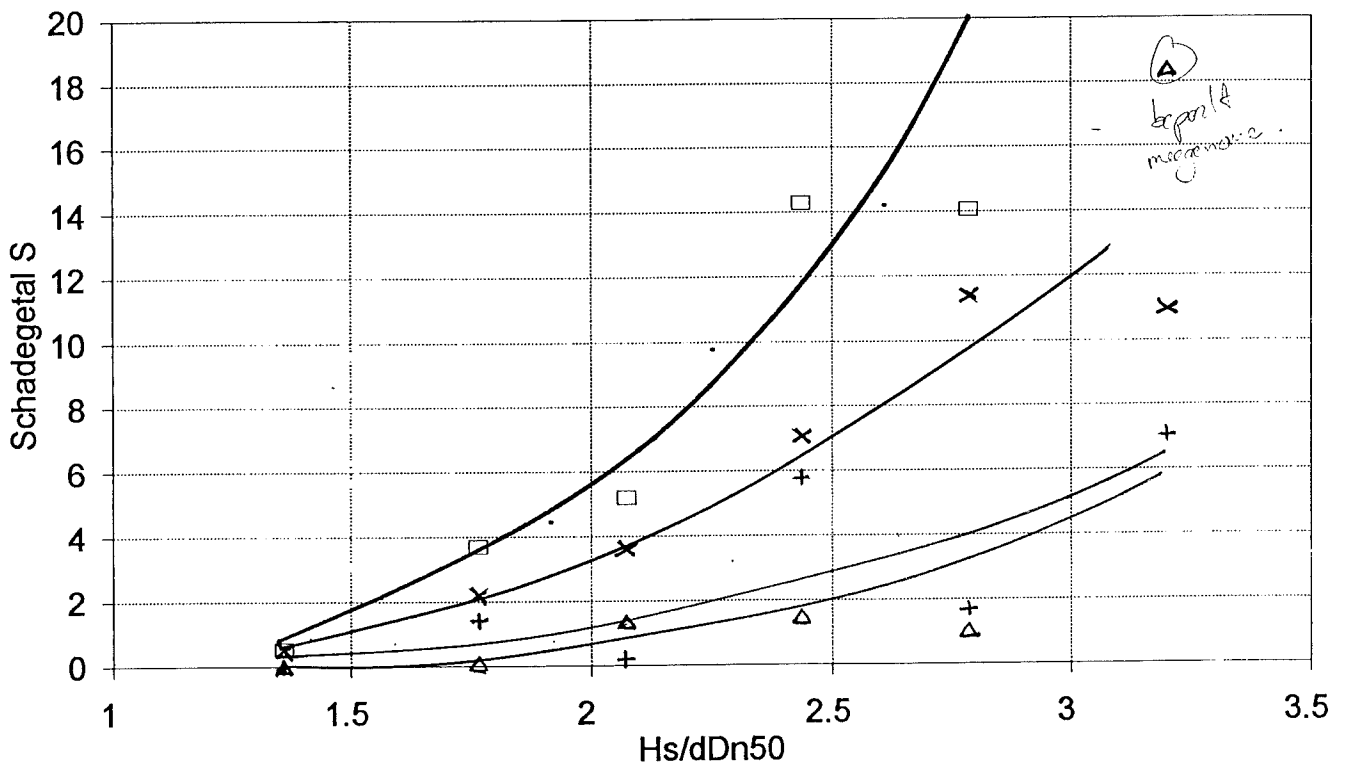
Schade vs stabiliteit steensoort 3, met $s=0.04$



—+— Achter —△— Kruin —×— Voor

Schade vs stabiliteit

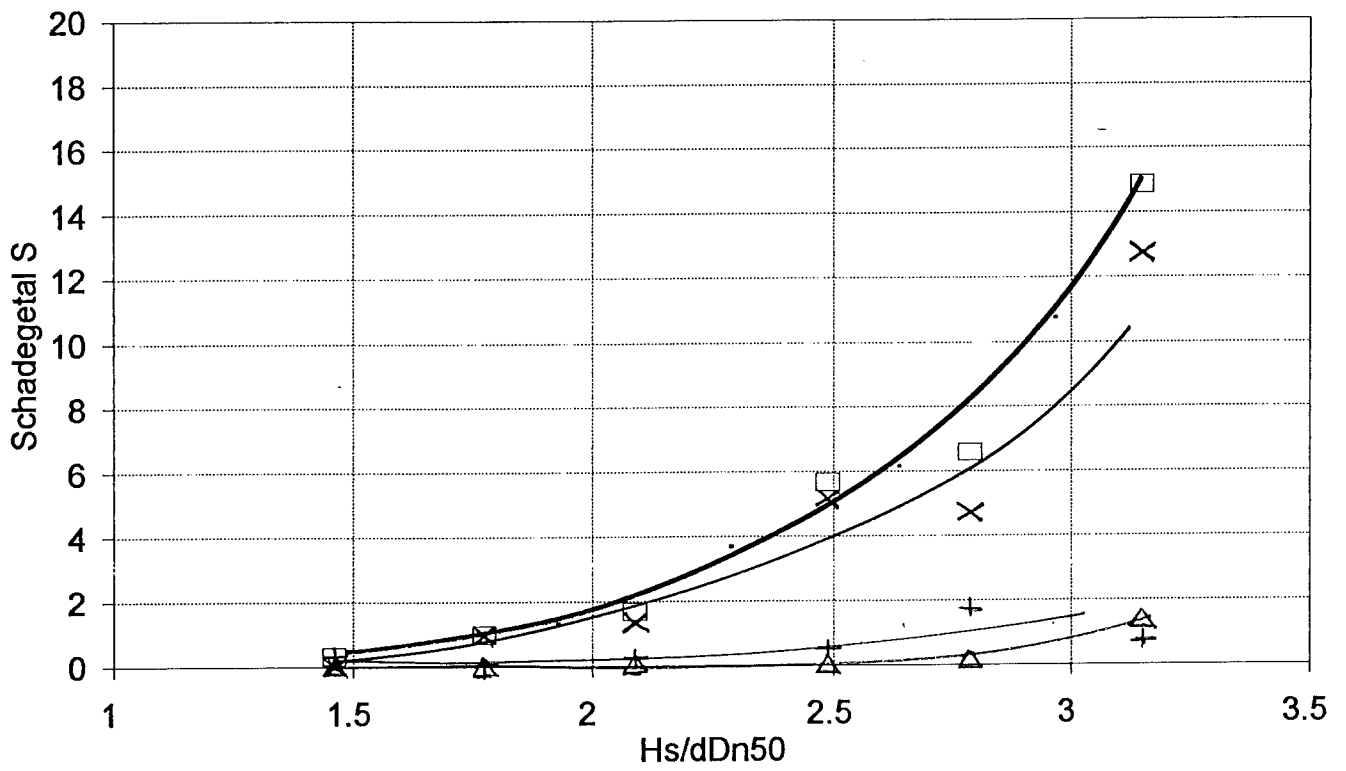
steensoort 4, met $s=0.02$



—+— Achter
—△— Kruin
—x— Voor

Schade vs stabiliteit

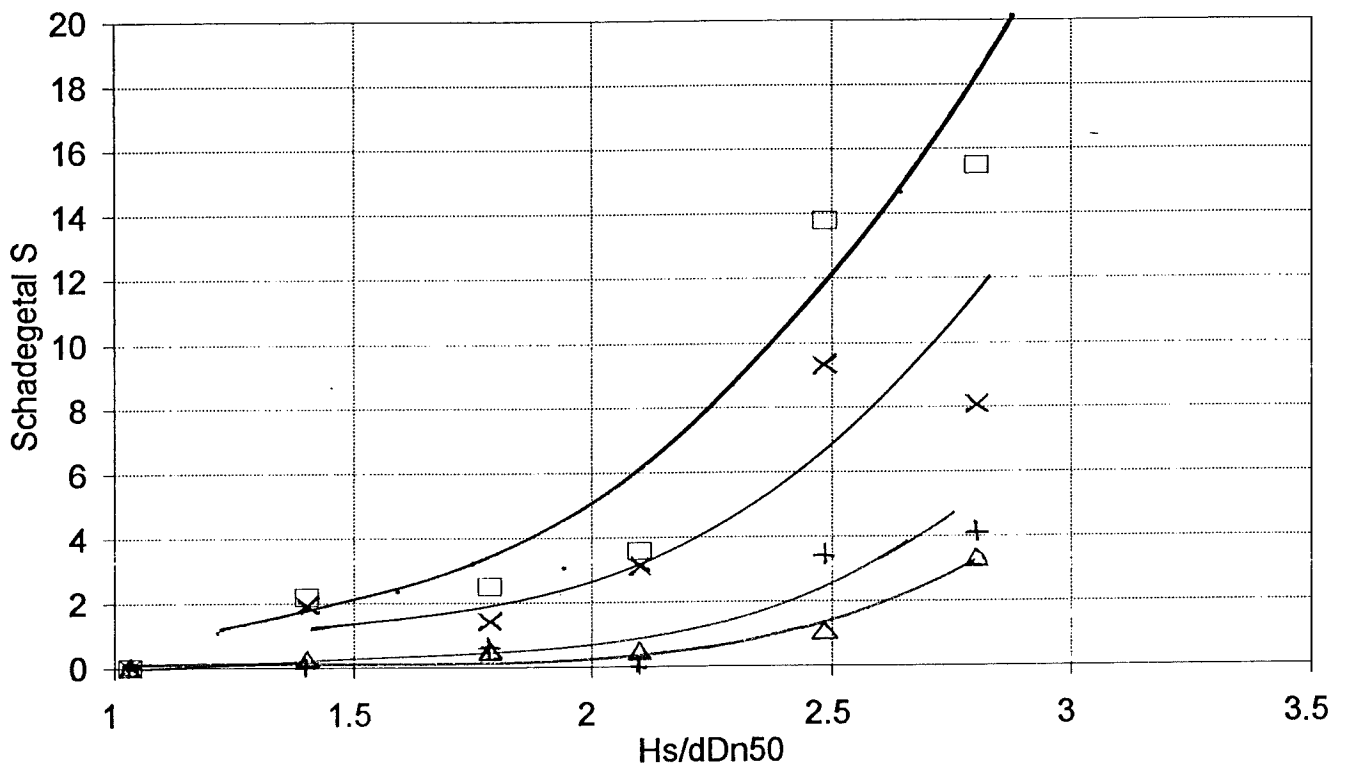
steensoort 4, met $s=0.04$



—+— Achter —△— Kruin —×— Voor

Schade vs stabiliteit

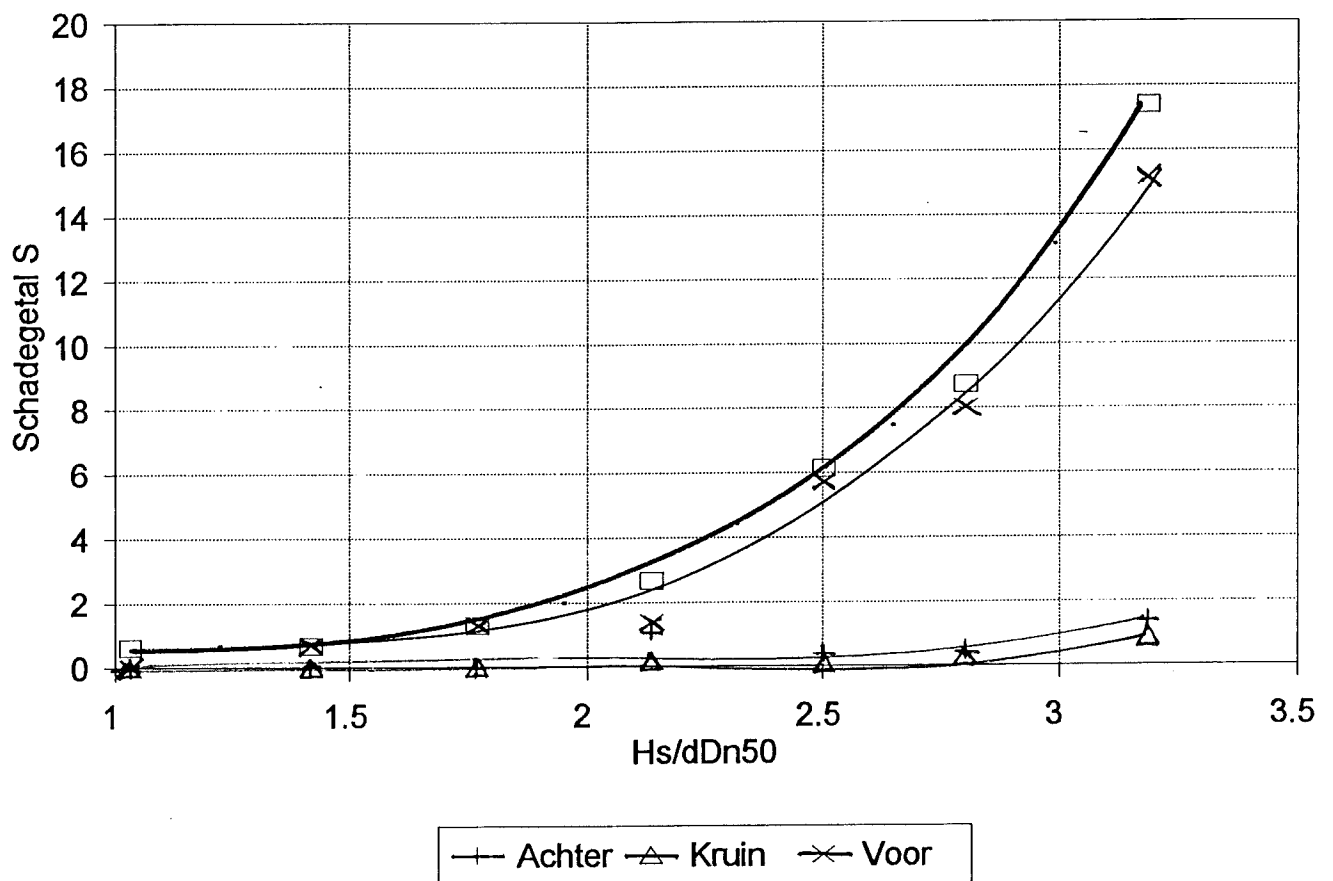
steensoort 5, met $s=0.02$



—+— Achter —△— Kruin —×— Voor

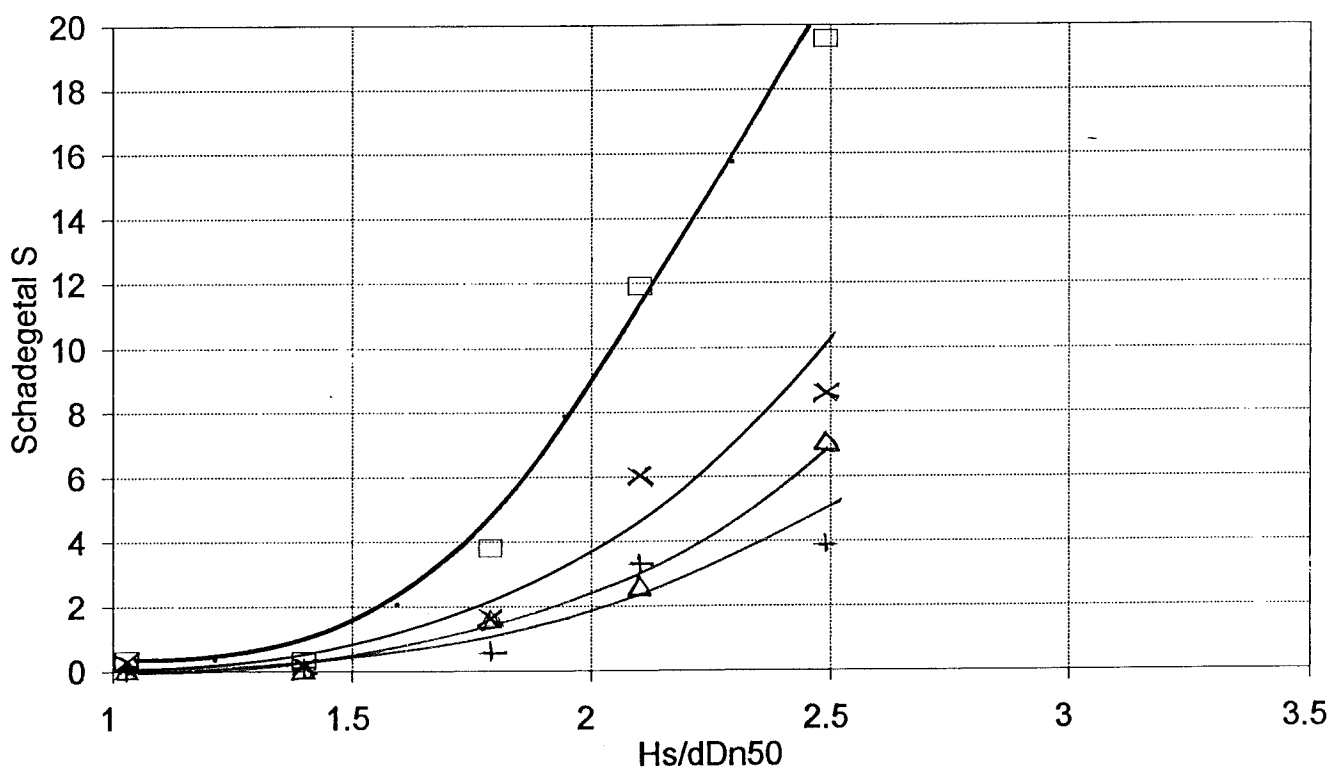
Schade vs stabiliteit

steensoort 5, met $s=0.04$



Schade vs stabiliteit

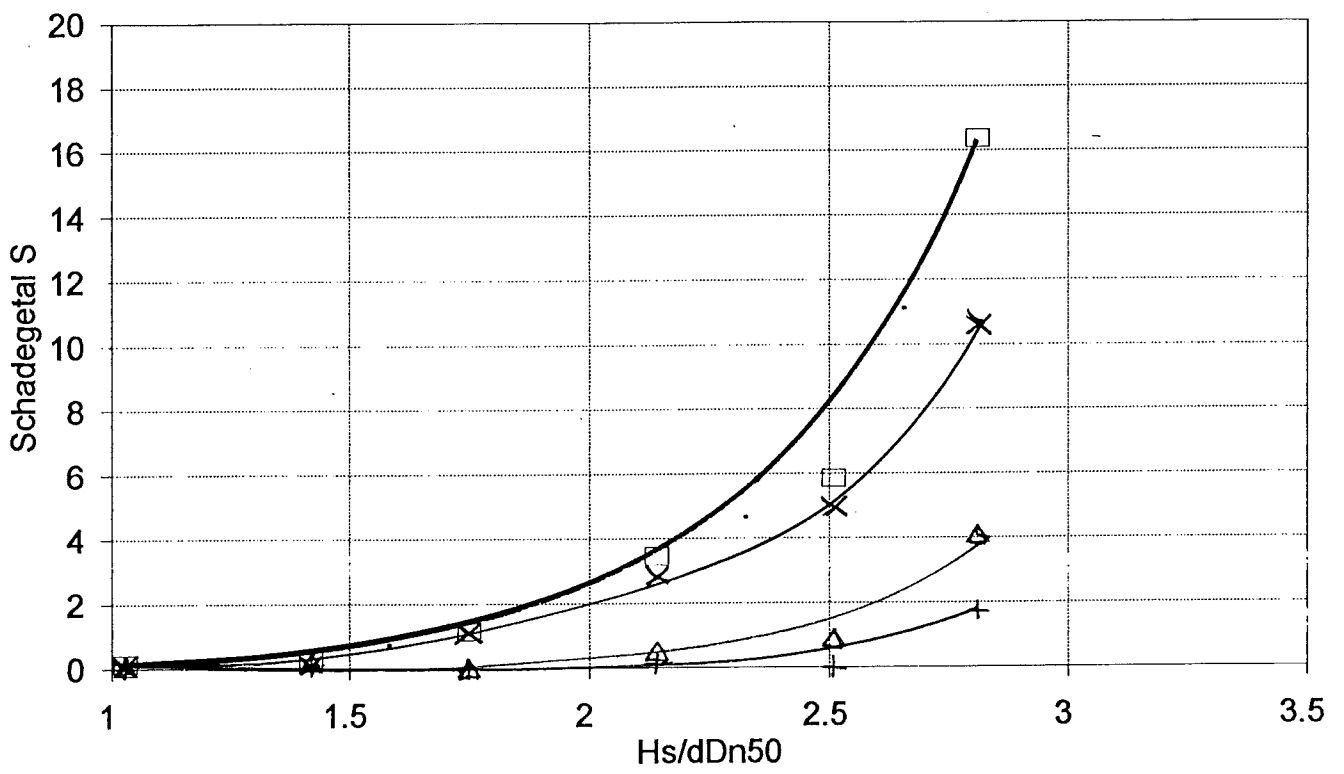
steensoort 6, met $s=0.02$



—+— Achter —△— Kruin —×— Voor

Schade vs stabiliteit

steensoort 6, met $s=0.04$



—+— Achter —△— Kruin —×— Voor