

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat,
Directie Zeeland (PBZ)



Verificatie van invloed van lange golven op stabiliteit van steenzettingen

Onderzoeksprogramma
Kennisleemtes Steenbekledingen

rapport

november 2004

H442 I

Ministerie van Verkeer en Waterstaat



Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
Dienst Weg- en Waterbouwkunde



WL | delft hydraulics

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat, Directie Zeeland (PBZ)

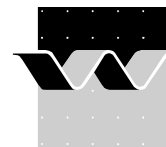
Verificatie van invloed van lange golven op stabiliteit van steenzettingen

Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen

I. Wenneker, M. Klein Breteler, W.D. Eysink en E.M. Coeveld

Rapport

november 2004



OPDRACHTGEVER:	Rijkswaterstaat, Directie Zeeland (PBZ)				
TITEL:	Verificatie van invloed van lange golven op stabiliteit van steenzettingen Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen				
SAMENVATTING:	<p>In het kader van het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen, in 2003 opgestart door de Dienst Weg- en Waterbouwkunde, heeft het voorliggende verslag betrekking op het deelonderzoek Gezette steenbekledingen, deelplan 7.1.2, Invloed van lange golfperiodes op stabiliteit, Deltagootonderzoek.</p> <p>Het doel van het in dit verslag beschreven onderzoek is de conclusies van Klein Breteler en Coeveld (2004) aangaande de invloed van lange golven op de stabiliteit van steenzettingen te verifiëren middels grootschalige proeven in de Deltagoot. Voor deze verificatie is gebruik gemaakt van een constructie in de Deltagoot met een talud van 1:3,5 bekleed met een steenzetting van Hydroblokken als toplaag. Deze bekleding is met extreme golven belast.</p> <p>Op basis van de analyse van de resultaten van het grootschalige modelonderzoek is vastgesteld dat de stabiliteit van relatief open steenzettingen toeneemt met toenemende waarde van de brekerparameter. Dit is conform de conclusies op basis van het eerder uitgevoerde kleinschalige modelonderzoek.</p>				
REFERENTIES:	Contract nummer: ZLA-5797 Opdrachtgever PBZ: Y. Provoost Projectbegeleider DWW: R. 't Hart				
VER	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
1.0	Wenneker/Klein Breteler/Eysink/ Coeveld	25-11-2004	definitief	H.J. Verheij	W.M.K. Tilmans
PROJECTNUMMER:	H4421.20				
TREFWOORDEN:	dijkbekleding, steenzetting, ANAMOS, golfklap, golffront, Deltagoot				
AANTAL BLADZIJDEN:	45 (tekst)				
VERTROUWELIJK:	<input type="checkbox"/> JA, tot (datum)		<input checked="" type="checkbox"/> NEE		
STATUS:	<input type="checkbox"/> VOORLOPIG	<input type="checkbox"/> CONCEPT	<input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF		

Inhoud

Lijst van Figuren

Lijst van Tabellen

Lijst van Symbolen

1	Inleiding.....	1
	1.1 Achtergrond	1
	1.2 Doelstelling.....	1
	1.3 Methodologie	1
	1.4 Leeswijzer.....	2
2	Beschrijving van Deltagootproeven.....	3
	2.1 Modelopstelling.....	3
	2.2 Meetsysteem.....	4
	2.3 Proevenprogramma	6
	2.4 Database en schade	7
3	Analyse van gemeten toplaagbeweging	9
	3.1 Eerste serie: zeer lange golven	9
	3.2 Tweede serie: lange golven.....	10
	3.3 Analyse van stabiliteit.....	12
4	Analyse van stijghoogteverschillen.....	17
	4.1 Stijghoogteverschil per drukopnemerpaar	17
	4.2 Stijghoogteverschil per golf	18
5	Analyse van golfbelasting op talud.....	21
	5.1 Beschrijving van geanalyseerde proeven.....	21
	5.2 Relevante parameters	24
	5.3 Schalingsaspecten.....	26

5.3.1	Howarth <i>et al.</i> (1996).....	27
5.3.2	Schaling volgens Weber	28
5.4	Analyse van golfbelasting op talud.....	31
5.4.1	Golfklap.....	32
5.4.2	Golffront	41
5.4.3	Conclusies op basis van analyse van golfbelasting op talud.....	43
6	Conclusies	45

Literatuur

Bijlagen

A **Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen**

B **Tabellen**

C **Figuren**

Lijst van Figuren

Figuren die in de tekst terug te vinden zijn:

Figuur 2.1	Locatie drukopnemers (open) en locatie fictieve drukopnemers (dicht).	6
Figuur 3.1	Proefresultaten en stabiliteitslijnen.	13
Figuur 4.1	Stijghoogteverschil over de toplaag met 2% overschrijdingsfrequentie als functie van de dimensieloze locatie ten opzichte van de stilwaterlijn	17
Figuur 4.2	Dimensieloze waarde van 2%-stijghoogteverschil als functie van ξ_{op} voor de Hydroblokken in de Deltagoot.....	18
Figuur 5.1	Definitie schets van parameters van golffront (boven) en golfklap (onder). 25	
Figuur 5.2	Stijghoogteverloop op het talud, binnen één golf	32
Figuur 6.1	Proefresultaten en stabiliteitslijnen	46

Figuren die in Bijlage C terug te vinden zijn:

Figuur C.1	Dwarsdoorsnede modelopstelling.	
Figuur C.2	Zeefkromme van filter- en inwasmateriaal.	
Figuur C.3	Bouw van steenzetting.	
Figuur C.4	Afwerking bovenrand en overzicht model na proef 12.	
Figuur C.5	Foto tijdens proef 14 en vervorming na proef 16.	
Figuur C.6	Overzicht van talud na proef 16 en voor 22.	
Figuur C.7	Foto tijdens proef 25 en overzicht van talud na proef 25.	
Figuur C.8	Schade na proef 26 (1).	
Figuur C.9	Schade na proef 26 (2).	
Figuur C.10	H-T correlatie (inkomend) signaal van proef T308 (boven) en proef 25 (onder)	
Figuur C.11	Overschrijdingskromme en energiedichtheidsspectrum van inkomende golven van proef T308	
Figuur C.12	Overschrijdingskromme en energiedichtheidsspectrum van inkomende golven van proef 25	
Figuur C.13	Overschrijdingskrommes van stijghoogteverschillen in drukopnemerpaar 1-4 in proef 15	
Figuur C.14	Overschrijdingskrommes van stijghoogteverschillen in drukopnemerpaar 5-8 in proef 15	
Figuur C.15	Overschrijdingskrommes van stijghoogteverschillen in drukopnemerpaar 9-12 in proef 15	

- Figuur C.16 Overschrijdingskrommes van stijghoogteverschillen in drukopnemerpaar 13-16 in proef 15
- Figuur C.17 Overschrijdingskromme van stijghoogteverschillen in drukopnemerpaar 17 in proef 15
- Figuur C.18 Overschrijdingskrommes van stijghoogteverschillen in proef 10 en proef 11
- Figuur C.19 Overschrijdingskrommes van stijghoogteverschillen in proef 12 en proef 13
- Figuur C.20 Overschrijdingskrommes van stijghoogteverschillen in proef 14 en proef 15
- Figuur C.21 Overschrijdingskrommes van stijghoogteverschillen in proef 16 en proef 22
- Figuur C.22 Overschrijdingskrommes van stijghoogteverschillen in proef 23 en proef 24
- Figuur C.23 Overschrijdingskrommes van stijghoogteverschillen in proef 25 en proef 26
- Figuur C.24 Verloop van het stijghoogteverschil rond het maximum in proef 15
- Figuur C.25 Verloop van het stijghoogteverschil rond het maximum in proef 25
- Figuur C.26 Aantal golfklappen en golffronten per totaal aantal golven.
- Figuur C.27 Aantal golfklappen en golffronten per totaal aantal golven tegen de golfsteilheid.
- Figuur C.28 Maximale druk t.o.v. het talud (p_{\max}).
- Figuur C.29 Maximale druk t.o.v. het talud (p_{\max}). Howarth-schaling.
- Figuur C.30 Maximale druk t.o.v. het talud (p_{\max}). Weber-schaling.
- Figuur C.31 Maximale druk t.o.v. het talud (p_{\max}) tegen golfsteilheid. Howarth-schaling.
- Figuur C.32 Maximale druk t.o.v. het talud (p_{\max}) tegen golfsteilheid. Weber-schaling.
- Figuur C.33 Maximale stijghoogte t.o.v. trog (ϕ_k).
- Figuur C.34 Maximale stijghoogte t.o.v. trog (ϕ_k). Howarth-schaling.
- Figuur C.35 Maximale stijghoogte t.o.v. trog (ϕ_k) tegen golfsteilheid. Weber-schaling.
- Figuur C.36 Breedte van de golfklap ($B_{\text{klap}50\%}$).
- Figuur C.37 $B_{\text{klap}50\%}$ tegen ϕ_k
- Figuur C.38 Gediptheid tijdens golfklap (ϕ_{dip}).
- Figuur C.39 Gediptheid tijdens golfklap (ϕ_{dip}) tegen golfsteilheid.
- Figuur C.40 Gediptheid tijdens golfklap (ϕ_{dip}) tegen golfsteilheid. Howarth-schaling.
- Figuur C.41 Gediptheid tijdens golfklap (ϕ_{dip}) tegen golfsteilheid. Weber-schaling.
- Figuur C.42 Belaste breedte $F_{\text{dip}}/(\phi_{\text{dip}}-0.4H_s)$ tijdens golfklap.
- Figuur C.43 Belaste breedte $F_{\text{dip}}\sin\alpha/(\phi_{\text{dip}}-0.4H_s)$ tijdens golfklap.
- Figuur C.44 Stijgtijd (t_{stijg}).
- Figuur C.45 Stijgtijd (t_{stijg}). Inzoom.
- Figuur C.46 Golfklapduur (t_k) tegen golfsteilheid.
- Figuur C.47 Golfklapduur (t_k) tegen golfsteilheid. Froude-schaling.

- Figuur C.48 Golfklapduur (t_k) tegen golfsteilheid. Weber-schaling.
- Figuur C.49 Geïntegreerde gediptheid tijdens golfklap (ϕ_{dip}).
- Figuur C.50 Geïntegreerde gediptheid tijdens golfklap (ϕ_{dip}). Froude-schaling.
- Figuur C.51 Belastingsduur ($\phi_{\text{dip}}/(\phi_{\text{dip}}-0,4H_s)$) tijdens golfklap.
- Figuur C.52 Belastingsduur ($\phi_{\text{dip}}/(\phi_{\text{dip}}-0,4H_s)$) tijdens golfklap. Inzoom.
- Figuur C.53 Belastingsduur ($\phi_{\text{dip}}/(\phi_{\text{dip}}-0,4H_s)$) tijdens golfklap tegen golfsteilheid.
- Figuur C.54 Gradiënt aan zeezijde van golfklap ($\theta_{k20\%-80\%}$).
- Figuur C.55 Gradiënt aan zeezijde van golfklap ($\theta_{k20\%-80\%}$) tegen golfsteilheid.
- Figuur C.56 Gradiënt aan zeezijde van golfklap ($\theta_{k50\%-80\%}$).
- Figuur C.57 Gradiënt aan zeezijde van golfklap ($\theta_{k50\%-80\%}$) tegen golfsteilheid.
- Figuur C.58 Hoogte van het golffront (ϕ_b) tegen golfsteilheid.
- Figuur C.59 Diepte van het golffront (ϕ_{min}).
- Figuur C.60 Helling van het golffront (θ_r) tegen golfsteilheid.
- Figuur C.61 Gediptheid tijdens golffront (ϕ_{dip}).

Lijst van Tabellen

Tabellen die in de tekst terug te vinden zijn:

Tabel 2.1	Positie drukopnemers in bekleding van Hydroblokken.....	5
Tabel 2.2	Vastgestelde golfparameters voor de uitgevoerde proeven.....	7
Tabel 2.3	Problemen met drukopnemers.....	8
Tabel 3.1	Waterpassing van gemerkte stenen in het talud tijdens proef met zeer lange golven (m ten opzichte van gootbodem).	9
Tabel 3.2	Waterpassingen van gemerkte stenen in het talud tijdens proef met lange golven (m ten opzichte van gootbodem).	12
Tabel 4.1	Stijghoogteverschil met bepaalde overschrijdingsfrequentie (onafhankelijk van de locatie waar het is opgetreden)	19
Tabel 5.1	Scheldegoot: proevenprogramma met Pierson-Moskowitz golfspectra op talud 1:3.....	22
Tabel 5.2	Scheldegoot: proevenprogramma met Pierson-Moskowitz golfspectra op talud 1:4.....	23
Tabel 5.3	Scheldegoot: proevenprogramma met dubbeltoppige golfspectra op talud 1:4	23
Tabel 5.4	Deltagootproeven: proevenprogramma met Pierson-Moskowitz golfspectrum op talud 1:3,5	23

Tabellen die in Bijlage B terug te vinden zijn:

Tabel B 1.	Gegevens per proef op basis van golfbelasting-analyse-software van Coeveld en Klein Breteler (2004).	
------------	--	--

Lijst van Symbolen

Symbol	Dimensie	Betekenis
$B_{\text{klap}50\%}$	m	breedte van de golfklap ter plaatse van de helft van p_{max}
D	m	dikte toplaag
F	-	stabiliteitsfactor
F_{dip}	m^2	dipkracht, gedefinieerd als de integraal van de gediptheid op één tijdstip over het gebied waar de gediptheid boven de drempelwaarde komt (vergelijkbaar met de opwaartse kracht op de toplaag, minus eigen gewicht, bij een bepaalde lek lengte)
g	m/s^2	versnelling van de zwaartekracht
h	m	stilwaterdiepte aan de teen van het talud
$H_{\text{m}0}$	m	significante golfhoogte aan de teen van het talud op basis van golfspectrum
H_s	m	significante golfhoogte aan de teen van het talud
L	m	karacteristieke lengtemaat
L_{op}	m	golf lengte op basis van de piekperiode ($= gT_p^2/(2\pi)$), teruggerekend naar diepwater
n_L	-	schaalfactor
p	N/m^2	druk ten opzichte van talud
p_{max}	m	druk ten opzichte van het talud tijdens een golfklap, op het moment dat ϕ_{max} optreedt
t_k	s	totale duur van de golfklap
$T_{\text{m}-1,0}$	s	spectrale maat voor de golfperiode
T_p	s	golfperiode bij de piek van het spectrum
t_{stijg}	s	stijgtijd, namelijk de tijdsduur vanaf het begin van de golfklap tot het moment waarop ϕ_{max} optreedt
S_{op}	-	golfsteilheid op diep water op basis van de piekperiode ($= H_s/L_{\text{op}}$)
x_s	m	horizontale afstand tussen waterlijn en locatie waar ϕ_{min} optreedt
V	m/s	karacteristieke snelheid
α	-	taludhelling
Γ_{klem}	-	klemfactor
Δ	-	relatieve dichtheid ($= (\rho_s - \rho_w)/\rho_w$)
θ_f	$^\circ$	helling van het golffront (gemiddelde tussen $0,9\phi_{\text{min}}$ en SWL)
$\theta_{\text{k}50\%-80\%k}$	$^\circ$	klapgradiënt tussen de locaties waar de stijghoogte (ten opzichte van het talud) in de <i>klap</i> gelijk is aan 50 % en 80 %
$\theta_{\text{k}20\%-80\%f}$	$^\circ$	klapgradiënt tussen de locaties waar de stijghoogte (ten opzichte van het minimum in de trog) in de <i>klap</i> gelijk is aan 20% en 80% van de fronthoogte

Symbol	Dimensie	Betekenis
ξ_{op}	-	$\tan\alpha/\sqrt{s_{op}}$ = brekerparameter op basis van piekperiode
ρ_s	kg/m ³	dichtheid van blokken
ρ_w	kg/m ³	dichtheid van water
σ_w	N/m	oppervlaktespanning van water (= $73 \cdot 10^{-3}$ N/m, bij 20 °C)
ϕ_b	m	hoogte van het golffront
ϕ_{dip}	m	gediptheid, gedefinieerd als het verschil tussen het afgevlakte stijghoogteverloop en het werkelijke stijghoogteverloop op een bepaald moment (vergelijkbaar met het stijghoogteverschil over de topklaag bij een bepaalde leklengte)
ϕ_k	m	maximale stijghoogte op het talud tijdens de golfklap ten opzichte van de minimale stijghoogte in de trog tussen de golfklap en het golffront, op het moment dat ϕ_{max} optreedt
ϕ_{klem}	m	aandeel in de stijghoogte dat de klemming tussen stenen representeert
ϕ_{max}	m	maximale stijghoogte tijdens een golfklap, ten opzichte van de stilwaterlijn
ϕ_{min}	m	minimale stijghoogte in de trog aan de voet van het front
ϕ_w	m	stijghoogteverschil over topklaag
$\phi_{wj\%}$	m	stijghoogteverschil dat door j % van de inkomende golven overschreden wordt
ϕ_{dip}	ms	geïntegreerde gediptheid, gedefinieerd als het oppervlak onder het verloop van de gediptheid als functie van de tijd boven een bepaalde drempelwaarde (maat voor de blokbeweging)

I Inleiding

I.1 Achtergrond

Ingevolge de Wet op de Waterkering dienen steenzettingen op waterkeringen vijfjaarlijks getoetst te worden. In de praktijk kan aan veel steenzettingen geen definitief toetsoordeel toegekend worden wegens een gebrek aan wetenschappelijke kennis.

In 2003 is daarom door de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen opgestart. Doel van dit programma is het reduceren van deze kennisleemtes teneinde te komen tot scherpere toetsregels en daarmee sneller en vaker tot definitieve toetsresultaten.

In het kader van dit onderzoeksprogramma heeft het voorliggende verslag betrekking op het deelonderzoek Gezette steenbekledingen, deelplan 7.1.2, Invloed van lange golfperiodes op stabiliteit, Deltagootonderzoek.

Het in het onderhavige rapport beschreven onderzoek is bedoeld ter verificatie van deelonderzoek Gezette steenbekledingen, deelplan 7.1.1, Invloed van lange golfperiodes op stabiliteit, Analyse meetresultaten kleinschalig modelonderzoek (Scheldegoot). Dit onderzoek betrof de kwantificering van de invloed van lange golven op de stabiliteit van steenzettingen en is uitgevoerd in 2003 in de Scheldegoot van WL | Delft Hydraulics (Kuiper en Van Vossen, 2003) in de vorm van kleinschalige modelproeven. De gemeten drukken op het talud zijn geanalyseerd met behulp van Zsteen en met behulp van de golfbelasting-analyse-software (Coeveld en Klein Breteler, 2004). De resultaten van dat onderzoek zijn beschreven in Klein Breteler en Coeveld (2004).

I.2 Doelstelling

Het doel van het onderhavige onderzoek is de conclusies van Klein Breteler en Coeveld (2004) aangaande de invloed van lange golven op de stabiliteit van steenzettingen te verifiëren middels grootschalige proeven in de Deltagoot.

I.3 Methodologie

Om de conclusies op basis van het kleinschalige onderzoek te verifiëren, is grootschalig modelonderzoek uitgevoerd en zijn de resultaten hiervan geanalyseerd. De proeven in de Deltagoot leveren informatie op over drie aspecten van de stabiliteit van steenzettingen bij een belasting met relatief lange golven, namelijk:

1. de maximaal toelaatbare golfhoogte bij twee verschillende golfsteilheden,
2. het stijghoogteverschil over de toplaag tijdens de golfbelasting, en
3. het stijghoogteverloop op de toplaag als functie van de tijd.

Voor het derde aspect zijn de resultaten geanalyseerd met behulp van de golfbelasting-analyse-software van Coeveld en Klein Breteler (2004). Op basis van deze analyse vindt

uiteindelijk de verificatie van de conclusies van Klein Breteler en Coeveld (2004) plaats, evenals de verificatie van de conclusies die voortvloeien uit de eerste twee bovenstaande aspecten.

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van een constructie in de Deltagoot met een talud van 1:3,5 bekleed met een steenzetting die veel in Nederland voorkomt. Deze bekleding is met extreme golven belast (tot aan de grens van de capaciteit van de Deltagoot). Het experimentele onderzoek is uitgevoerd onder leiding van ir. M. Klein Breteler en ir. W.D. Eysink. Het onderzoek werd namens de opdrachtgever begeleid door ir. R. 't Hart van de DWW van RWS.

1.4 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 is een beschrijving gegeven van de proeven die in 2004 uitgevoerd zijn in de Deltagoot. In Hoofdstuk 3 zijn de resultaten van deze proeven beschreven waar het de stabiliteit van de bekleding van Hydroblokken betrof (het eerste aspect in Paragraaf 1.3). Hoofdstuk 4 behandelt de analyse van de stijghoogteverschillen over de bekleding (het tweede aspect in Paragraaf 1.3). In Hoofdstuk 5 is beschreven van welke klein- en grootschalige proeven het stijghoogteverloop op het talud geanalyseerd is. Tevens is aangegeven op welke manier omgegaan is met de verschillen in schaal. De analyse van de proeven vormt het grootste deel van Hoofdstuk 5 (het derde aspect in Paragraaf 1.3). In Hoofdstuk 6 zijn de conclusies gegeven. Het totale overzicht van het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen, zoals het begin 2004 voorzien was, is weergegeven in Bijlage A.

2 Beschrijving van Deltagootproeven

2.1 Modelopstelling

Dijken in Nederland hebben veelal een taludhelling van 1:3 tot 1:4. Voor het onderzoek in 2003 is daarom gekozen voor een taludhelling van 1:3,5. Bij het huidige onderzoek is gebruik gemaakt van dezelfde dijk als die in 2003 in de Deltagoot is opgebouwd (Eysink en Klein Breteler, 2003).

Een overzicht van de modelopstelling is gegeven in Figuur C.1. In de figuur is te zien dat de teen van het talud is gemaakt op 171,00 m afstand van het golfschot. De dijk is opgebouwd door in lagen zand aan te brengen op een bestaand golfdempend talud en deze per laag te verdichten. Het deel van het talud dat niet door brekende golven zou worden belast, is afgewerkt met beton. Dit beton had bij de teen tot een hoogte van 2 m boven de gootbodem een dikte van 15 cm en in de golfoploopzone een dikte van 10 cm.

Om te voorkomen dat de betonlaag aan de teen zou worden opgedrukt tijdens het leegpompen van de goot, is een grindrain met twee drainagebuizen aangebracht en is de teen van de betonplaat opgesloten met hoekijzers. Het deel tussen 2 m en 6 m boven de gootbodem aan de gootzijde is de testsectie waar de te beproeven steenzetting is aangebracht. In de zone waar de golfaanval optreedt, namelijk tussen 2 m en 6 m boven gootbodem, is het zandtalud bedekt met een 50 cm dikke laag zandcementstabilisatie (zie Figuur C.1). Dit voorkomt dat er grondmechanische instabiliteit ontstaat tijdens de proeven en het representeert de kleilaag die in de praktijk wordt toegepast. Op de zandcementstabilisatie is een geotextiel aangebracht met daarop een filterlaag van gebroken graniet.

Voor het huidige onderzoek is een bekleding van Hydroblokken toegepast. Deze hebben een werkende breedte van 25 cm, een lengte van 25 cm en een hoogte van 15 cm. De blokken werden geplaatst op een filterlaag met een dikte van 5 à 6 cm bestaande uit gebroken graniet van 22 – 40 mm. De zeefkromme van het filtermateriaal is gegeven in Figuur C.2. In verband met het feit dat de dikte van de Hydroblokken en van het filter kleiner is vergeleken met de in 2003 gebruikte bekleding (Eysink en Klein Breteler, 2003), is aan de onderzijde en de bovenzijde van de testsectie over een lengte van 2 m een geleidelijke overgang gemaakt naar de betonnen taludbekleding door het filter dikker te maken (zie Figuur C.3).

De rij Hydroblokken bij de gootwand zijn op maat gezaagd. De steenzetting is aan beide zijden van de goot opgesloten door tamelijk stugge rubberplaten met een dikte van circa 2 cm. Hierdoor heeft een rij blokken de kans gekregen om op te bollen zonder daarbij door de gootwand te worden gehinderd. Daarnaast werden de blokken bij de gootrand opgesloten door hoekijzers om eventuele schade door wandeffecten te vermijden (zie Figuur C.4)

De blokken zouden worden geleverd met een soortelijke massa van 1935 kg/m^3 . Bij controle bleek dit een stuk hoger te zijn en is besloten (in verband met de benodigde vlotte doorgang van de werkzaamheden en omdat de gewenste dichtheid vermoedelijk niet was te leveren) om de dichtheid van de stenen te verlagen door er horizontaal een gat door te boren en dat

gat op te vullen met een cilinder van schuimmateriaal (zie Figuur C.3). De soortelijke massa is door weging van vier blokken bepaald: 1935 kg/m^3 , 1940 kg/m^3 , 1963 kg/m^3 en 1969 kg/m^3 . Op deze wijze is de soortelijke massa teruggebracht tot gemiddeld 1952 kg/m^3 .

De bekleding van Hydroblokken was ingewassen met inwasmateriaal bestaande uit gebroken graniet van 4 – 40 mm (zie Figuur C.2). De steenzetting is alleen ingewassen vóór het belasten met golven en na het herstel van de schade door de extreem lange golven na de eerste serie proeven van het onderzoek.

2.2 Meetsysteem

Het onderzoek richtte zich op het vaststellen van het drukverloop onder en boven de Hydroblokken bij de gegeven golfbelasting waarbij de steenzetting bezwijkt. Voor het verzamelen van de benodigde drukgegevens zijn 34 drukdozen met een snelle responsie (merk: Kulite, type: HKM-375M-1) in 21 stenen ingebouwd. Hiertoe is een gat van 100 mm door de stenen geboord, waarin vervolgens een 80 mm messing koker is vastgekit. De drukdozen zijn met ballast in hierin passende cilinders aangebracht, die na het zetten van de stenen in de messing kokers zijn geplaatst. In al deze 21 stenen is de druk aan de bovenzijde van de steen gemeten en in 13 van deze stenen tevens aan de onderzijde. De stenen zijn zo goed mogelijk volgens een gewenst patroon van afstanden langs het talud geplaatst in een strook op circa 0,70 m afstand van de gootwand (Figuur C.4) en vervolgens met een stalen kabel aan andere stenen vastgezet.

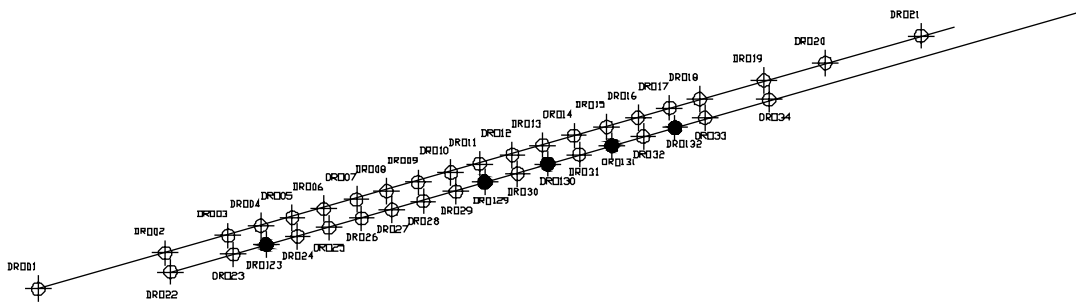
De grootste drukvariatie langs het talud treedt op in de brekerzone aan de bovenzijde van de steenzetting. Het drukverloop in het filter verloopt wat geleidelijker. Daarom zijn de meeste drukopnemers aan de bovenzijde in de brekerzone geplaatst. Voor het vaststellen van de ideale locatie van de drukopnemers is gebruik gemaakt van de ervaringen uit het kleinschalig modelonderzoek (Klein Breteler en Coeveld, 2004). Toen is vastgesteld dat de golfklappen optreden op een diepte tussen $1,0H_s$ en $2,5H_s$, met de grootste golfklappen op een diepte van ongeveer $2,0H_s$ onder de stilwaterlijn. De golffronten treden voor $3,5 < \xi_{op} < 5$ op in de zone tussen $1,5H_s$ en $2,5H_s$ onder de stilwaterlijn. Op basis hiervan is gekozen voor een dichte instrumentatie in de zone tussen $1,2H_s$ en $3,0H_s$, met ook enkele drukopnemers buiten deze zone met een wat grotere onderlinge afstand. In de dicht geïnstrumenteerde zone is in elk blok een drukopnemer aan de bovenzijde geplaatst. Rond het niveau waar de grootste stijghoogteverschillen te verwachten zijn, is ook in elk blok een drukopnemer aan de onderzijde geplaatst. Die zone komt overeen met de onderste helft van de dicht geïnstrumenteerde zone, omdat de grootste stijghoogteverschillen net onder de grootste golfklappen plaatsvinden, die weer wat dieper vallen dan de kleinere golfklappen. In de bovenste helft van de dicht geïnstrumenteerde zone is om het blok een drukopnemer aan de onderzijde geplaatst.

De werkelijke positie van de drukopnemers is na de inbouw opgemeten (Tabel 2.1). Van beneden naar boven zitten de drukopnemers DRO01 t/m DRO21 aan de bovenkant van de stenen en drukopnemers DRO22 t/m DRO34 aan de onderzijde van de stenen (respectievelijk de drukopnemers DRO02, DRO03, DRO05 t/m DRO10, DRO12, DRO14, DRO16, DRO18 en DRO19). In Tabel 2.1 zijn tevens 5 fictieve drukopnemers opgenomen, die in werkelijkheid niet aanwezig waren. Deze zijn toegevoegd om de analyse te vergemakkelijken. Gezien het feit dat de stijghoogte in het filter een vrij vloeiend verloop heeft als functie van de plaats, is de stijghoogte tussen twee drukopnemers vrij goed te

benaderen met lineaire interpolatie. Op plaatsen waar er wel een drukopnemer op het blok zat, maar niet eronder, is een fictieve drukopnemer toegevoegd in het filter door lineaire interpolatie. Dit maakt het mogelijk om ook voor die blokken het stijghoogteverschil over de toplaag te bepalen. De locaties van de drukopnemers staan tevens in Figuur 2.1.

Opnemer	x (m)	y (m)	z (m)	Opmerkingen
DRO01	180.55	0.70	2.566	Bovenzijde steenzetting
DRO02	181.52	0.70	2.839	Bovenzijde steenzetting
DRO03	182.00	0.70	2.972	Bovenzijde steenzetting
DRO04	182.25	0.70	3.045	Bovenzijde steenzetting
DRO05	182.49	0.70	3.110	Bovenzijde steenzetting
DRO06	182.73	0.70	3.176	Bovenzijde steenzetting
DRO07	182.98	0.70	3.247	Bovenzijde steenzetting
DRO08	183.21	0.70	3.311	Bovenzijde steenzetting
DRO09	183.45	0.70	3.379	Bovenzijde steenzetting
DRO10	183.70	0.70	3.453	Bovenzijde steenzetting
DRO11	183.92	0.70	3.519	Bovenzijde steenzetting
DRO12	184.17	0.70	3.588	Bovenzijde steenzetting
DRO13	184.40	0.70	3.661	Bovenzijde steenzetting
DRO14	184.64	0.70	3.734	Bovenzijde steenzetting
DRO15	184.89	0.70	3.801	Bovenzijde steenzetting
DRO16	185.13	0.70	3.871	Bovenzijde steenzetting
DRO17	185.37	0.70	3.946	Bovenzijde steenzetting
DRO18	185.60	0.70	4.013	Bovenzijde steenzetting
DRO19	186.09	0.70	4.154	Bovenzijde steenzetting
DRO20	186.56	0.70	4.289	Bovenzijde steenzetting
DRO21	187.29	0.70	4.495	Bovenzijde steenzetting
DRO22	181.56	0.70	2.695	Onder DRO02
DRO23	182.04	0.70	2.828	Onder DRO03
<i>DRO123</i>	<i>182.29</i>	<i>0.70</i>	<i>2.904</i>	<i>Fictieve drukopnemer; onder DRO04</i>
DRO24	182.53	0.70	2.966	Onder DRO05
DRO25	182.77	0.70	3.032	Onder DRO06
DRO26	183.02	0.70	3.103	Onder DRO07
DRO27	183.25	0.70	3.167	Onder DRO08
DRO28	183.49	0.70	3.235	Onder DRO09
DRO29	183.74	0.70	3.309	Onder DRO10
<i>DRO129</i>	<i>183.96</i>	<i>0.70</i>	<i>3.381</i>	<i>Fictieve drukopnemer; onder DRO11</i>
DRO30	184.21	0.70	3.444	Onder DRO12
<i>DRO130</i>	<i>184.44</i>	<i>0.70</i>	<i>3.518</i>	<i>Fictieve drukopnemer; onder DRO13</i>
DRO31	184.68	0.70	3.590	Onder DRO14
<i>DRO131</i>	<i>184.93</i>	<i>0.70</i>	<i>3.658</i>	<i>Fictieve drukopnemer; onder DRO15</i>
DRO32	185.17	0.70	3.727	Onder DRO16
<i>DRO132</i>	<i>185.41</i>	<i>0.70</i>	<i>3.796</i>	<i>Fictieve drukopnemer; onder DRO17</i>
DRO33	185.64	0.70	3.869	Onder DRO18
DRO34	186.13	0.70	4.010	Onder DRO19

Tabel 2.1 Positie drukopnemers in bekleding van Hydroblokken. x: afstand vanaf middenpositie golfshot; y: afstand tot gootwand bij meetruimte; z: afstand tot gootbodem. Cursief: de fictieve drukopnemers die in de analyse gebruikt zijn, maar niet werkelijk aanwezig waren.



Figuur 2.1 Locatie drukopnemers (open) en locatie fictieve drukopnemers (dicht).

Alle drukopnemers werden na het op peil brengen van de waterstand in de goot voor een proef op nul gezet; de meters meten dus de drukvariaties ten opzichte van de druk bij stilwaterniveau. De druksignalen zijn met een frequentie van 200 Hz bemonsterd en daarna met een 100 Hz low-pass-filter gefilterd. Dit werd voldoende geacht om een nauwkeurige weergave van de belasting te verkrijgen.

In de goot zijn drie golfhoogtemeters geïnstalleerd om de golfcondities in de goot te meten en te analyseren. De golfhoogtemeters zijn op een onderlinge afstand in de goot geplaatst die afhankelijk is van de golflengte.

Tijdens de proeven was er continu iemand aanwezig om te zien of er schade optrad. Verder is op gezette tijden de waterstand verlaagd om eventuele schade visueel vast te stellen. Bij die gelegenheden zijn ook steeds 20 gemerkte punten op het talud nauwkeurig ingemeten. De gemerkte stenen (met een schroef en gele verf) lagen in het meest kritische gebied van het talud verdeeld over vier raaien langs het talud. Raai 1 lag op 1,0 m van de gootwand aan de zijde van de bouwhal en raai 4 op 1,0 m van de gootwand aan de zijde van de meetcabine. De raaien 2 en 3 lagen hier op gelijke afstanden tussenin. De punten zijn per raai steeds van hoog naar laag op het talud genummerd. De bovenkant van de raaien waren gemarkeerd met een bout in het beton boven de meetsectie. Deze bout was het vaste punt om de hoogte van de schroef op de stenen te meten en de schroef was het vaste punt voor het plaatsen van de baak voor het waterpassen. Op deze wijze kon op betrouwbare wijze worden nagegaan of er vervorming van de steenzetting optrad.

2.3 Proevenprogramma

De Deltagootproeven zijn in twee series onder te verdelen; één serie met lange golven (proef 10 tot en met proef 16), en één met zeer lange golven (proef 22 tot en met proef 26). Het proevenprogramma is weergegeven in Tabel 2.2.

Serie I – Zeer lange golven

De sterkte van de steenzetting van Hydroblokken is in eerste instantie beproefd gedurende verschillende golfcondities, met een gebruikelijke duur van circa 1000 golven per conditie, met zeer lange golven met een golfsteilheid $s_{op} = H_s / (1,56T_p^2) \approx 0,003$ en een brekerparameter $\xi_{op} \approx 5$. Met het toenemen van de golfhoogte werd ook de waterstand

verhoogd om de golfaanval zoveel mogelijk binnen het gebied met drukopnemers te houden. Toen bij de hoogst mogelijke golven in de Deltagoot bij $s_{op} = 0,0033$ nog geen schade was opgetreden, is er nog een proef met iets grotere golfsteilheid ($s_{op} = 0,0045$) en grotere golven uitgevoerd.

Serie 2 – Lange golven

Na het uitvoeren van de proevenserie met zeer lange golven is de steenzetting van Hydroblokken opnieuw ingewassen en beproefd, maar nu met wat minder lange golven. Deze proevenserie is uitgevoerd met golven met een golfsteilheid $s_{op} = H_s / (1,56T_p^2) \approx 0,007$ en een brekerparameter $\xi_{op} \approx 3,5$. Ook nu werd met het toenemen van de golfhoogte de waterstand verhoogd om de golfaanval zoveel mogelijk binnen het gebied met drukopnemers te houden.

Proef	h (m)	H _{m0} (m)	T _p (s)	T _{m-10} (s)	s _{op} (-)	ξ _{op} (-)	H _s /ΔD	F (-)
10	4,20	0,27	4,47	4,14	0,0087	3,07	1,89	4,0
11	4,20	0,48	8,99	7,90	0,0038	4,63	3,36	9,3
12A	4,50	0,55	10,11	8,84	0,0034	4,86	3,85	11,1
12B	4,52	0,56	9,78	8,90	0,0038	4,66	3,92	10,9
13	4,80	0,65	11,31	9,34	0,0033	5,01	4,55	13,3
14	5,02	0,76	12,16	9,97	0,0033	4,98	5,32	15,5
15	5,17	0,84	12,82	10,44	0,0033	4,99	5,88	17,2
16	5,18	0,96	11,74	9,50	0,0045	4,28	6,72	17,7
22	4,40	0,51	6,86	6,17	0,0069	3,43	3,57	8,1
23	4,41	0,63	7,64	6,89	0,0069	3,43	4,41	10,0
24	4,75	0,74	8,37	7,38	0,0068	3,47	5,18	11,9
25	4,80	0,89	9,21	7,90	0,0067	3,48	6,23	14,3
26	4,90	1,05	9,46	8,19	0,0075	3,29	7,35	16,3

Tabel 2.2 Vastgestelde golfparameters voor de uitgevoerde proeven.

2.4 Database en schade

Alle relevante gegevens zijn per proef verzameld in een elektronische database. De database kent twee soorten bestanden:

- SEQ-bestanden, waarin alle basisgegevens van een proef zijn vermeld, zoals projectnummer, datum, proefnummer, posities van de golf- en drukopnemers, proefduur, enzovoort, en
- DAT-bestanden, waarin alle meetgegevens van de golfhoogtemeters en de drukopnemers zijn opgeslagen.

Er zijn bovendien DAT-bestanden gegenereerd waarin, naast de gemeten data, ook de geïnterpoleerde data in de fictieve drukopnemers is opgenomen.

Daarnaast is van het modelonderzoek een dagboek bijgehouden, waarin de uitgevoerde werkzaamheden, proeven en bijzonderheden zijn vermeld.

Uit de DAT-bestanden zijn de golfgegevens geanalyseerd en verwerkt tot een golfoverschrijdingskromme en een energiedichtheidspectrum, zie bijvoorbeeld Figuur C.11 en Figuur C.12. Hieruit zijn de werkelijk gerealiseerde waarden van H_{m0} en T_p van de inkomende golf bepaald (zie Tabel 2.2 of Tabel 5.4). Nadat het talud opnieuw was ingewassen is de tweede proevenserie begonnen met proef 22.

Proef 12 is vanwege het late tijdstip op de dag halverwege afgebroken. In de analyse is deze proef verder als één beschouwd.

Tijdens de metingen zijn er problemen voorgekomen met enkele van de drukopnemers. In enkele gevallen ging de drukopnemer stuk of gaf geen bruikbare informatie meer. Deze drukopnemers zijn zo spoedig mogelijk op een geschikt moment tijdens het onderzoek vervangen door beschikbare reserve drukopnemers. Tijdens de volgende proeven zijn de defecte drukopnemers nagekeken en zo mogelijk hersteld om weer reserve drukopnemers ter beschikking te hebben, enz. (zie Tabel 2.3). Uiteindelijk heeft ruim 96 % van de instrumentatie goed gewerkt.

Proef	Opnemer	Opmerking
10-12	DRO34	Nulverloop tijdens proef. Signaal niet bruikbaar.
13-14	DRO06	Na 2 uur en 28 minuten opnemer niet goed. Signaal niet bruikbaar.
	DRO34	Nulverloop tijdens proef. Signaal niet bruikbaar.
15	DRO06	Nulverloop tijdens proef. Signaal niet bruikbaar.
	DRO18	Vertoont na 2867s offset. Signaal is na correctie hiervoor bruikbaar.
16	DRO06	Nulverloop tijdens proef. Signaal niet bruikbaar.
22	DRO06	Nulverloop tijdens proef. Signaal niet bruikbaar.
23	DRO06	Nulverloop tijdens proef. Signaal niet bruikbaar.
	DRO09	Na ca. 1 uur golven verloop van nul. Signaal niet bruikbaar.
24	DRO06	Nulverloop tijdens proef. Signaal niet bruikbaar.
25	DRO09	Nulverloop tijdens proef. Signaal niet bruikbaar.
26	DRO34	Voor proef DRO06 en DRO09 schoongemaakt. DRO34 vertoont na 2456 offset. Signaal is na correctie hiervoor bruikbaar.

Tabel 2.3 Problemen met drukopnemers.

De schade aan de steenzetting werd visueel vastgesteld en achteraf, na het afpompen van het water, op foto vastgelegd.

3 Analyse van gemeten toplaagbeweging

3.1 Eerste serie: zeer lange golven

De gegevens van de waterpassing van de gemerkte stenen in Fase 1 zijn vermeld in Tabel 3.1. De tabel laat zien dat er slechts geringe vervorming (oplichting) tijdens de hele proef is opgetreden.

Raai	Steen	Voor proef 10	Na proef 12	Na proef 14	Na proef 16	Grootste verplaatsing (mm)
		08-09-2004	10-09-2004	13-09-2004	14-09-2004	
1	1	3,911	3,912	3,912	3,914	4
	2	3,696	3,696	3,696	3,701	5
	3	3,482	3,482	3,482	3,486	4
	4	3,272	3,273	3,273	3,274	2
	5	3,078	3,079	3,078	3,079	1
2	6	3,898	3,898	3,898	3,903	5
	7	3,679	3,680	3,680	3,685	6
	8	3,473	3,473	3,474	3,478	5
	9	3,262	3,263	3,263	3,266	4
	10	3,060	3,060	3,060	3,059	-1
3	11	3,890	3,891	3,890	3,891	1
	12	3,677	3,677	3,677	3,681	4
	13	3,462	3,463	3,463	3,464	2
	14	3,253	3,253	3,253	3,250	-3
	15	3,052	3,052	3,052	3,053	1
4	16	3,879	3,879	3,879	3,880	1
	17	3,671	3,672	3,671	3,673	2
	18	3,454	3,454	3,454	3,454	0
	19	3,250	3,251	3,250	3,251	1
	20	3,048	3,048	3,048	3,048	0

Tabel 3.1 Waterpassing van gemerkte stenen in het talud tijdens proef met zeer lange golven (m ten opzichte van gootbodem).

Uit deze metingen blijkt dat er tot en met proef 14 niets is gebeurd. Ook de visuele inspecties na proeven 12 en 14 bevestigden dat er geen merkbare veranderingen te zien waren.

Na proef 12 was er in de onderste helft van de dicht geïnstrumenteerde zone, namelijk tussen de raaien 181 ($z = 2,7$ m, drukopnemer 2) en 184 ($z = 3,5$ m, drukopnemer 11), gemiddeld 4 à 5 cm inwasmateriaal tussen de blokken weg. In sommige spleten liep dat op

tot circa 9 tot 15 cm. De rest van het talud zag er goed uit, met vrijwel geen uitspoeling van inwasmateriaal.

Na proef 14 was het aangevallen gebied iets naar boven toe uitgebreid tot de raai 185 ($z = 3,8$ m, drukopnemer 15). Gemiddeld was de uitspoeling van inwasmateriaal in dat gebied ook iets toegenomen tot 5 à 6 cm. Op sommige plaatsen was het inwasmateriaal tot aan de onderkant van de blokken uitgespoeld. De rest van het talud zag er nog steeds goed uit.

Tijdens proef 16 is de grootste vervorming van de toplaag opgetreden. De bekleding is over een groot gebied ongeveer een 0,5 à 1,5 centimeter omhoog gekomen (zie Figuur C.5). De twee rijen stenen (rond raai 185,5 m, $z = 3,9$ à 4,0 m, drukopnemers 17 en 18) boven de bovenste rij gewaterpaste stenen waren duidelijk omhoog gekomen (circa 1,5 cm). Boven raai 185 was tot boven aan toe ca 5 cm van het inwasmateriaal uit de spleten gespoeld. Het talud toonde een lichte kattenrug met een geringe verlaging van het bovenste deel van het talud rond of net boven de waterlijn, een geringe verhoging in het gebied met de grootste golfaanval (rond raai 185,5) en geen veranderingen in het lage deel van het talud vanaf de onderste gewaterpaste punten ($z = 3,05 - 3,08$ m). Na proef 16 waren de spleten van het lage deel van het talud tot raai 181 geheel gevuld, zie Figuur C.5. Tussen de raaien 181 en 185 waren de spleten tussen de blokken nu gemiddeld tot circa 6 à 8 cm uitgespoeld en op sommige plaatsen volledig uitgespoeld (15 cm).

De taludbekleding met de Hydroblokken is tijdens de uitgevoerde proevenserie met deze zeer lange golven niet bezweken. Wel trad er gedurende proef 16 een zodanige vervorming van het talud op dat geconcludeerd is dat de golfhoopte bij begin van schade zeer dicht genaderd is, zie Figuur C.6. Op basis hiervan is de bezwijkgolfhoopte bij $\xi_{op} = 4,28$ geschat op $H_s = 1,1$ m.

3.2 Tweede serie: lange golven

De gegevens van de waterpassing van de gemerkte stenen van de tweede serie proeven zijn vermeld in Tabel 3.2. Deze tabel laat zien dat er tot en met proef 25 niet veel verdere vervorming van de steenzetting is opgetreden. De verplaatsingen liggen steeds in de buurt van een paar millimeter.

Na proef 23 werd de grootste uitspoeling van de spleten waargenomen tussen raaien 181 ($z = 2,7$ m, drukopnemer 2) en 184 ($z = 3,5$ m, drukopnemer 11) aan de halzijde van het talud (links ten opzichte van de richting van de golfvoortplanting). Aan de zijde van de meetcabine (rechts ten opzichte van de richting van de golfvoortplanting) waren de spleten vol en rond de kabelbundel van de drukopnemers lag veel inwasmateriaal op het talud verzameld. Dit zou een modeffect kunnen zijn. De gemiddelde uitspoeling in het meest aangevallen gebied bedroeg circa 6 tot 8 cm. Op de rest van het talud was de uitspoeling gering, dat wil zeggen in de orde van 3 tot 4 centimeter boven raai 185 ($z = 3,8$ m, drukopnemer 15) en nihil beneden raai 181 ($z = 2,7$ m, drukopnemer 2). Voor de aanvang van proef 24 is het overtollige inwasmateriaal bij de raai met drukdozen weggehaald om beschadiging van de kabels te voorkomen.

Na proef 24 werd hetzelfde beeld waargenomen als na proef 23. Voor het waterpassen zijn de raaien 2 en 3 naar boven verlengd met 4 extra punten met een onderlinge afstand langs

het talud van twee stenen (circa 50 cm). Dit is gedaan om eventueel een beter beeld te krijgen van de vorming van een kattenrug in het talud.

In Figuur C.7 is een foto weergegeven die tijdens proef 25 genomen is. Na proef 25 lagen de spleten tussen de blokken in het lage deel van het talud tot raai 181 ($z = 2,7$ m, drukopnemer 2) volledig vol met inwasmateriaal. Tussen de raaien 181 en 184 ($z = 3,5$ m, drukopnemer 11) zijn veel spleten volledig tot op het filter uitgespoeld; ook enkele spleten aan de zijde van de meetcabine. De meeste spleten aan die zijde zitten echter behoorlijk vol. Dit deel van het talud kraakte als er over werd gelopen. Dit zou kunnen duiden op een aanzienlijke normaalspanning in het vlak van het talud in combinatie met enige (minimale) ruimte onder de top laag. Van raai 184 ($z = 3,5$ m, drukopnemer 11) tot raai 186 ($z = 4,1$ m, drukopnemer 19) neemt de gemiddelde uitspoeling van de spleten af van circa 10 cm tot circa 5 cm. In het talud boven raai 186 is de gemiddelde uitspoeling min of meer constant en bedraagt 4 à 5 cm.

De steenzetting is tijdens proef 26 na 53 à 54 minuten golven bezweken. De schade ontstond na een extreem zware golfklap op het talud. De schade was meteen zichtbaar en hoorbaar aan het gerommel van de losgeslagen stenen over het talud. Vrij snel daarna werden vier schuimcilinders uit de losse blokken geslagen en kwamen op het wateroppervlak drijven. De proef is vervolgens na 56 minuten afgebroken. Uit de visuele inspectie bleek dat in het onderste deel van het talud tot aan raai 180,5 ($z = 2,6$ m, drukopnemer 1) de spleten tussen de blokken volledig met inwasmateriaal waren gevuld. Tussen gootraai 180,5 en 181 ($z = 2,7$ m, drukopnemer 2) liep de uitspoeling van de spleten op tot 15 cm (volledige uitspoeling tot op filter). Tussen raaien 181 en 187 ($z = 4,3$ m, drukopnemer 20) waren de spleten volledig uitgespoeld. Naar raai 188 ($z > 5$ m, boven drukopnemer 21) toe liep de uitspoeling van de spleten terug naar 4 à 5 cm. Daarboven bleef de uitspoeling min of meer constant in de orde van 4 à 5 cm. Dit geldt voor de halzijde van het talud tot aan raai 3 van het waterpassen. Aan de zijde van de meetcabine van deze raai waren de spleten goed gevuld, mogelijk door de invloed van de kabels van de drukdozen op de waterbeweging. Rond meetpunt 2 in meetraai 1 ($z = 3,7$ m) waren 7 stenen uit het talud geslagen (een gat van 6 stenen en een gat van 1 steen; zie Figuur C.8) en was het talud rond deze gaten aanzienlijk opgebouwd (zie Figuur C.9)

In het algemeen werd waargenomen dat er in de meetserie met lange golven relatief weinig zware golfklappen optraden, doordat de golven net iets te lang waren. Hierdoor kwam de volgende golfkam net te laat bij het talud om samen met het terugstromende water tot een grote, brekende golf te leiden. In de meeste gevallen werd het dal voor de volgende golfkam grotendeels door het terugstromende water van de vorige golf opgevuld, waardoor er geen golfbreking optrad of breking met een laag brekerfront. Hierdoor kwamen grote golfklappen maar sporadisch voor, vooral vlak na een hoge golf die een hoge golfploop veroorzaakte, waarbij het grote terugstromende volume in combinatie met een net in een de juiste fase aankomende volgende golf (vaak niet eens een hoge) tot een hoog opgestuwd brekerfront leidde.

Raai	Steen	Na proef 16	Na proef 23	Na proef 24	Na proef 25	Na proef 26	Grootste verplaatsing (mm)	Verplaatsing (mm)	
		14-09-2004	15-09-2004	15-09-2004	16-09-2004	17-09-2004	t/m proef 25	tijdens proef 26	
1	1	3,914	3,914	3,914	3,913	3,891	-1	-22	
	2	3,701	3,700	3,700	3,700	steen	-1	steen weg	
	3	3,486	3,485	3,485	3,486	3,581	1	95	
	4	3,274	3,273	3,273	3,274	3,337	1	63	
	5	3,079	3,079	3,079	3,079	3,113	0	34	
2	21			4,426	4,427	4,424	1	-3	
	22			4,293	4,292	4,286	-1	-6	
	23			4,157	4,157	4,150	0	-7	
	24			4,034	4,035	4,001	1	-34	
	6	3,903	3,903	3,902	3,901	3,909	-2	8	
	7	3,685	3,685	3,685	3,686	3,755	1	69	
	8	3,478	3,477	3,477	3,480	3,566	2	86	
	9	3,266	3,265	3,266	3,268	3,318	2	50	
	10	3,059	3,060	3,061	3,061	3,083	2	22	
	3	31			4,430	4,430	4,429	0	-1
32				4,300	4,299	4,299	-1	0	
33				4,162	4,161	4,161	-1	0	
34				4,036	4,037	4,042	1	5	
11		3,891	3,891	3,891	3,890	3,903	-1	13	
12		3,681	3,681	3,680	3,680	3,707	-1	27	
13		3,464	3,464	3,464	3,464	3,491	0	27	
14		3,250	3,254	3,254	3,254	3,269	4	15	
15		3,053	3,053	3,053	3,053	3,065	0	12	
4		16	3,880	3,880	3,880	3,880	3,882	0	2
		17	3,673	3,673	3,673	3,673	3,674	0	1
		18	3,454	3,454	3,454	3,453	3,456	-1	3
		19	3,251	3,251	3,251	3,251	3,253	0	2
		20	3,048	3,048	3,048	3,048	3,051	0	3

Tabel 3.2 Waterpassingen van gemerkte stenen in het talud tijdens proef met lange golven (m ten opzichte van gootbodern).

3.3 Analyse van stabiliteit

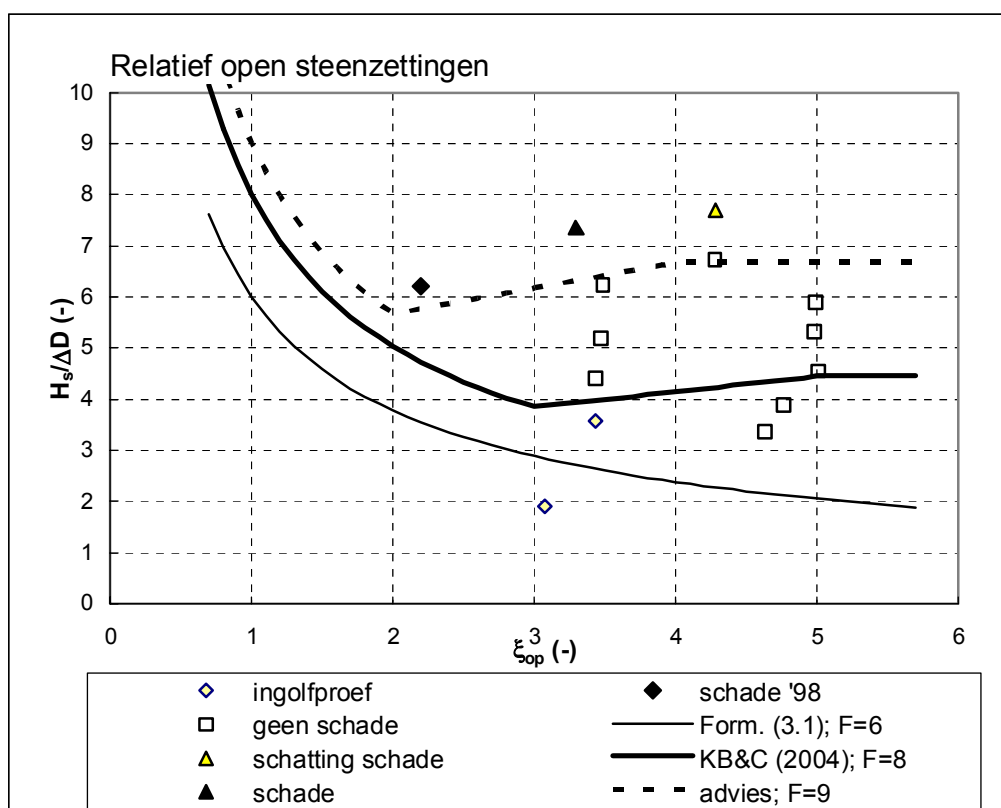
De proeven hebben geleid tot een (schatting van de) golfhoogte bij begin van schade bij twee verschillende waarden van de bekerparameter:

- Bij $\xi_{op} = 4,28$ is op basis van de resultaten bij een golfhoogte van $H_s = 0,96$ m geschat dat schade te verwachten is bij ongeveer $H_s = 1,1$ m.
- Bij $\xi_{op} = 3,29$ is vastgesteld dat schade optreedt bij $H_s = 1,05$ m.

De proefresultaten zijn weergegeven in Figuur 3.1. Ook het proefresultaat op Hydroblokken met dikte van 20 cm en een soortelijke massa van 2291 kg/m³ uit 1998 (Leeuwestein, 1998) op een talud van 1:3,5 onder een berm is weergegeven. Toen is schade ontstaan bij een golfhoogte van H_s = 1,6 m en ξ_{op} = 2,2 (zie ook de aanvullende notitie AS.98.67 van november 1998: weliswaar nog geen blok eruit, maar wel aanzienlijke vervorming). In Figuur 3.1 is ook de stabiliteitslijn volgens ANAMOS weergegeven (met de dunne doorgetrokken lijn: “Form. (3.1);F=6”), die voor dit geval gelijk is aan:

$$\frac{H_s}{\Delta D} = F \xi_{op}^{-2/3} \tag{3.1}$$

waarin F (-) de stabiliteitsfactor is en in dit geval bedraagt F = 6.



Figuur 3.1 Proefresultaten en stabiliteitslijnen.

Het blijkt dat ook het schadepunt bij ξ_{op} = 2,2 ver boven deze lijn ligt, op grond waarvan geconcludeerd kan worden dat er een grote klemming tussen deze Hydroblokken ontstaat. We zien verder dat de stabiliteit toeneemt bij toenemende waarde van ξ_{op}, zoals dat ook vastgesteld was door Klein Breteler en Coeveld (2004) op basis van de analyse van de golfbelasting op een talud in een kleinschalig modelonderzoek. Zij hadden de volgende stabiliteitsrelatie voorgesteld:

- Als ξ_{op} < 3: ANAMOS op de gebruikelijke manier toepassen.

- Als $3 < \xi_{op} < 5$: met ANAMOS de maximaal toelaatbare waarde van $H_s/\Delta D$ berekenen bij $\xi_{op} = 3$ en vervolgens de maximaal toelaatbare $H_s/\Delta D$ berekenen met $H_s/\Delta D = [H_s/\Delta D]_{bij \xi=3} + 0,3 \cdot (\xi_{op} - 3)$.
- Als $\xi_{op} > 5$: de stabiliteit is vooralsnog onbekend; een veilige schatting wordt gevonden met $H_s/\Delta D = [H_s/\Delta D]_{bij \xi=3} - 0,2 \cdot (\xi_{op} - 3) + 1$, maar een meer realistische schatting is wellicht een constante stabiliteit: $H_s/\Delta D = [H_s/\Delta D]_{bij \xi=3} + 0,6$.

Gezien het feit dat het moeilijk is om definitieve conclusies te trekken als slechts de resultaten van kleinschalig modelonderzoek beschikbaar zijn, waarin alleen de druk op het talud is gemeten, waren deze relaties nog relatief conservatief gekozen. Vóór het onderzoek was deze relatie gebruikt om een schatting te krijgen van de verwachte golfhoogte bij begin van schade. Gezien het feit dat in het verleden al was vastgesteld dat Hydroblokken een relatief grote klemming hebben, was de waarde van F al wat hoger gesteld dan in ANAMOS: $F = 8$. De verwachte stabiliteitslijn is ook in Figuur 3.1 getekend (met de dikke doorgetrokken lijn: “KB&C(2004);F=8”).

Het blijkt dat de huidige meetpunten beduidend boven deze verwachte stabiliteitslijn liggen, waaruit blijkt dat de aanbeveling van Klein Breteler en Coeveld (2004) erg conservatief is en bijgesteld kan worden.

Voordat de stabiliteitslijn al te zeer omhoog geschoven wordt, is een overweging omtrent de invloed van de soortelijke massa van de blokken op zijn plaats. Deze bekleding ontleent een groot deel van zijn stabiliteit uit de klemming tussen de blokken. De invloed van de klemming kan in een eenvoudige stabiliteitsrelatie op twee (extreme) manieren meegeteld worden: multiplicatief of additioneel. Tot nu toe is het gebruikelijk om de eerste methode te gebruiken:

- Multiplicatief: De stabiliteit is evenredig met het product van het eigen gewicht (ΔD) en een klemfactor (Γ_{klem}). Er ontstaat schade als het stijghoogteverschil $\phi_w > \Delta D \cdot \Gamma_{klem}$.
- Additioneel: De stabiliteit kent twee componenten, de ene is het eigen gewicht en de andere is de klemming. Er ontstaat schade als het stijghoogteverschil $\phi_w > \Delta D + \phi_{klem}$

Aannemende dat de waarden van Γ_{klem} en ϕ_{klem} vooral bepaald worden door de geometrie van de constructie (blokdikte, mate en effectiviteit van inwassing, afstand tot overgangsconstructie, enzovoort), zal in het eerste geval het stijghoogteverschil bij begin van schade evenredig zijn met de grootte van Δ , terwijl in het tweede geval die invloed veel kleiner is, omdat hier $\phi_{klem} \gg \Delta D$. Aan de andere kant is enige invloed van Δ op de waarde van Γ_{klem} en ϕ_{klem} wel denkbaar. Al met al is het verstandig rekening te houden met de mogelijkheid dat een 35% hogere Δ niet ook een 35% hogere bezwijk golfhoogte oplevert.

Op grond van deze overwegingen zou de waarde van F bij een lage soortelijke massa van de toplaag iets hoger kunnen liggen, dan bij een hoge soortelijke massa. Immers: $F = H_s/\Delta D \cdot \xi_{op}^{2/3}$, Δ is hier 35% lager dan normaal, terwijl met bovenstaande overwegingen aannemelijk gemaakt kan worden dat H_s veel minder dan 35% kleiner is. Daarom is er hier een nieuwe stabiliteitslijn afgeleid op basis van de verwachting dat bij kleine waarden van ξ_{op} de stabiliteitsfactor $F = 9$. Dit leidt tot een conservatief resultaat als de klemming multiplicatief is en/of ϕ_{klem} toch sterk afhankelijk is van Δ .

Op basis van de proefresultaten is de volgende aanbeveling opgesteld ten aanzien van de stabiliteit van open steenzettingen bij relatief lange golven:

- Als $\xi_{op} < 2$: ANAMOS op de gebruikelijke manier toepassen.
- Als $2 < \xi_{op} < 5$: met ANAMOS de maximaal toelaatbare waarde van $H_s/\Delta D$ berekenen bij $\xi_{op} = 2$ en vervolgens de maximaal toelaatbare $H_s/\Delta D$ berekenen met $H_s/\Delta D = [H_s/\Delta D]_{bij \xi=2} + 0,5 \cdot (\xi_{op} - 2)$.
- Als $\xi_{op} > 5$: de stabiliteit is vooralsnog onbekend; een realistische schatting is wellicht een constante stabiliteit: $H_s/\Delta D = [H_s/\Delta D]_{bij \xi=2} + 1$.

Dit advies, bij een stabiliteitsfactor van $F = 9$, is ingetekend in Figuur 3.1 (met de dikke gestippelde lijn: “advies;F=9”). In de praktijk zal een veel conservatievere stabiliteitsfactor gebruikt worden, bijvoorbeeld $F = 6$, waardoor de stabiliteitslijn wat lager komt te liggen.

Deze aanbeveling is slechts geldig voor de relatief open steenzettingen. Dit zijn steenzettingen met een toplaag met een porositeit van meer dan 5 %, bijvoorbeeld basalt, Basalton, Hydroblokken of blokken op hun kant met afstandhouders. Door Klein Breteler en Coeveld (2004) is niet alleen naar de golfklappen gekeken, die maatgevend zijn voor relatief open steenzettingen, maar ook naar het stijghoogtefront net vóór de golfklap. Daardoor was het ook mogelijk conclusies te trekken ten aanzien van relatief dichte bekledingen. Dit zijn bekledingen met een toplaag met een porositeit van minder dan 5 %. Het is gebleken dat de belasting tijdens het stijghoogtefront wel toeneemt met toenemende brekerparameter, ξ_{op} . Dat betekent dat de stabiliteit dan afneemt, conform ANAMOS, als $\xi_{op} > 2$.

In het verleden zijn nooit proeven uitgevoerd met open steenzettingen en relatief lange golven met $\xi_{op} > 2,2$. Daardoor kan bovenstaande aanbeveling niet getoetst worden met oude proefresultaten.

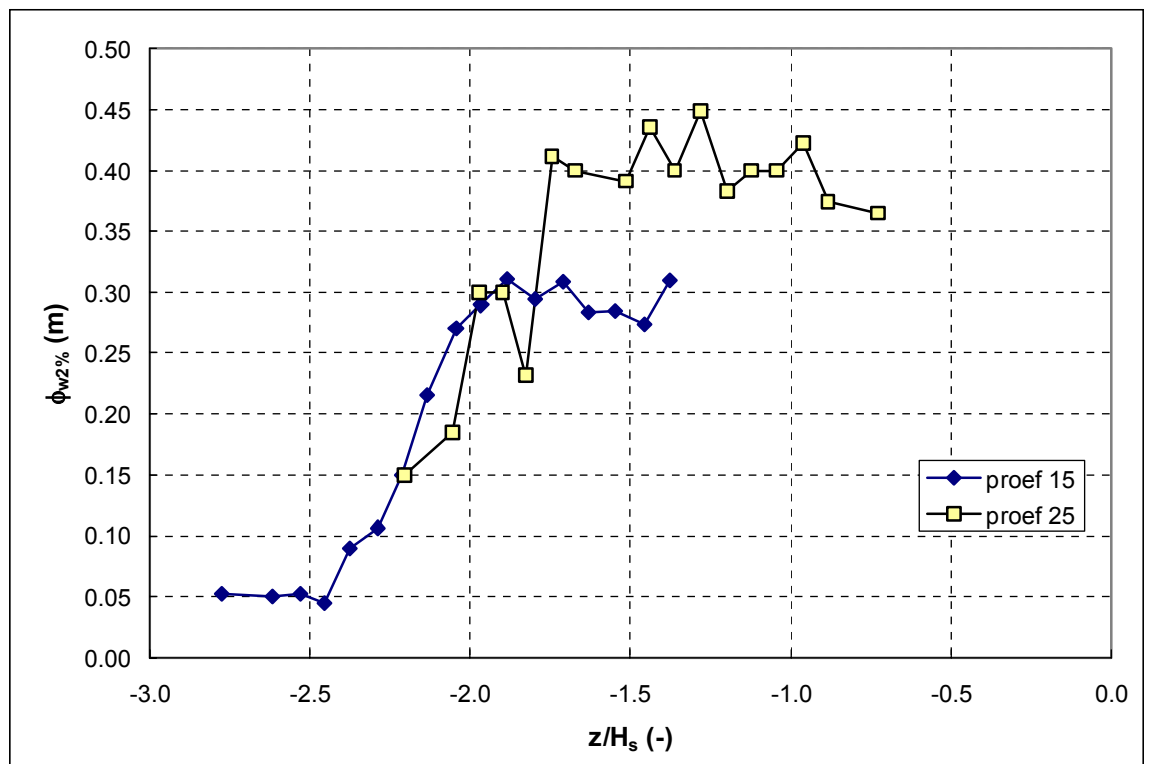
In de bureaustudie van Klein Breteler en Coeveld (2004) zijn vele berekeningen met Zsteen gemaakt op basis van kleinschalig modelonderzoek om een trend te ontdekken bij relatief lange golven. Die resultaten laten zien dat de laagste stabiliteit optreedt bij een brekerparameter van $\xi_{op} \approx 2,0$ à $2,5$. Als de brekerparameter groter is, neemt de stabiliteit meestal sterk toe. Er kan derhalve gesteld worden dat de huidige aanbeveling aansluit op de resultaten van die Zsteen berekeningen.

4 Analyse van stijghoogteverschillen

De primaire belasting op een steenzetting, die uiteindelijk kan leiden tot schade, is het stijghoogteverschil over de toplaag. Er zijn drukopnemerparen in de blokken geplaatst, waarmee de stijghoogte op de toplaag en in het filter gemeten is. Het verschil tussen beide metingen levert het stijghoogteverschil op, die evenredig is met de netto (opwaartse) kracht die door de golven op de blokken wordt uitgeoefend. De resultaten van deze metingen zijn in dit hoofdstuk geanalyseerd. Met de fictieve drukopnemers in het filter (zie Paragraaf 2.2) meegerekend zijn er in totaal 18 drukopnemerparen.

4.1 Stijghoogteverschil per drukopnemerpaar

Allereerst is het stijghoogteverschil per drukopnemerpaar beschouwd. Dit leverde overschrijdingskrommes op van het stijghoogteverschil voor de 17 locaties op het talud waar de drukopnemers goed gewerkt hebben. In Figuur C.13 tot en met Figuur C.17 zijn als voorbeeld de overschrijdingskrommes van de stijghoogteverschillen in proef 15 per drukopnemerpaar weergegeven. Voor twee proeven is in Figuur 4.1 de grootte van het stijghoogteverschil met een overschrijdingsfrequentie van 2% als functie van de locatie op het talud getekend (waarin z de verticale afstand is van de drukopnemer tot de stilwaterlijn).



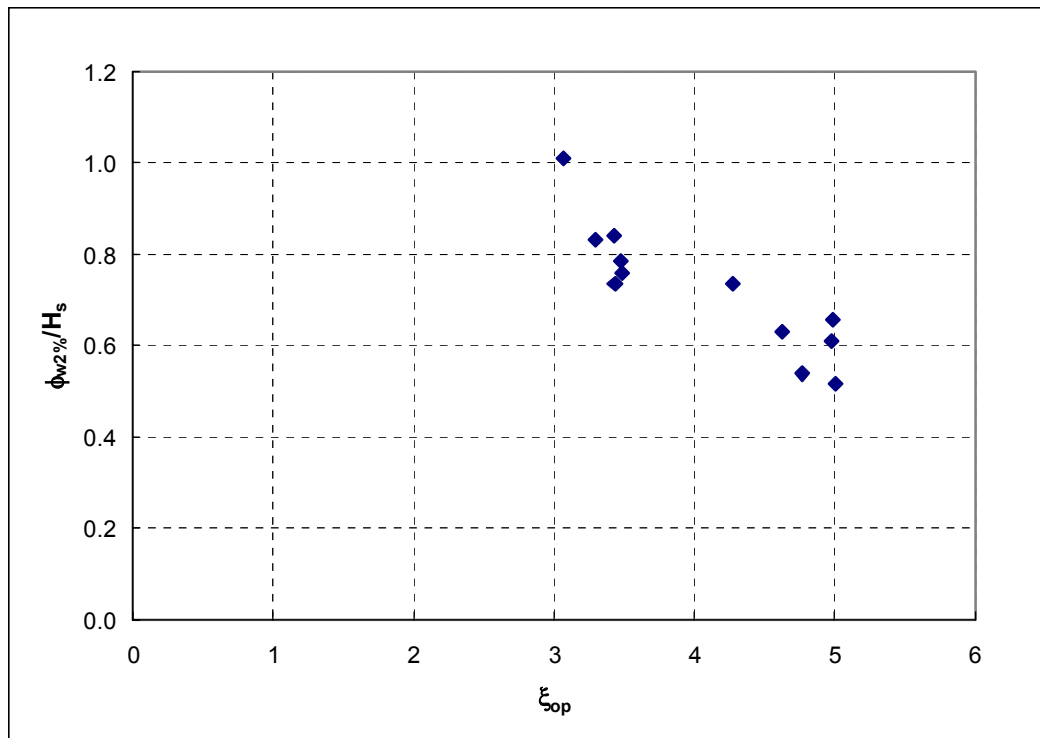
Figuur 4.1 Stijghoogteverschil over de toplaag met 2% overschrijdingsfrequentie als functie van de dimensieloze locatie ten opzichte van de stilwaterlijn

Het valt op dat er een brede zone op het talud is waar het 2%-stijghoogteverschil bijna gelijk is aan de grootste waarde van het 2%-stijghoogteverschil. De grote stijghoogteverschillen treden voor proef 15 (met $\xi_{op} = 4,99$) op in de zone tussen $-1,8 < z/H_s < -0,7$, terwijl dat voor proef 25 (met $\xi_{op} = 3,48$) wat dieper ligt: $-2,1 < z/H_s < -0,8$ à $1,0$. Helaas zijn er in de buurt van de stilwaterlijn geen stijghoogteverschillen gemeten. In feite zat er een aantal drukopnemers tijdens proef 15 te diep onder water (de waterstand was te hoog ingesteld) omdat er in de zone tussen $-2,8 < z/H_s < -2,3$ een aantal drukopnemerparen waren die slechts geringe stijghoogteverschillen hebben gemeten, terwijl die beter in de zone tussen $-1,4 < z/H_s < -0,5$ hadden kunnen zitten. Uit Figuur 4.1 valt op te maken dat het verloop van het stijghoogteverschil over een aantal drukopnemers horizontaal is. Het maximale stijghoogteverschil is dus wel gemeten, ondanks dat een aantal drukopnemers te diep onder water zat.

Op basis van het kleinschalig modelonderzoek is verondersteld dat er golfklappen zouden optreden op een diepte van $2H_s$ à $2,5H_s$ onder de stilwaterlijn, maar kennelijk zijn die in de Deltagoot niet opgetreden, of waren ze zo zwak dat ze geen belangrijke stijghoogteverschillen hebben opgeleverd.

4.2 Stijghoogteverschil per golf

In Figuur 4.2 is het 2%-stijghoogteverschil gegeven, die bepaald is door steeds per golf het hoogste stijghoogteverschil in alle drukopnemerparen te bepalen en vervolgens een overschrijdingkromme te tekenen. Die overschrijdingkrommen zijn gegeven in Figuur C.18 tot en met Figuur C.23 en de resultaten zijn samengevat in Tabel 4.1.



Figuur 4.2 Dimensieloze waarde van 2%-stijghoogteverschil als functie van ξ_{op} voor de Hydroblokken in de Deltagoot

Uit de figuur blijkt dat het stijghoogteverschil sterk afneemt met het toenemen van de brekerparameter ξ_{op} . Dit is in lijn met de vaststelling in het vorige hoofdstuk dat de stabiliteit toeneemt bij toenemende ξ_{op} . Het is een tegenovergestelde trend als die volgens ANAMOS.

In Tabel 4.1 is in de laatste kolom het 2%-stijghoogteverschil gedeeld door het eigen gewicht, namelijk $\Delta D = 0,14$ m. Uit de getallen blijkt dat het stijghoogteverschil zeer groot was ten opzichte van ΔD . Er is pas bezwijken opgetreden bij $\phi_{w2\%}/\Delta D \approx 5$ à 6, terwijl bij de rechthoekige blokken die in 1997 en 1998 in de Deltagoot beproefd zijn (Lubbers en Klein Breteler, 2000) doorgaans waarden bij bezwijken van $\phi_{w2\%}/\Delta D \approx 1,5$ à 4 gemeten zijn.

Deze relatief grote stijghoogteverschillen kunnen veroorzaakt zijn door een relatief grote klemming, of een relatief kort durende belasting. Ook tijdens het onderzoek met Hydroblokken van 1998 was al geconstateerd dat de stabiliteit van dit systeem relatief hoog is. Wellicht leidt de kolomsgewijs gezette blokken in schaakbordpatroon tot relatief hoge klemkrachten.

Daarnaast is bij deze relatief lange golven, die een relatief grote voortplantingssnelheid hebben, het steile stijghoogtefront slechts zeer kort op een bepaalde plaats aanwezig. Dat leidt ertoe dat het grote stijghoogteverschil slechts zeer kort aanhoudt. In Figuur C.24 en Figuur C.25 is voor proef 15 en proef 25 voor een tweetal golven het verloop van het stijghoogteverschil weergegeven in het drukopnemerpaar waar het maximale stijghoogteverschil in die golf optreedt. Dit maximum heeft een overschrijdingspercentage van ongeveer 2 %. Uit Figuur C.24 en Figuur C.25 kan rond het maximum worden afgelezen dat de periode dat het stijghoogteverschil groter is dan 75 % van het maximum ongeveer 0,05 s à 0,1 s bedraagt. Het steile stijghoogtefront houdt dus slechts zeer kort aan, terwijl het stijghoogtefront tijdens de metingen op basalt en Basalton met $1,7 < \xi_{op} < 2,2$ (Rudolph en Klein Breteler, 2004) gedurende ongeveer 0,15 s à 0,2 s aanhield.

Proef	H_s (m)	ξ_{op} (-)	$\phi_{w13\%}$ (m)	$\phi_{w5\%}$ (m)	$\phi_{w2\%}$ (m)	$\phi_{w0,5\%}$ (m)	$\phi_{w,max}$ (m)	$\phi_{w2\%}/(\Delta D)$ (-)
10	0.27	3.07	0.20	0.23	0.27	0.35	0.47	1.91
11	0.48	4.63	0.23	0.27	0.30	0.38	0.44	2.12
12	0.56	4.76	0.23	0.27	0.30	0.35	0.59	2.09
13	0.65	5.01	0.22	0.28	0.34	0.48	0.77	2.35
14	0.76	4.98	0.21	0.34	0.46	0.66	1.04	3.25
15	0.84	4.99	0.24	0.42	0.55	0.88	1.30	3.86
16	0.96	4.28	0.32	0.53	0.71	1.07	1.27	4.94
22	0.51	3.43	0.27	0.34	0.43	0.69	1.16	3.00
23	0.63	3.43	0.29	0.37	0.46	0.61	0.77	3.24
24	0.74	3.47	0.31	0.45	0.58	0.77	1.10	4.07
25	0.89	3.48	0.38	0.53	0.67	0.89	1.13	4.72
26	1.05	3.29	0.51	0.71	0.87	1.04	1.46	6.11

Tabel 4.1 Stijghoogteverschil met bepaalde overschrijdingsfrequentie (onafhankelijk van de locatie waar het is opgetreden)

5 Analyse van golfbelasting op talud

De proeven in de Deltagoot leveren informatie op over drie aspecten van de stabiliteit van steenzettingen bij een belasting met relatief lange golven, namelijk:

1. de maximaal toelaatbare golfhoogte bij twee verschillende golfsteilheden,
2. het stijghoogteverschil over de top laag tijdens de golfbelasting, en
3. het stijghoogteverloop op de top laag als functie van de tijd.

In dit hoofdstuk komt het derde aspect aan de orde.

Ook in het kleinschalig modelonderzoek in de Scheldegoot (Kuiper en Van Vossen, 2003; Klein Breteler en Coeveld, 2004) is het stijghoogteverloop op de top laag geanalyseerd. De huidige analyse vult dat onderzoek aan. Het richt zich op dezelfde eigenschappen van de golfklappen en golffronten als die geselecteerd zijn door Klein Breteler en Coeveld (2004). De proeven van welke de resultaten meegenomen zijn in de analyse, zijn weergegeven in Paragraaf 5.1.

De resultaten zijn geanalyseerd met behulp van de golfbelasting-analyse-software van Coeveld en Klein Breteler (2004). Deze software is met het verschijnen van Klein Breteler en Coeveld (2004) op enige punten aangepast. Het komt er in het kort op neer dat met de nieuwe software ook de kleinere golfklappen gedetecteerd worden. Om deze reden zijn de meetgegevens van het kleinschalig modelonderzoek opnieuw bewerkt.

De resultaten zijn gebruikt ter verificatie van de conclusies van Klein Breteler en Coeveld (2004) en die van Hoofdstuk 3 en 4.

5.1 Beschrijving van geanalyseerde proeven

De resultaten van het kleinschalig modelonderzoek in de Scheldegoot van WL | Delft Hydraulics in 2003 (Kuiper en Van Vossen, 2003) en het grootschalig onderzoek in de Deltagoot van WL | Delft Hydraulics vormen de basis voor onderhavig onderzoek. Er zijn in de Scheldegoot en de Deltagoot 33 respectievelijk 12 proeven uitgevoerd met relatief lange golven, waarbij de druk op het talud is gemeten. De gemeten druk op het talud als functie van de tijd vormt het uitgangspunt voor de analyse.

De proeven in de Scheldegoot zijn uitgevoerd met twee taludhellingen, namelijk 1:3 en 1:4. De gemeten golfcondities voor de Scheldegoot zijn gegeven in Tabel 5.1 tot en met Tabel 5.3. De druk is gemeten door middel van 42 drukopnemers die in het vlak van het talud waren gemonteerd.

De proeven in de Deltagoot zijn uitgevoerd met één taludhelling, namelijk 1:3,5. De druk is gemeten in 21 drukopnemers op de bekleding. De 13 drukopnemers onder de bekleding zijn in dit hoofdstuk niet beschouwd. De gemeten golfcondities voor de Deltagoot zijn gegeven in Tabel 5.4, waarbij opgemerkt dient te worden dat de resultaten van proeven 12A en 12B (zie Tabel 2.2) zijn samengevoegd tot één proef 12.

De analyse van de golfklappen en golffronten is uitgevoerd met de gemodificeerde software van Coeveld en Klein Breteler (2004) op de volledige bestanden. Dat betekent een bemonsteringsfrequentie van 100 Hz en 200 Hz voor de Scheldegoot- respectievelijk Deltagootproeven.

In de tabellen zijn de volgende variabelen gebruikt:

- de significante golfhoogte H_s aan de teen van het talud, op basis van de energie (m),
- de golfperiode T_p bij de piek van het golfspectrum (s),
- de spectrale maat voor de golfperiode $T_{m-1,0}$ (s),
- de golfsteilheid $s_{op} = H_s/L_{op}$ op diep water (-), waarin H_s (m) de significante golfhoogte aan de teen van het talud is, $L_{op} = gT_p^2/(2\pi)$ (m) de golflengte op basis van de piekperiode, teruggerekend naar diepwater, en g (m/s^2) versnelling van de zwaartekracht, en
- de brekerparameter $\xi_{op} = \tan\alpha/\sqrt{s_{op}}$ (-), waarin $\tan\alpha$ (-) de helling van het talud is.
- de stilwaterdiepte (h) is voor de Deltagootproeven toegevoegd.

Proef	H_s (m)	T_p (s)	$T_{m-1,0}$ (s)	s_{op} (-)	ξ_{op} (-)
T301	0.216	2.82	2.579	0.017	2.52
T302	0.220	3.08	2.832	0.015	2.74
T303	0.221	3.42	3.029	0.012	3.03
T304	0.220	3.54	3.202	0.011	3.15
T305	0.197	3.57	3.240	0.010	3.35
T306	0.171	3.57	3.224	0.009	3.60
T307	0.173	3.81	3.395	0.008	3.81
T308	0.173	4.00	3.569	0.007	4.00
T309	0.147	4.00	3.500	0.006	4.34
T310	0.148	4.05	3.615	0.006	4.39
T311	0.120	4.00	3.525	0.005	4.81
T312	0.121	4.30	3.767	0.004	5.15
T313	0.095	4.08	3.741	0.004	5.51
T314	0.096	4.60	3.921	0.003	6.19
T315	0.098	5.29	4.139	0.002	7.04

Tabel 5.1 Scheldegoot: proevenprogramma met Pierson-Moskowitz golfspectra op talud 1:3

Proef	H_s (m)	T_p (s)	$T_{m-1,0}$ (s)	S_{op} (-)	ξ_{op} (-)
T401	0.197	3.43	3.105	0.011	2.42
T402	0.197	3.78	3.373	0.009	2.66
T403	0.172	3.81	3.395	0.008	2.87
T404	0.146	3.81	3.374	0.006	3.11
T405	0.146	4.04	3.587	0.006	3.30
T406	0.120	4.04	3.549	0.005	3.64
T407	0.120	4.10	3.720	0.005	3.70
T408	0.122	4.52	3.908	0.004	4.04
T409	0.094	4.10	3.773	0.004	4.17
T410	0.095	4.51	3.932	0.003	4.57
T411	0.095	4.53	4.096	0.003	4.59
T412	0.097	5.78	4.338	0.002	5.80
T413	0.081	5.57	4.415	0.002	6.12
T414	0.076	5.79	4.533	0.001	6.56
T415	0.074	6.34	4.750	0.001	7.28

Tabel 5.2 Scheldegoot: proevenprogramma met Pierson-Moskowitz golfspectra op talud 1:4

Proef	H_s (m)	T_p (s)	$T_{m-1,0}$ (s)	S_{op} (-)	ξ_{op} (-)
T501	0.142	3.03	1.856	0.010	2.51
T502	0.147	4.19	2.333	0.005	3.42
T503	0.157	3.05	2.790	0.011	2.40

Tabel 5.3 Scheldegoot: proevenprogramma met dubbeltoppige golfspectra op talud 1:4

Proef	h (m)	H_s (m)	T_p (s)	$T_{m-1,0}$ (s)	S_{op} (-)	ξ_{op} (-)
10	4,20	0,27	4,47	4,14	8,65	3,07
11	4,20	0,48	8,99	7,90	3,80	4,63
12	4,51	0,56	9,95	8,87	3,62	4,75
13	4,80	0,65	11,31	9,34	3,25	5,01
14	5,02	0,76	12,16	9,97	3,29	4,98
15	5,17	0,84	12,82	10,44	3,27	4,99
16	5,18	0,96	11,74	9,50	4,46	4,28
22	4,40	0,51	6,86	6,17	6,94	3,43
23	4,41	0,63	7,64	6,89	6,91	3,44
24	4,75	0,74	8,37	7,38	6,77	3,47
25	4,80	0,89	9,21	7,90	6,72	3,49
26	4,90	1,05	9,46	8,19	7,51	3,30

Tabel 5.4 Deltagootproeven: proevenprogramma met Pierson-Moskowitz golfspectrum op talud 1:3,5

Aangaande de Deltagootproeven is het volgende op te merken:

- Proef 10 was bedoeld als ingolfproef en daardoor is de waterstand niet ideaal ten aanzien van het meten van de golfdruk. Omdat de drukopnemers niet optimaal lagen ten opzichte van de waterlijn, konden mogelijkwerwijs een aantal golfklappen en golffronten niet geïdentificeerd worden.
- Proef 12 is vanwege het late tijdstip op de dag halverwege afgebroken. De eerste helft van de proef had een significante golfhoogte van $H_s = 0,55$ m en piekperiode $T_p = 10,11$ s ($T_{m-1,0} = 8,84$ s) en de tweede helft een significante golfhoogte van $H_s = 0,56$ m en piekperiode $T_p = 9,78$ s ($T_{m-1,0} = 8,90$ s). Bij de analyse van de golfbelasting zijn deze twee helften samengevoegd.

5.2 Relevante parameters

De stabiliteit van steenzettingen wordt enerzijds bepaald door de grootte van de belasting, en anderzijds door de sterkte. In dit hoofdstuk is de aandacht geconcentreerd op de grootte van de belasting op de steenzetting. Het betreft een analyse van de gemeten drukken op het talud. In een golf kan er op twee momenten een groot stijghoogteverschil over de top laag optreden, namelijk op:

- het moment waarop er een steil golffront aanwezig is, en op
- het moment van de golfklap.

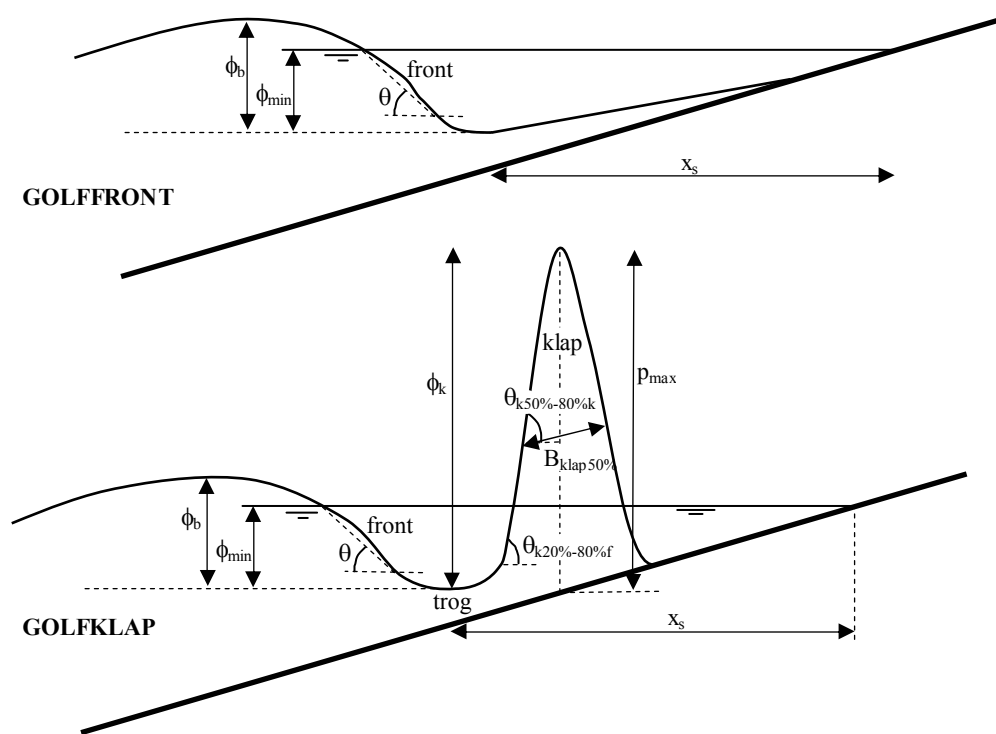
Voor relatief open bekledingen zal vooral de golfklap van belang zijn, maar voor relatief dichte steenzettingen is ook het steile golffront van belang.

Voor de stabiliteit is niet alleen de grootte van de belasting op een bepaald moment belangrijk, maar ook de duur van de belasting. Daarom zijn ook de momenten rond het ontstaan van een steil golffront en het optreden van de golfklap beschouwd.

Voor het karakteriseren van de eigenschappen van de golfklap zijn de volgende parameters gebruikt (zie ook Figuur 5.1):

- de maximale stijghoogte tijdens een golfklap, ten opzichte van de stilwaterlijn (ϕ_{\max}),
- de druk ten opzichte van het talud tijdens een golfklap, op het moment dat ϕ_{\max} optreedt (p_{\max}),
- de maximale stijghoogte op het talud tijdens de golfklap ten opzichte van de minimale stijghoogte in de trog tussen de golfklap en het golffront, op het moment dat ϕ_{\max} optreedt (ϕ_k),
- de breedte van de golfklap ter plaatse van de helft van p_{\max} ($B_{\text{klap}50\%}$),
- de stijgtijd, namelijk de tijdsduur vanaf het begin van de golfklap tot het moment waarop ϕ_{\max} optreedt (t_{stijg}),
- de totale duur van de golfklap (t_k), zoals gedefinieerd in Bijlage A in Coeveld en Klein Breteler (2004),
- de klapgradiënt tussen de locaties waar de stijghoogte (ten opzichte van het minimum in de trog) in de *klap* gelijk is aan 20 % en 80 % van de fronthoogte ($\theta_{k20-80\%f}$),
- de klapgradiënt tussen de locaties waar de stijghoogte (ten opzichte van het talud) in de *klap* gelijk is aan 50 % en 80 % van de klaphoogte ($\theta_{k50-80\%k}$),

- de gediptheid (ϕ_{dip}), gedefinieerd als het verschil tussen het afgevlakte stijghoogteverloop en het werkelijke stijghoogteverloop op een bepaald moment (vergelijkbaar met het stijghoogteverschil over de toplaag bij een bepaalde lek lengte, zie Bijlage A in Coeveld en Klein Breteler (2004)), en
- de geïntegreerde gediptheid ($\phi_{(dip)}$), gedefinieerd als het oppervlak onder het verloop van de gediptheid als functie van de tijd boven een bepaalde drempelwaarde (maat voor de blokbeweging, zie Bijlage A in Coeveld en Klein Breteler (2004)).



Figuur 5.1 Definitieschets van parameters van golffront (boven) en golflap (onder).

De gediptheid is een bijzondere eigenschap, die gebaseerd is op het feit dat het stijghoogteverschil over de toplaag vooral een grote waarde heeft, als de stijghoogte op de toplaag een scherpe piek omlaag heeft (een lokaal minimum met aan beide zijden van dit minimum een grote gradiënt ($\partial\phi/\partial x$)). Naarmate deze piek lager en smaller is, is de gediptheid groter. Dit is verder toegelicht in Bijlage A in Coeveld en Klein Breteler (2004). Het stijghoogteverschil over de toplaag is ongeveer evenredig met de gediptheid.

Voor het karakteriseren van het golffront zijn de volgende parameters gebruikt (zie ook Figuur 5.1):

- de hoogte van het golffront (ϕ_b),
- de minimale stijghoogte in de trog aan de voet van het front (ϕ_{min}),
- de horizontale afstand tussen waterlijn en locatie waar ϕ_{min} optreedt (x_s),
- de helling van het golffront (gemiddelde tussen $0,9\phi_{min}$ en SWL) (θ_f), zoals gedefinieerd in Bijlage A,

- de gediptheid (ϕ_{dip}), gedefinieerd als het verschil tussen het afgevlakte stijghoogteverloop en het werkelijke stijghoogteverloop op een bepaald moment (vergelijkbaar met het stijghoogteverschil over de toplaag bij een bepaalde leklengte, zie Bijlage A in Coeveld en Klein Breteler (2004)), en
- de geïntegreerde gediptheid (ϕ_{fdip}), gedefinieerd als het oppervlak onder het verloop van de gediptheid als functie van de tijd boven een bepaalde drempelwaarde (maat voor de blokbeweging, zie Bijlage A in Coeveld en Klein Breteler (2004)).

Ook is gebruik gemaakt van combinaties van parameters om een indruk te krijgen van de belaste breedte: $F_{\text{dip}} / (\phi_{\text{dip}} - 0,4H_s)$, en van de belastingsduur: $\phi_{\text{fdip}} / (\phi_{\text{dip}} - 0,4H_s)$. In beide gevallen is gebruik gemaakt van de ϕ_{dip} die optrad in dezelfde golf als waarin de F_{dip} respectievelijk de ϕ_{fdip} bepaald is.

Door Coeveld en Klein Breteler (2004) is specifiek aandacht besteed aan de kwantificering van bovengenoemde parameters. Er is toen geconcludeerd dat de belasting als gevolg van de golfklap duidelijk afneemt als de brekerparameter toeneemt (als $\xi_{\text{op}} > 3$). Hierdoor zullen steenzettingen die gevoelig zijn voor de golfklap, zoals steenzettingen met een relatief open toplaag of ingegoten steenzettingen, een hogere stabiliteit hebben bij een belasting met relatief lange golven. Er is toen ook vastgesteld dat dit is in overeenstemming met de conclusie op basis van de berekeningen met Zsteen.

Daarnaast bleek dat de belasting tijdens het golffront toeneemt bij toenemende waarde van de brekerparameter. Voor relatief open steenzettingen is dit geen probleem, want ook bij een $\xi_{\text{op}} = 5$ à 7 blijkt de golfklap voor die steenzettingen dominant te zijn (de gediptheid en geïntegreerde gediptheid zijn tijdens de golfklap groter dan tijdens het front). Voor relatief dichte steenzettingen bestaat de belangrijkste belasting echter uit het golffront. Voor die categorie constructies zal de stabiliteit dus waarschijnlijk afnemen bij toenemende waarde van de brekerparameter. Deze tendens komt overeen met ANAMOS, die met name ontwikkeld is voor de relatief dichte steenzettingen.

De huidige analyse richt zich op de verificatie van de conclusies van Coeveld en Klein Breteler (2004) ten aanzien van relatief open steenzettingen, opgebouwd uit bijvoorbeeld Hydroblokken.

5.3 Schalingsaspecten

Hoewel uit de literatuur bekend is (onder andere in Coeveld, 2003) dat golfklappen beïnvloed worden door schaafeffecten, leek dit bij de analyse van Coeveld en Klein Breteler (2004) wel mee te vallen. Nadere analyse van de recente metingen in de Deltagoot in vergelijking met de kleinschalige resultaten geven echter aan dat er wel degelijk grote schaafeffecten zijn. In bijvoorbeeld Figuur C.28 is de maximale druk in de golfklap met overschrijdingsfrequentie van 2 %, dimensieloos gemaakt door deling door de significante golfhoogte, uitgezet tegen de brekerparameter. Het valt op dat de punten van het grootschalig onderzoek veel lager liggen, dan de punten van het kleinschalig onderzoek. Volgens de schaalregel van Froude (welke veel toegepast wordt als het gaat om onderzoek naar de stabiliteit van stenen onder golfbelasting) hadden ze op dezelfde hoogte moeten liggen.

Dat het in de analyse van Coeveld en Klein Breteler (2004) op dit punt wel mee leek te vallen met de verschillen tussen groot- en kleinschalig onderzoek, kan gelegen hebben aan

het feit dat er twee aspecten tegelijk meespeelden: de invloed van de schaal en de invloed van een berm.

Tijdens de uitvoering van de grootschalige proeven was het al opgevallen (middels visuele inspectie) dat er minder golfklappen optraden dan in het kleinschalig onderzoek. Om te zien of er verschil zat in de inkomende golven zijn alle proeven gedetailleerd gecontroleerd. Daarbij is de overschrijdingskromme van de golfhoogte, het golfspectrum en het zogenaamde H-T-diagram van de klein- en grootschalige proeven vergeleken.

Als voorbeeld zijn de overschrijdingskrommes van de golfhoogte, de golfspectra en de H-T-diagrammen van proef 25 (grootschalig) en T308 (kleinschalig) weergegeven in Figuur C.10 tot en met Figuur C.12. Uit de vergelijking van de figuren is gebleken dat de golven in de grootschalige proeven perfect op schaal overeenkomen met de kleinschalige proeven.

Een belangrijk aspect voor de analyse van de golfbelasting op het talud, zoals beschreven in het huidige rapport, is derhalve het schaaleffect. Alle experimenten, die in Klein Breteler en Coeveld (2004) zijn beschreven, zijn uitgevoerd in de Scheldegoot. In het huidige rapport zijn daarnaast ook de Deltagootproeven behandeld. Deze hebben, zoals ook blijkt uit vergelijking van Tabel 5.4 met Tabel 5.1, Tabel 5.2 en Tabel 5.3, een beduidend andere schaal.

Het blijkt vrij lastig te zijn om op een goede manier om te gaan met de schaaleffecten bij de bestudering van golfklappen op een kleinere schaal. Ter illustratie is in Paragraaf 5.3.1 de aanpak van Howarth *et al.* (1996) beschreven. In Paragraaf 5.3.2 is aangegeven welke schaaleffecten in onderhavig onderzoek waarschijnlijk van belang zijn. Er is een alternatieve manier gepresenteerd om deze effecten in rekening te brengen.

5.3.1 Howarth *et al.* (1996)

Er is geconstateerd door Howarth *et al.* (1996) dat de fysica van de golfklappen op modelschaal vergelijkbaar is met de golfklappen op prototypeschaal. Echter, er zijn wel significante schaaleffecten opgetreden. Het gebruik van de schalingswet van Froude leidt tot een overschatting van de door golfklappen geïnduceerde drukken en een onderschatting van de stijgtijd van die drukken op prototypeschaal. De oorzaak hiervan, zoals is gesuggereerd door Howarth *et al.* (1996), is de samendrukbaarheid van water: op grote schaal zit er meer lucht in de vorm van bellen in het water. Door Howarth *et al.* (1996) is op basis van hun onderzoek op prototype- en modelschaal een empirische relatie voorgesteld tussen de drukken in model en prototype. Er is in hun model een geometrische schaalfactor toegepast van $n_L = 32$ ten opzichte van prototype. De relatie van Howarth *et al.* (1996) is als volgt:

$$\frac{p_p}{\rho g} = \left(\frac{p_m}{\rho g} \right)^{0,684} \quad (5.1)$$

Hierin staat p (N/m²) voor de druk, ρ (kg/m³) voor de dichtheid van water, g (m/s²) voor de zwaartekrachtversnelling en H_s (m) voor de significante golfhoogte (m). De subscripten m en p staan voor modelwaarden, respectievelijk prototypewaarden. Howarth *et al.* (1996) voegen toe dat deze relatie pas geldt zodra Froude-schaling op de drukken is toegepast. Waarschijnlijk bedoelen ze hier het volgende mee:

$$\frac{P_p}{\rho g} = \left(n_L \frac{p_m}{\rho g} \right)^{0,684} = \left(\frac{H_{s;p} p_m}{H_{s;m} \rho g} \right)^{0,684} \quad (5.2)$$

waarin n_L (-) de schaal is waarop het model is uitgevoerd ten opzichte van prototype. In dit geval is dat $n_L = 32$. Opgemerkt dient te worden dat deze relaties niet correct zijn wat betreft dimensies: aan de linkerkant blijft de dimensie m^1 over, terwijl dat aan de rechterkant $m^{0,684}$ is. Het zou beter zijn de factor dimensieloos te maken, bijvoorbeeld als volgt:

$$\frac{P_p}{\rho g H_{s;p}} = \left(\frac{p_m}{\rho g H_{s;m}} \right)^{0,684} \quad (5.3)$$

Echter, Formules (5.1) en (5.3) komen niet meer overeen. Er zit een factor anderhalf verschil in voor de situatie die door Howarth *et al.* (1996) was onderzocht.

Daarnaast is in Formule (5.1) voor de zwaartekrachtsversnelling en de dichtheid van water geen onderscheid gemaakt tussen model- en prototypewaarden. Voor de zwaartekrachtsversnelling is dit inderdaad niet relevant, maar de dichtheid van water kan in model en prototype wel verschillende waarden hebben. Binnen het huidige project is hier echter niet vanuit gegaan.

Met betrekking tot de stijgtijd is geconstateerd, dat deze net als de druk log-normaal verdeeld is. Op prototypeschaal is vastgesteld dat ongeveer 30 % van de golfklappen een stijgtijd kleiner dan 10 ms heeft. De stijgtijd ligt globaal tussen de 3 en 50 ms. Op modelschaal is voor ongeveer 50 % van de golfklappen een stijgtijd kleiner dan 1 ms vastgesteld. De stijgtijd ligt globaal tussen de 0,1 en 8 ms. Als de schalingswet van Froude wordt gebruikt, zijn deze stijgtijden in het model groter dan in het prototype. In vergelijking tot de metingen in de Scheldegoot en de Deltagoot zijn deze door Howarth *et al.* (2004) gemeten stijgtijden vrij klein.

De impuls van de golfklap per oppervlak blijkt op modelschaal redelijk overeen te komen met prototypeschaal als men gebruik maakt van de schalingswet van Froude, maar dan vooral bij de grotere golfklappen. Voor golfklappen met een impuls die door 1 tot 10 % van de golfklappen overschreden is, is het verschil tussen prototype en model ongeveer 25 %, terwijl dit voor golfklappen met een impuls die door 99 % van de golfklappen overschreden is met een factor 2,5 verschilt. Maar die laatste golfklappen zijn voor de stabiliteit van steenzettingen uiteraard minder relevant.

In Paragraaf 5.4 is, waar mogelijk, aan de resultaten van Howarth *et al.* (1996) gerefereerd.

5.3.2 Schaling volgens Weber

De uitkomsten van de grootschalige proeven in de Deltagoot en de kleinschalige proeven in de Scheldegoot kunnen alleen met elkaar vergeleken worden, wanneer de juiste schaling toegepast wordt. Momenteel wordt voornamelijk de schalingswet van Froude toegepast, maar die is niet voor alle processen geldig. Er zal een eerste aanzet gegeven worden voor het vinden van een aangepaste schaalregel ten behoeve van golfklappen. Het ontwikkelen

van een algemeen bruikbare schaalregel valt buiten het kader van het onderhavige onderzoek.

Aspecten waarin omstandigheden in de Schelde- en de Deltagoot verschillen en die de resultaten kunnen beïnvloeden, doordat ze niet correct meegenomen worden in de schalingswet van Froude, zijn onder andere de hoeveelheid lucht in het water en de reactie van het talud. Deze aspecten zijn door Doorn (1979) vrij uitvoerig beschreven. Echter, werkbare oplossingen in de vorm van schaalregels zijn niet genoemd.

Wat betreft lucht in water zijn er in ieder geval de volgende verschillen tussen de Scheldegoot en de Deltagoot:

- De verblijftijd van lucht in water is in de Deltagoot relatief veel groter dan in de Scheldegoot. De stijgtijd van luchtbelletjes uit het water is namelijk afhankelijk van de grootte van de luchtbelletjes. De grootte van de luchtbelletjes is juist ongeveer gelijk in het water in de Deltagoot en in de Scheldegoot, want die wordt voornamelijk bepaald door de oppervlaktespanning van het water.
- Het water wat (even) achterblijft op het talud bevat waarschijnlijk veel meer luchtbelletjes in de Deltagoot dan in de Scheldegoot. In de Deltagoot is namelijk een relatief ruw en doorlatend talud toegepast, terwijl er in de Scheldegoot sprake was van een vrij glad en ondoorlatend talud. De dempende werking van de laag water op het talud op de golfklap is afhankelijk van de compressibiliteit van die laag water, die op zijn beurt weer sterk bepaald wordt door de hoeveelheid lucht in het water. De voortplantingssnelheid van geluid (een soort drukgolven) door water neemt heel sterk af met een toename van de hoeveelheid lucht in het water.

De fysische processen die bepalend zijn voor de hoeveelheid lucht in het water en dus de voortplantingssnelheid zijn helaas nog niet kwantificeerbaar. Daarom kan er nog geen schaalregel met een goede fysische basis afgeleid worden voor golfklappen. Wel kan aangenomen worden dat de hoeveelheid lucht in het water sterk beïnvloed wordt door de oppervlaktespanning van het water ten opzichte van de grootte van de waterbeweging. Op basis van deze aanname is het getal van Weber afgeleid, die de verhouding weergeeft tussen de traagheidskrachten en de capillaire krachten (Doorn 1990):

$$We = \frac{\rho v^2 L}{\sigma_w} \quad (5.4)$$

waarin We (-) het getal van Weber is, σ_w (N/m) de oppervlaktespanning van water, v (m/s) een karakteristieke watersnelheid en L (m) een karakteristieke lengte. Bij 20 °C bedraagt de oppervlaktespanning van water $\sigma_w = 73 \cdot 10^{-3}$ N/m.

Het getal van Weber treedt naar voren als de scheidingsvlakken tussen twee media, in dit geval water en lucht, van belang zijn. Meer gedetailleerde informatie over (het gedrag van) lucht(bellen) in water is onder andere te vinden in Risso en Fabre (1998), Kamp *et al.* (2001), Ellingsen en Risso (2001) en Colin *et al.* (2004).

Voor de karakteristieke lengte kan de significante golfhoogte H_s gebruikt worden. Verder kunnen de basiswetten uit de fysica gebruikt worden:

- snelheid = versnelling \times tijd: $v = at = gt$
 - verplaatsing = snelheid \times tijd: $x = vt$
- $$\left. \vphantom{\begin{matrix} v = at = gt \\ x = vt \end{matrix}} \right\} v = \sqrt{gx}$$

Hieruit blijkt dat in een schaalregel de snelheid v vervangen kan worden door $\sqrt{gH_s}$. Hiermee wordt een gemodificeerde schaalregel van Weber verkregen:

$$We' = \frac{\rho g H_s^2}{\sigma_w} \quad (5.5)$$

De fysische processen omtrent het breken van de golven worden voor een deel beheerst door de verhouding tussen de traagheidskrachten in het water en de invloed van de zwaartekracht. Deze verhouding wordt weergegeven door het getal van Froude (met de golfhoogte als karakteristieke lengte):

$$Fr = \frac{v^2}{gH_s} \quad (5.6)$$

waarin Fr (-) het getal van Froude is.

Voor een ander deel wordt het proces beheerst door de invloed van luchtbellen, die afhankelijk zijn van de verhouding tussen de oppervlaktetension en de traagheidskrachten. Deze verhouding wordt weergegeven door het getal van Weber. Gezien het feit dat de fysische processen omtrent het breken van golven door beide verhoudingen beïnvloed worden, moet in een schaalregel zowel het getal van Froude als die van Weber naar voren komen. Dit kan bijvoorbeeld als volgt:

$$\frac{\phi_k}{H_s} \left(\frac{\rho g H_s^2}{\sigma_w} \right)^a \quad (5.7)$$

waarin het volgende is verwerkt:

- ϕ_k/H_s : dimensieloze parameter van het te analyseren aspect van de golfklap; dimensieloos gemaakt op basis van de schaalregel van Froude
- $\rho g H_s^2 / \sigma_w$: gemodificeerd getal van Weber (Formule (5.5)), waarmee een correctie wordt toegepast die verband houdt met de luchtbellen in het water en de voortplantingssnelheid van de drukgolven

De grootte van de correctie met het getal van Weber zal voor elk aspect van het brekerproces en van de golfklap verschillend zijn, hetgeen ingesteld kan worden met de grootte van a . Als $a = 0$, dan blijft een zuivere schaling volgens Froude over, terwijl naarmate a groter wordt, er een groter aandeel van de Weber-schaling in komt.

Op dezelfde wijze kan ook een dimensieloze parameter, waarin het getal van Weber is verwerkt, afgeleid worden voor aspecten van de golfklap waarbij de tijd belangrijk is:

$$\frac{t_k}{\sqrt{H_s/g}} \left(\frac{\rho g H_s^2}{\sigma_w} \right)^a \quad (5.8)$$

waarin de parameter $t_k/\sqrt{(H_s/g)}$ het te analyseren aspect van de golfklap bevat, dimensieloos gemaakt op basis van de schaalregel van Froude.

Wat betreft het talud is er naast het verschil in ruwheid, ook een verschil in stijfheid. Het talud in de Deltagoot is opgebouwd uit losse blokken op steenslag. In de Scheldegoot is een constructie opgebouwd uit een dikke aluminium plaat, beton en een funderingsconstructie van hout. Daarbij is getracht met het aanbrengen van dwarsverbanden een zo stijf mogelijke constructie te maken. Hoe meer de constructie ‘meegeeft’, hoe kleiner de impact van golfklappen zal zijn. Het is lastig om deze verschillen in stijfheid te kwantificeren. Het lijkt waarschijnlijk dat de constructie in de Scheldegoot naar verhouding een andere stijfheid had dan de constructie in de Deltagoot.

Omdat het niet goed mogelijk is vast te stellen wat (het verschil in) de stijfheid van beide taluds is, is het ook moeilijk een uitspraak te doen over het effect hiervan op de resultaten en om hier rekening mee te houden.

5.4 Analyse van golfbelasting op talud

De geanalyseerde proeven bestaan elk uit ongeveer 1000 golven met vele golfklappen en golffronten. De analyse van al deze golven is gedaan met de golfbelasting-analyse-software van Coeveld en Klein Breteler (2004), waarin verbeteringen zijn aangebracht. Deze software levert voor elke golf de waarde van elke eigenschap van de golfklap en het golffront. De enorme hoeveelheid gegevens die dit heeft opgeleverd, is vervolgens statistisch geanalyseerd. Daarbij is vooral gekeken naar de maximale waarde van een bepaalde parameter in een bepaalde proef, en naar de waarden met een overschrijdingsfrequentie van 2 % (op basis van het aantal golven in de proef) en van 10 %. In sommige gevallen gaat het niet om de maximale, maar om de minimale waarde, en de waarden met een onderschrijdingsfrequentie van 2 % en 10 %. Het gaat hierbij om de 2 % (of 10 %) overschrijdingswaarden ten opzichte van het aantal inkomende golven. Bij een totaal van 1000 golven is $\phi_{k2\%}$ de 20 na grootste golfklap, ook al waren er bijvoorbeeld slechts 700 golven met een golfklap.

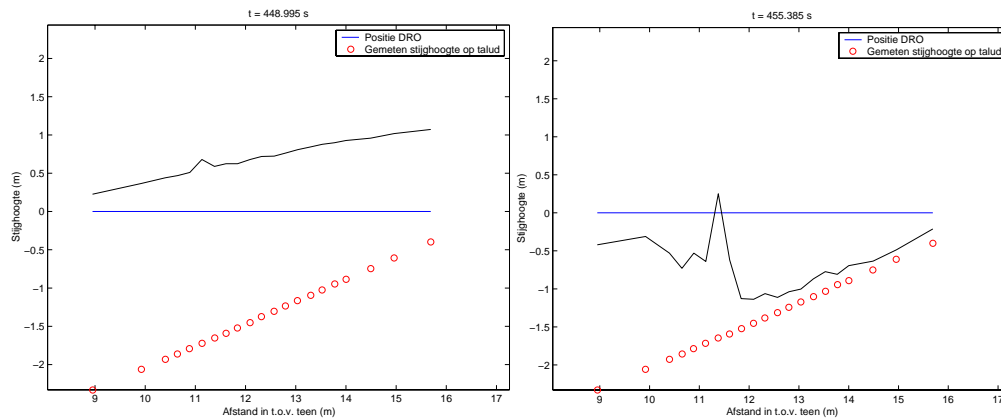
De in Paragraaf 5.2 genoemde parameters zijn op dezelfde wijze grafisch weergegeven als in Coeveld en Klein Breteler (2004), maar nu zijn ook de recente Deltagootmetingen toegevoegd. Als daar aanleiding voor was, zijn de figuren aangepast, bijvoorbeeld door andere dimensieloze parameters op de assen toe te passen.

In sommige gevallen was het nodig om de analyse te beperken tot alleen die golven die een grote golfklap of groot golffront hebben opgeleverd. Dit is bijvoorbeeld gedaan voor de breedte van de golfklap. Door alleen de golfklappen te analyseren die bij de grootste 33 % horen, is voorkomen dat het resultaat vertroebeld is door kleine onbeduidende golfklapjes.

De selectie is gemaakt op basis van de waarde van ϕ_k als het om de grootste golfklappen gaat, en op basis van de waarde van ϕ_b als het om fronten gaat.

5.4.1 Golfklap

Uit animaties van de ruimtelijke verdeling van de gemeten stijghoogtes is gebleken dat de software die gebruikt is in Klein Breteler en Coeveld (2004) alleen de grotere golfklappen identificeert. In gevallen dat binnen een golf de maximale stijghoogte ergens groter is dan de stijghoogte in een golfklap werd deze laatste door de software niet als zodanig herkend. Deze maximale stijghoogte treedt, zoals is gebleken, in deze gevallen vaak op in de drukopnemer die in het meest ondiepe stuk ligt (het verst van het golfschot vandaan). Dit heeft te maken met golfoploop. In Figuur 5.2 staat een dergelijke situatie zoals waargenomen in proef 26, waarbij gegeven is dat de beschouwde golf begint op 446,4 s en loopt tot 457,3 s. De software is dusdanig gewijzigd dat de voorheen niet herkende golfklappen, zoals in het rechterplaatje in Figuur 5.2, nu wel als zodanig herkend worden. De maximale stijghoogte in deze golfklappen is kleiner dan de maximale stijghoogte in de golftop of in de golfoploop.



Figuur 5.2 Stijghoogteverloop op het talud, binnen één golf

Aantal golfklappen en golffronten

In Tabel B.1 is voor elke proef het aantal geïdentificeerde golfklappen weergegeven. In Figuur C.26 is het aantal golfklappen per totaal aantal golven per proef weergegeven. Het volgende kan opgemerkt worden:

- Het blijkt dat het aantal golfklappen sterk afneemt als de golven langer zijn (toenemende waarde van de brekerparameter, ξ_{op}).
- Het door de verbeterde software geconstateerde aantal golfklappen is flink toegenomen voor de proevenserie T3** (talud 1:3), terwijl voor proevenserie T4** (talud 1:4) dit aantal (vrijwel) gelijk is gebleken. Vergelijk hiertoe Tabel B.1 met Tabel B.5 uit Klein Breteler en Coeveld (2004).
- Het aantal golfklappen, voor een gegeven brekerparameter, schaal en spectrum (Scheldegootproeven T3** en T4**), is afhankelijk van de taludhelling. Figuur C.13 in Klein Breteler en Coeveld (2004) wekt de indruk dat deze afhankelijkheid er niet zou zijn. Het lijkt er dus op dat het aantal golfklappen, bij gegeven schaal, eerder een functie van de golfsteilheid is dan van de brekerparameter. In Figuur C.26 is dit bevestigd.

- Het aantal golfklappen is op een grotere schaal (Deltagootproeven) minder groot voor een gegeven brekerparameter en spectrum. Dit heeft dus te maken met schaafeffecten: op een grotere schaal is het water, door de grotere hoeveelheid bellen, meer samendrukbaar ('zachter').
- Het aantal golfklappen blijkt verder afhankelijk te zijn van het opgelegde spectrum. Twee van de drie proeven met een dubbeltoppig spectrum op een talud van 1:4, te weten T502 en T503, geven beduidend meer golfklappen dan soortgelijke proeven met een Pierson-Moskowitz spectrum. Voor een dubbeltoppig spectrum is de piekperiode geen goede maat. Het is beter de golfcondities in de proef te karakteriseren met een spectrale maat, bijvoorbeeld $T_{m-1,0}$. Het feit dat er relatief veel korte golven (met een duidelijke golfklap) in dubbeltoppige spectra voorkomen, representeert deze maat voor de periode de golfcondities beter. De verhouding $T_p/T_{m-1,0}$ is voor enkeltoppige spectra kleiner ($\approx 1,1$), dan voor dubbeltoppige spectra ($\approx 1,1$ à $1,8$).

Een gering aantal golven met een golfklap had als consequentie, dat soms de waarde met een overschrijdingsfrequentie van 10 % niet bepaald kon worden. Immers, als er 1000 golven waren en minder dan 100 golfklappen, dan is er geen op 100 na grootste golfklap.

Onderstaand is voor alle geselecteerde eigenschappen een korte beschrijving gegeven aan de hand van de figuren die zijn gemaakt met, bij voorkeur, de dimensieloze waarden op de verticale as en (meestal) de brekerparameter op de horizontale as. Gezien het feit dat de maximale waarden steeds een grote spreiding vertonen, waarschijnlijk als gevolg van het toeval, is de analyse voornamelijk gericht op de waarden met een overschrijdingsfrequentie van 2 %.

Maximale druk ten opzichte van talud (p_{max})

De maximale druk, ten opzichte van het talud (p_{max}/H_s) is als functie van de brekerparameter weergegeven in Figuur C.28. In de resultaten voor $p_{max;2\%}/H_s$ is een duidelijk schaafeffect te zien. Geïnspireerd door Formule (5.3) is in Figuur C.29 de Howarth-schaling gebruikt, in plaats van de Froude-schaling zoals gebruikt in Figuur C.28. Hiertoe is voor de Scheldegootproeven de grootheid $(p_{max}/H_s)^{0.684}$, en voor de Deltagootproeven de grootheid (p_{max}/H_s) als functie van de brekerparameter uitgezet. De in de legenda van Figuur C.29 gebruikte subscripten 'm' en 'p' staan voor respectievelijk model- (Scheldegoot) en prototypeschaal (Deltagoot). De Howarth-schaling voldoet klaarblijkelijk beduidend beter dan de Froude-schaling. Een mogelijk probleem is echter dat deze schaalregel een zuiver empirische basis heeft, die afgeregeld is op slechts één case bij één schaal. Het is denkbaar dat het toepassingsgebied daardoor zeer smal is.

In Figuur C.30 is de factor toegepast die gebaseerd is op het getal van Weber zoals in Formule (5.7) gedefinieerd is (zie Paragraaf 5.3.2). Om tot een goede fit te komen is $a = 0,15$ gekozen. Ook deze schaling voldoet beter dan de Froude-schaling. Proef 10 wijkt meer af dan de rest. Dit kan te maken hebben met het feit dat dit een ingolfproef was waarbij de drukopnemers niet optimaal geïnstalleerd waren ten opzichte van de waterlijn.

In Figuur C.31 en Figuur C.32 zijn de metingen nogmaals getekend voor respectievelijk de Howarth-schaling en de Weber-schaling, maar nu als functie van de golfsteilheid, s_{op} . Om het beeld van de figuur ongeveer gelijk te houden aan die van Figuur C.29 is op de horizontale as $\xi_{op}/\tan\alpha = 1/\sqrt{s_{op}}$ uitgezet.

De maximale waarden van (p_{\max}/H_s) laten een grote spreiding zien zonder duidelijke trend. De spreiding voor $p_{\max,2\%}/H_s$ en $p_{\max,10\%}/H_s$ is veel kleiner. De globale trend van $p_{\max,2\%}/H_s$ als functie van $\xi_{op}/\tan\alpha$ is als volgt te beschrijven, in het geval van de Weber-schaling:

$$\frac{p_{\max,2\%}}{H_s} \left(\frac{\rho g H_s^2}{\sigma_w} \right)^{0,15} = 16,1 - 0,35 \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha}; \text{ voor } 7,5 \leq \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} < 23,5 \quad (5.9)$$

Maximale stijghoogte ten opzichte van trog (ϕ_k)

De maximale waarden van ϕ_k/H_s als functie van de brekerparameter in Figuur C.33 laten een grote spreiding zien, met een duidelijk dalende tendens bij toenemende ξ_{op} en een duidelijk schaafeffect. De spreiding voor $\phi_{k,2\%}/H_s$ en $\phi_{k,10\%}/H_s$ is kleiner. Voor $\phi_{k,2\%}/H_s$ kan, voor de Scheldegootproeven, de volgende relatie worden aangehouden:

$$\frac{\phi_{k,2\%}}{H_s} = -0,25 \xi_{op} + 3,5; \text{ voor } 2 \leq \xi_{op} < 6 \quad (5.10)$$

Deze is identiek aan Formule (4.2) uit Klein Breteler en Coeveld (2004), waarbij nu het deel $\xi_{op} < 2$ niet beschouwd is.

De twee groepen meetpunten behorende bij een talud van respectievelijk 1:3 en 1:4 liggen ongeveer op elkaar. Opmerkelijk is wel dat voor $\xi_{op} > 4$ de metingen behorende bij een talud van 1:4 allemaal lager liggen dan die behorende bij een talud 1:3.

In Figuur C.34 is de maximale stijghoogte ten opzichte van de trog weergegeven volgens de Howarth-schaling. Hier wrekt zich het erg empirische karakter van de Howarth-schaling. Waarschijnlijk voldoet deze schaling alleen voor één specifiek aspect van de golfklap (p_{\max}) en alleen voor één specifieke lengteschaal.

In Figuur C.35 is de maximale stijghoogte ten opzichte van de trog weergegeven volgens de Weber-schaling (met de factor in Formule (5.7)). Om tot een goede fit te komen is $a = 0,20$ gekozen. Dit levert minder spreiding dan de Howarth-schaling en de Froude-schaling. Het bleek dat de waarden behorend bij de proeven met een taludhelling van 1:4, het hoogst lagen. In Figuur C.35 is daarom op de horizontale as de golfsteilheid uitgezet in de vorm van $\xi_{op}/\tan\alpha = 1/\sqrt{s_{op}}$. De spreiding vermindert daardoor aanzienlijk. De volgende relatie is ingetekend:

$$\frac{\phi_{k,2\%}}{H_s} \left(\frac{\rho g H_s^2}{\sigma_w} \right)^{0,2} = 22,6 - 0,75 \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha}; \text{ voor } 7,5 \leq \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} < 23,5 \quad (5.11)$$

Net als in Figuur C.32 waarin de maximale druk ten opzichte van het talud uitgezet is tegen de golfsteilheid, vertoont proef 10 nu weer een grotere afwijking.

In het geval van de maximale druk ten opzichte van het talud is $a = 0,15$ gekozen, terwijl in het geval van de maximale stijghoogte ten opzichte van de trog een macht van $a = 0,2$ een

betere fit opleverde. Dit kan te maken hebben met het feit, dat het deel van de druk ‘boven de waterlijn’ in ϕ_k zwaarder meetelt dan in p_{max} . Juist bij dat deel is de Weber-schaling belangrijk.

Breedte van de golfklap ($B_{klap50\%}$)

Bij de breedte van de golfklap ($B_{klap50\%}$) is gekeken naar de grootste 33 % van de golfklappen, gelet op ϕ_k . Dit heeft als nadelige consequentie dat de analyse zich richt op zo weinig golfklappen, dat de metingen met een onderschrijdingsfrequenties van 10 % (en soms zelfs van 2 %) veelal afwezig zijn. Voor de Deltagootproeven heeft dit tot gevolg dat slechts twee waarden voor de 2 % onderschrijdingsfrequentie, te weten uit proeven P25 en P26, aanwezig zijn.

De metingen van $B_{klap50\%}/H_s$ zijn als functie van de brekerparameter te zien in Figuur C.36. De maximale waarden van $B_{klap50\%}/H_s$ vertonen een grote spreiding, terwijl de 2 % en 10 % waarden meer bijeen liggen. De getrokken lijn is een aangepaste versie van Formule (4.3) uit Klein Breteler en Coeveld:

$$\frac{B_{klap50\%2\%}}{H_s} = -0,15\xi_{op} + 1,05; \text{ voor } 2 \leq \xi_{op} < 6 \quad (5.12)$$

De twee groepen meetpunten behorende bij een talud van respectievelijk 1:3 en 1:4 liggen ongeveer op elkaar. De meeste metingen behorende bij een talud van 1:3 liggen echter iets hoger dan die behorende bij 1:4. Dit is tegenstelling tot de eerdere bevindingen in Klein Breteler en Coeveld (2004). Het heeft in dit geval dus geen zin om te kijken naar het hoogteverschil waarover de golfklap zich uitstrekt: $B_{klap50\%}\sin\alpha$.

Op basis van de twee punten met een overschrijdingsfrequentie van 2% is het moeilijk een conclusie te trekken ten aanzien van de schaaleffecten. Als echter ook de maximale waarden in beschouwing worden genomen, dan is te zien dat er voor de breedte van de golfklap nauwelijks sprake is van schaaleffecten.

In Figuur C.37 staan, voor proeven 15 en 26, de maximale stijghoogtes ϕ_k/H_s uitgezet tegen de breedte van de golfklappen $B_{klap50\%}/H_s$. De reden om juist deze twee proeven te nemen is dat ze, naast het feit dat ze relatief veel golfklappen vertonen, corresponderen met twee duidelijk verschillende brekerparameters. De breedte van golfklap blijkt voor proef 15 af te nemen naarmate de maximale stijghoogte toeneemt, hoewel de spreiding groot is. Voor proef 26 is de spreiding zo groot dat een trend nauwelijks waarneembaar is. Dit betekent dat de golfklap smaller is, naarmate de golfklaphoogte groter is.

Gediptheid tijdens golfklap (ϕ_{dip})

Een belangrijke parameter voor de stabiliteit van niet-ingegoten steenzettingen is de gediptheid, die evenredig is met het stijghoogteverschil over de toplaag.

In Figuur C.38 is de gediptheid (ϕ_{dip}) tijdens de golfklap weergegeven als functie van de brekerparameter. Voor de Scheldegootproeven is de gediptheid berekend met een

middelingslengte van 0,37 m, en voor de Deltagootproeven met een middelingslengte van 2,6 m. De verhouding tussen beide lengtes is ongeveer even groot als de verhouding tussen de toegepaste golfhoogtes in beide faciliteiten. Om het onderscheid tussen de Scheldegootproeven voor taluds 1:3 en 1:4 te verminderen is, net als in Klein Breteler en Coeveld (2004), de gediptheid uitgezet tegen de golfsteilheid, s_{op} . Om het beeld van de figuur ongeveer gelijk te houden aan die van Figuur C.38 is in Figuur C.39 op de horizontale as $\xi_{op}/\tan\alpha = 1/\sqrt{s_{op}}$ uitgezet.

Onderstaande formule, identiek aan Formule (4.4) uit Klein Breteler en Coeveld (2004), geeft voor de Scheldegootproeven het verband tussen $\phi_{dip2\%}/H_s$ en $\xi_{op}/\tan\alpha$:

$$\begin{cases} \frac{\phi_{dip2\%}}{H_s} = 0,01 \frac{\xi_{op}}{\tan\alpha} + 0,82; & \text{voor } 4,8 \leq \frac{\xi_{op}}{\tan\alpha} < 12 \\ \frac{\phi_{dip2\%}}{H_s} = -0,02 \frac{\xi_{op}}{\tan\alpha} + 1,18; & \text{voor } 12 \leq \frac{\xi_{op}}{\tan\alpha} < 23,2 \end{cases} \quad (5.13)$$

Voor de Deltagootproeven is een beduidend lagere gediptheid te zien tijdens de golfklap dan voor soortgelijke Scheldegootproeven. De dalende trend (afname van $\phi_{dip2\%}/H_s$ met toenemende brekerparameter) is voor de Deltagootproeven nog veel sterker dan voor de Scheldegootproeven. Figuur C.40 toont dat ook gebruik van de Howarth-schaling hier, net als voor de maximale stijghoogte in Figuur C.34, weinig soelaas biedt. De verhouding tussen de waarden van ϕ_{dip}/H_s uit de Scheldegootproeven en de Deltagootproeven is ongeveer gelijk aan die van ϕ_k/H_s . Dit is ook te verwachten, omdat de gediptheid in hoge mate bepaald wordt door ϕ_k .

In Figuur C.41 is de gediptheid tijdens de golfklap tegen de golfsteilheid weergegeven met behulp van de Weber-schaling (met de factor in Formule (5.7)). Om tot een goede fit te komen is $a = 0,15$ gekozen. De spreiding voor de waarden met een overschrijdingsfrequentie van 2 % is duidelijk afgenomen. De volgende relatie is ingetekend in Figuur C.41:

$$\frac{\phi_{dip2\%}}{H_s} \left(\frac{\rho g H_s^2}{\sigma_w} \right)^{0,15} = 5 - 0,15 \frac{\xi_{op}}{\tan\alpha}; \quad \text{voor } 7,5 \leq \frac{\xi_{op}}{\tan\alpha} < 23,5 \quad (5.14)$$

Volgens ANAMOS zou het stijghoogteverschil van $\xi_{op} = 2$ tot $\xi_{op} = 5$ met een factor 1,5 à 1,6 moeten stijgen. De gediptheid in de Deltagootproeven neemt echter met een factor 2 af. Dit is een duidelijke indicatie dat de trend in de stabiliteit volgens ANAMOS verkeerd wordt weergegeven. Bij toenemende ξ_{op} neemt volgens ANAMOS de stabiliteit af (toenemend stijghoogteverschil), maar volgens deze analyse neemt de stabiliteit juist toe.

Breedte van opwaartse belasting ($F_{dip}/(\phi_{dip} - 0,4H_s)/H_s$)

De dipkracht, F_{dip} , is gelijk aan de integraal van de gediptheid over de gehele steenzetting, als de gediptheid groter is dan een bepaalde drempelwaarde (drempel = $0,4H_s$), minus deze drempel waarde. Met deze definitie is de dipkracht vergelijkbaar met de totale kracht die het

stijghoogteverschil uitoefent op de steenzetting minus het eigen gewicht (en enige klemming) van de steenzetting. Het geeft dus de kracht weer, die beschikbaar is om de steenzetting op te lichten. Door deze dipkracht vervolgens weer te delen door de gediptheid (minus de drempelwaarde), wordt een maat verkregen voor de gemiddelde breedte waarop de opwaartse kracht werkt.

In Figuur C.42 is de belaste breedte weergegeven, die verkregen wordt met $F_{dip}/(\phi_{dip}-0,4H_s)$, als functie van de brekerparameter. Alleen de 33 % golven met grootste ϕ_k zijn in beschouwing genomen.

Vanwege de spreiding in de maximale waarden en de waarden met een overschrijdingsfrequentie van 2 % en 10 % is het moeilijk een duidelijke tendens waar te nemen. De in Klein Breteler en Coeveld (2004) voorgestelde Formule (4.5), die voor de volledigheid hier is herhaald:

$$\left(\frac{F_{dip}}{\phi_{dip} - 0,4H_s} \right)_{2\%} / H_s = -0,06\xi_{op} + 0,46; \text{ voor } 1 \leq \xi_{op} < 5 \quad (5.15)$$

lijkt hier minder goed te voldoen.

Voor de volledigheid is in Figuur C.43 het hoogteverschil waarover de belasting zich uitstrekt uitgezet: $F_{dip}\sin\alpha/(\phi_{dip}-0,4H_s)$

Het is in ieder geval wel duidelijk dat de belaste breedte in de Deltagootproeven ongeveer een factor 3 à 4 kleiner is dan in de Scheldegootproeven. De oorzaak ligt in het beduidend kleiner zijn van de golfklappen.

Stijgtijd (t_{stijg})

De stijgtijd is gelijk aan de tijdsduur dat de stijghoogte op het talud toeneemt tot het maximum in de golfklap.

In Figuur C.44 is de stijgtijd (t_{stijg}) weergegeven voor de grootste (ten aanzien van ϕ_k) 33 % van de golfklappen als functie van de brekerparameter. De stijgtijd is in deze figuur niet dimensieloos weergegeven, omdat niet zeker is op wat voor manier dit het best gedaan kan worden. De waarden moeten daardoor wel geïnterpreteerd worden in het licht van het feit dat het om een combinatie van kleinschalig en grootschalig modelonderzoek gaat. Rekening houdend met het feit dat het kleinschalig onderzoek met 100 Hz, en het grootschalig onderzoek met 200 Hz is bemonsterd, is te zien dat het merendeel van de geconstateerde stijgtijden binnen 1 à 2 bemonsteringen ligt, zie Figuur C.45. Dat betekent dat de golfklap in één tijdstap ontstaat; tussen twee bemonsteringen neemt de stijghoogte op het talud toe van een kleine waarde tot een maximum. Voor het nauwkeuriger bepalen van de stijgtijd zou een (veel) grotere bemonsteringsfrequentie genomen moeten worden. Momenteel leidt de verwerking van deze signalen vanwege zeer grote meetbestanden tot computerproblemen.

Het valt op dat de stijgtijden met een overschrijdingsfrequentie van 2 % voor de Deltagootproeven vrij groot zijn. De manier waarop de stijgtijd bepaald is in de golfbelasting-analyse-software leidt kennelijk niet in alle gevallen tot bevredigende

resultaten. Wanneer er daarnaast niet heel veel golfklappen geconstateerd zijn in een proef, dan is de kans vrij groot dat dat soort resultaten een belangrijke rol spelen.

Dit betekent tevens dat de opmerking in Howarth *et al.* (1996) dat Froude-schaling leidt tot de onderschatting van stijgtijden in prototypeschaal op dit moment niet bevestigd kan worden.

Golfklapduur (t_k)

In Figuur C.46 is de golfklapduur (t_k) weergegeven voor de grootste (ten aanzien van ϕ_k) 33 % van de golfklappen als functie van de golfsteilheid. De golfklapduur is minimaal gelijk aan twee tijdstappen van het bemonsterde signaal. Voor de Scheldegootproeven die uitgevoerd zijn met 100 Hz komt dit neer op 0,02 s. Voor de Deltagootproeven die uitgevoerd zijn met 200 Hz komt dit neer op 0,01 s.

De waarden met een overschrijdingsfrequentie van 2 % zijn echter dusdanig kleiner, dat hierin de bemonsteringsfrequentie waarschijnlijk een kleine invloed heeft gehad. Met behulp van onderstaande formule, die gelijk is aan Formule (4.6) uit Klein Breteler en Coeveld (2004), kan het verloop voor de Scheldegootproeven van de waarden met een overschrijdingsfrequentie van 2 % beschreven worden. (Nb: onderstaande uitdrukking heeft secondes als dimensie):

$$\begin{cases} t_{k2\%} = -0,008 \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} + 0,125; & \text{voor } 4,8 \leq \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} < 10 \\ t_{k2\%} = 5 \cdot 10^{-5} \left(\frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} - 10 \right)^4 + 0,045; & \text{voor } 10 \leq \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} < 17 \end{cases} \quad (5.16)$$

De waarden van de golfklapduur met een overschrijdingsfrequentie van 2 % zoals die volgt uit de Deltagootproeven zijn zeer veel groter dan die uit de Scheldegootproeven. In Figuur C.47 staat de golfklapduur tegen de golfsteilheid, waarbij eerstgenoemde dimensieloos gemaakt is met de Froude-schaling. Deze schaling leidt niet tot minder spreiding in de resultaten.

De Weber-schaling is toegepast in Figuur C.48. Daarin is t_k dimensieloos gemaakt volgens de methode zoals afgeleid in paragraaf 5.4.2: $t_k / \sqrt{(H_s/g) \cdot (\rho g H_s^2 / \sigma_w)^a}$ met $a = 0,05$. Zelfs bij deze kleine waarde van de macht a , is de spreiding nog steeds erg groot. Wellicht is de manier waarop de golfklapduur bepaald wordt in de golfbelasting-analyse-software nog niet in alle gevallen optimaal.

Geïntegreerde gediptheid tijdens golfklap ($\phi_{f_{dip}}$)

De geïntegreerde gediptheid wordt beschouwd als een maat voor de blokbeweging. Het is de integraal over de tijd van de gediptheid (minus een drempelwaarde) voor zolang deze groter is dan deze drempelwaarde. De drempelwaarde bedraagt $0,4H_s$ en is vergelijkbaar met het eigen gewicht van de toplaag met enige klemming.

In Figuur C.49 is de geïntegreerde gediptheid (ϕ_{dip}) tijdens de golfklap weergegeven als functie van de brekerparameter. De getrokken lijn geeft het verband weer tussen $\phi_{\text{dip}2\%}$ en ξ_{op} :

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{\text{dip}2\%} = 0,0015\xi_{\text{op}} + 0,0028; \text{ voor } 1 \leq \xi_{\text{op}} < 2,8 \\ \phi_{\text{dip}2\%} = \frac{0,007}{(\xi_{\text{op}} - 1,8)^2}; \text{ voor } 2,8 \leq \xi_{\text{op}} < 6 \end{array} \right. \quad (5.17)$$

Bovenstaande formule heeft meter – seconde als dimensie, en is identiek aan Formule (4.7) uit Klein Breteler en Coeveld. Er is een duidelijke afname waarneembaar in ϕ_{dip} voor $\xi_{\text{op}} \geq 2,8$, terwijl volgens ANAMOS er een aanzienlijke toename in blokbeweging zou moeten zijn met toenemende brekerparameter.

Vanwege schaafeffecten is het te verwachten dat de (dimensievolle) grootheid ϕ_{dip} , voor gegeven brekerparameter, groter is in grootschalige modelproeven. Toepassing van de Froude-schaling leidt tot Figuur C.50. De resulterende dimensieloze geïntegreerde gediptheid is voor de grootschalige modelproeven veel kleiner. Dit is wederom een indicatie dat de golfklappen niet erg groot zijn.

Het is belangrijk om vast te stellen dat de trend van de geïntegreerde gediptheid goed overeenkomt met de trend in de metingen van het stijghoogteverschil over de toplaag (zie Paragraaf 4.2, Figuur 4.2).

Duur van opwaartse belasting ($\phi_{\text{dip}}/(\phi_{\text{dip}} - 0,4H_s)$)

De tijd dat er een opwaartse stijghoogteverschil tijdens de golfklap plaatsvindt, kan afgeleid worden uit de geïntegreerde gediptheid. Door de geïntegreerde gediptheid te delen door de gediptheid (minus de drempelwaarde van $0,4H_s$) is een gemiddelde duur verkregen waarbij de gediptheid (die vergelijkbaar is met het stijghoogteverschil over de toplaag) groter is dan de drempelwaarde (die vergelijkbaar is met het eigen gewicht en enige klemming).

In Figuur C.51 en Figuur C.52 is deze belastingsduur $\phi_{\text{dip}}/(\phi_{\text{dip}} - 0,4H_s)$ weergegeven als functie van de brekerparameter. Voor $\xi_{\text{op}} \geq 2,5$ neemt deze belastingsduur af met toenemende brekerparameter. De getrokken lijn is identiek aan Formule (4.8) uit Klein Breteler en Coeveld (2004), en wordt gegeven door (Nb: Formule (5.18) heeft secondes als dimensie.)

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\phi_{\text{dip}}}{\phi_{\text{dip}} - 0,4H_s} \right)_{2\%} = 0,1; \text{ voor } 1 \leq \xi_{\text{op}} < 2,5 \\ \left(\frac{\phi_{\text{dip}}}{\phi_{\text{dip}} - 0,4H_s} \right)_{2\%} = \frac{0,1}{(\xi_{\text{op}} - 1,5)^2}; \text{ voor } 2,5 \leq \xi_{\text{op}} < 6 \end{array} \right. \quad (5.18)$$

De meetpunten behorende bij een taludhelling van 1:3 liggen boven die van de meetpunten met een taludhelling van 1:4. Dus het ligt voor de hand de belastingsduur uit te zetten tegen de golfsteilheid. Dit is gedaan in Figuur C.53. De getrokken lijn wordt gegeven door (eenheid in secondes):

$$\left(\frac{\phi_{\int dip}}{\phi_{dip} - 0,4H_s} \right)_{2\%} = 0,32 - 0,021 \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha}; \text{ voor } 8 < \xi_{op} < 15 \quad (5.19)$$

Deze lijn ligt bovendien beter op de meetpunten dan (5.18).

Het is opvallend dat een aantal grootschalige proeven een belastingsduur geven die – zelfs in secondes uitgedrukt – kleiner is dan in de kleinschalige modelproeven.

Gradiënt aan zeezijde van golfklap ($\theta_{k20\%-80\%f}$ en $\theta_{k50\%-80\%k}$)

In Figuur C.54 is de gradiënt $\theta_{k20\%-80\%f}$ aan de zeezijde van de golfklap in de trog weergegeven als functie van de brekerparameter. Alleen de 33 % grootste golfklappen (ten aanzien van ϕ_k) zijn in de analyse betrokken.

De maximale gradiënten voor de kleinschalige proeven blijken bijna 90° te zijn. De gradiënt met een overschrijdingsfrequentie van 2 % ligt hier dicht tegenaan, maar neemt flink af als $\xi_{op} > 3,5$. Deze sterke afname kan erop duiden, dat de trog bij langere golfperioden minder duidelijk aanwezig is en daarmee minder grote gradiënten met zich meebrengt. Met behulp van Formule (5.20) kan deze gradiënt voor de kleinschalige proeven als functie van de brekerparameter beschreven worden. (Nb: Formule (5.20) heeft graden als dimensie.)

$$\begin{cases} \theta_{k20\%-80\%f2\%} = 83^\circ; \text{ als } 1 \leq \xi_{op} < 3,5 \\ \theta_{k20\%-80\%f2\%} = -40^\circ \xi_{op} + 223^\circ; \text{ als } 3,5 \leq \xi_{op} < 5 \end{cases} \quad (5.20)$$

Voor de grootschalige proeven geldt dat de maximale gradiënten tussen de 45° en 75° te liggen. Door de grotere compressibiliteit van het water ten gevolge van luchtinsluiting is de trog minder duidelijk aanwezig. Dit is in overeenstemming met hetgeen geconstateerd is bij de analyse van de maximale stijghoogte.

In Figuur C.55 staan de maximale gradiënten uitgezet als functie van de golfsteilheid. De getrokken lijn wordt gegeven door (graden als dimensie):

$$\begin{cases} \theta_{k20\%-80\%f2\%} = 89^\circ - 0,6^\circ \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha}; \text{ als } 8 \leq \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} < 13 \\ \theta_{k20\%-80\%f2\%} = -21^\circ \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} + 355^\circ; \text{ als } 13 \leq \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} < 15 \end{cases} \quad (5.21)$$

Vergelijking tussen Figuur C.54 en Figuur C.55 leert dat de spreiding tussen de meetpunten minder is wanneer de gradiënten tegen de golfsteilheid zijn uitgezet.

Een andere gradiënt aan de zeezijde van de golfklap is de gradiënt $\theta_{k50\%-80\%k}$ tussen 50 % en 80 % van de klaphoogte ten opzichte van het talud. Figuur C.56 geeft deze weer. De afname vindt hier iets later plaats en is ook minder sterk. Dit kan met behulp van Formule (5.22) beschreven worden. (Nb: Formule (5.22) heeft graden als dimensie.)

$$\begin{cases} \theta_{k50\%-80\%k} = 85^\circ; & \text{als } 1 \leq \xi_{op} < 3,8 \\ \theta_{k50\%-80\%k} = -10^\circ \xi_{op} + 123^\circ; & \text{als } 3,8 \leq \xi_{op} < 5 \end{cases} \quad (5.22)$$

Deze formule is identiek aan Formule (4.10) uit Klein Breteler en Coeveld (2004). Ook bij deze gradiënt is gekeken naar de grootste (ϕ_k) 33 % van de golfklappen.

Voor de grootschalige proeven zijn slechts twee fysisch zinnige waarden gevonden voor $\theta_{k50\%-80\%k}$, te weten met een gradiënt van 70° en 75° .

In Figuur C.57 staat $\theta_{k50\%-80\%k}$ uitgezet tegen de golfsteilheid. De getrokken lijn wordt gegeven door (graden als dimensie):

$$\begin{cases} \theta_{k50\%-80\%k} = 89^\circ - 0,286 \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha}; & \text{als } 7 \leq \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} < 14 \\ \theta_{k50\%-80\%k} = -3,33^\circ \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} + 132^\circ; & \text{als } 14 \leq \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} < 17 \end{cases} \quad (5.23)$$

Vergelijking tussen Figuur C.56 en Figuur C.57 leert dat de spreiding tussen de meetpunten minder is wanneer de gradiënten tegen de golfsteilheid worden uitgezet.

5.4.2 Golf front

Vlak voordat de golfklap op het talud terechtkomt, is er een steil golf front dat ook een belangrijke belasting op de steenzetting kan geven. De eigenschappen van het bijbehorende stijghoogte front, zoals helling en hoogte, zijn in deze paragraaf nader belicht. De belasting tijdens het steile stijghoogte front kan voor relatief dichte steenzettingen op een open filter belangrijker zijn dan die tijdens de golfklap.

De hoogte van het golf front is weergegeven tegen de golfsteilheid in Figuur C.58. Door Coeveld en Klein Breteler (2003) is de volgende relatie vastgesteld:

$$\frac{\phi_{b2\%}}{H_s} = 0,5 + 0,12 \frac{\gamma_{\phi b} \xi_{op}}{\tan \alpha}; \quad \text{met als maximum: } \frac{\phi_{b2\%}}{H_s} \leq 2,5 \gamma_{\phi b} \quad (5.24)$$

Deze is in Figuur C.58 toegevoegd. Er is sprake van enige spreiding, zowel in de grootschalige, als de kleinschalige proeven. Uit Figuur C.58 blijkt dat de hoogte van het golf front weinig tot geen schaaleffecten vertoont. Dit betekent dat de standaard Froude-schaling, in dit geval schaling met H_s , voldoet. Dit impliceert dat schaaleffecten voor het

golffront minder relevant zijn. Dit is ook wel te verwachten, omdat in golffronten niet veel luchtbellens aanwezig zijn.

In Figuur C.59 is de minimale stijghoogte op het talud tijdens het optreden van het golffront (diepte van het golffront in de trog, ϕ_{\min}) weergegeven als functie van de brekerparameter. In Figuur C.59 is Formule 2.11 uit De Waal *et al.* (1995) in Figuur C.59 toegevoegd:

$$\frac{\phi_{\min 2\%}}{H_s} = -0,16\gamma_{\phi_{\min}} \left(\frac{\xi_{op}}{\sqrt{\tan \alpha}} \right)^{1,25}; \text{ met als minimum: } \frac{\phi_{\min 2\%}}{H_s} \geq \frac{2,5\gamma_{\phi_{\min}}}{1 + 0,9 / \sqrt{\xi_{op}}} \quad (5.25)$$

waarbij de factor $\gamma_{\phi_{\min}}$ gelijk aan 1 is gekozen, net als in Klein Breteler en Coeveld (2004). Ook hier is te zien dat de schaaffecten meestal klein zijn.

Voor $\xi_{op} > 4$ zijn er twee grootschalige modelproeven (proeven 15 en 16) gevonden die beduidend minder diep zijn dan de kleinschalige proeven en dan volgens (5.25). Of dit te wijten aan toeval of aan een nog onbekende fysische oorzaak is vooralsnog onbekend.

In Figuur C.60 is de helling van het golffront weergegeven als functie van de golfsteilheid, in de vorm van $\xi_{op}/\tan \alpha$ ($= 1/\sqrt{s_{op}}$). Proef 10 vertoont een bijzondere afwijking, zowel wat betreft de maximale waarde als de waarde met een overschrijdingsfrequentie van 2 %. Dit kan te maken hebben met het feit dat tijdens deze in golfproef de drukopnemers niet optimaal geïnstalleerd waren ten opzichte van de waterlijn. De overige waarden laten een vrij consequente afname zien met toenemende waarde van $\xi_{op}/\tan \alpha$.

In Figuur C.61 is de gediptheid (ϕ_{dip}) tijdens het golffront weergegeven als functie van de brekerparameter. De gediptheid is een maat voor het stijghoogteverschil over de toplaag. Het is hier bepaald met dezelfde middelingslengte (vergelijkbaar met de lek lengte) als bij de analyse van de golfklappen, hoewel dat eigenlijk niet helemaal terecht is. Door deze keuze is het mogelijk om de gediptheid tijdens golfklappen te vergelijken met die tijdens golffronten op een specifieke steenzetting (met relatief open toplaag). De golffronten zijn echter alleen maatgevend bij relatief dichte toplagen. De waarde van de gediptheid zou daardoor relevanter worden als een grotere middelingslengte gehanteerd zou worden. Omwille van de vergelijkbaarheid met golfklappen is hier toch gebruik gemaakt van dezelfde middelingslengte.

Voor de waarden met een overschrijdingsfrequentie van 2 % geldt dat de spreiding voor de kleinschalige proeven relatief klein is. Voor de grootschalige proeven is de spreiding echter groter dan bij de kleinschalige proeven. De waarden van $\phi_{dip 2\%}/H_s$ van de kleinschalige proeven nemen toe over de volle range van ξ_{op} , zoals ook beschreven in Klein Breteler en Coeveld (2004), Formule (4.20):

$$\begin{cases} \frac{\phi_{dip 2\%}}{H_s} = 0,22\xi_{op} - 0,12; & \text{voor } 1 \leq \xi_{op} < 2,5 \\ \frac{\phi_{dip 2\%}}{H_s} = 0,06\xi_{op} + 0,28; & \text{voor } 2,5 \leq \xi_{op} < 6 \end{cases} \quad (5.26)$$

Voor de grootschalige proeven is deze trend minder duidelijk waarneembaar. De gediptheid tijdens het golffront voor de grootschalige proeven lijkt eerder constant te blijven bij toenemende brekerparameter.

Het blijkt dat de gediptheid, en waarschijnlijk ook het stijghoogteverschil over de toplaag, tijdens het golffront toeneemt of constant blijft met toenemende waarde van ξ_{op} . Dit betekent dat relatief dichte steenzettingen bij toenemende waarde van ξ_{op} een steeds verder afnemende stabiliteit hebben. Dit is in goede overeenstemming met ANAMOS. Dat programma is vooral ontwikkeld voor relatief dichte steenzettingen en houdt vooral rekening met de belasting tijdens het golffront.

De gediptheid tijdens het golffront is beduidend kleiner dan die tijdens de golfklap, hetgeen te verwachten is gezien de relatief kleine middelingslengte (kleine lek lengte, relatief open toplaag).

5.4.3 Conclusies op basis van analyse van golfbelasting op talud

Op een vergelijkbare wijze als Klein Breteler en Coeveld (2004) zijn de drukken op het talud geanalyseerd. Daarbij is gekeken naar de eigenschappen van de golfklappen en die van de golffronten. In het huidige onderzoek konden de meetpunten uit het kleinschalig onderzoek aangevuld worden met een serie proeven uit het huidige grootschalige modelonderzoek.

De vergelijking van de grootschalige en kleinschalige proefresultaten hebben geleid tot de conclusie dat er schaalearde effecten zijn als uitsluitend de schaalregel van Froude gehanteerd wordt. De vermoedelijke reden van deze schaalearde effecten is waarschijnlijk te vinden in het feit dat de grootte van de luchtbellen in het kleinschalige onderzoek en grootschalige onderzoek ongeveer gelijk is en dus niet volgens Froude te schalen is. Naar verhouding zitten er daardoor in de Deltagoot veel meer kleine luchtbellen, die een relatief lange verblijftijd hebben, dan in de Scheldegoot. Gezien het feit dat de oppervlaktetension van het water ($\sigma_w \approx 0,073$ N/m) belangrijk is bij de vorming van de luchtbellen, is voorgesteld om de schaalregel uit te breiden met een term gebaseerd op het getal van Weber. De karakteristieke parameters van het brekerproces en van de golfklap kunnen als volgt dimensieloos gemaakt worden (voorbeelden):

$$\frac{\phi_k}{H_s} \left(\frac{\rho g H_s^2}{\sigma_w} \right)^a \quad (5.27)$$

$$\frac{t_k}{\sqrt{H_s / g}} \left(\frac{\rho g H_s^2}{\sigma_w} \right)^a \quad (5.28)$$

De grootte van de correctie met het getal van Weber zal voor elk aspect van het brekerproces en van de golfklap verschillend zijn, hetgeen ingesteld kan worden met de grootte van de macht a . Als $a = 0$, dan blijft een zuivere schaling volgens Froude over, terwijl naarmate a groter wordt, er een groter aandeel van de Weber-schaling in komt.

Op deze manier konden de resultaten van de grootschalige en de kleinschalige proeven met elkaar vergeleken worden als het gaat om:

- de maximale druk ten opzichte van het talud (p_{\max}), met $a = 0,15$,
- de maximale stijghoogte ten opzichte van de trog (ϕ_k), met $a = 0,20$,
- de breedte van de golfklap ($B_{\text{klap}50\%}$), met $a = 0$,
- de gediptheid tijdens de golfklap (ϕ_{dip}), met $a = 0,15$, en
- de hoogte (ϕ_b), de helling en de minimale stijghoogte (ϕ_{min}) van het golffront, met $a = 0$.

Voor de tijdsgerelateerde parameters (zoals t_{stijg} en t_k) is er nog geen manier gevonden om de resultaten goed met elkaar te kunnen vergelijken. Wellicht is de manier waarop deze aspecten in de golfbelasting-analyse-software geprogrammeerd zijn (nog) niet optimaal.

De resultaten van het grootschalig onderzoek geven een bevestiging van de resultaten van het kleinschalig onderzoek: bij een toenemende waarde van ξ_{op} neemt de grootte van de golfklap af en neemt ook het stijghoogteverschil over de toplaag af. Dit betekent dat de stabiliteit toeneemt bij toenemende waarde van ξ_{op} , mits $\xi_{\text{op}} > 2$ à 3. De trend in de geïntegreerde gediptheid is sterk vergelijkbaar met die van het gemeten stijghoogteverschil over de toplaag.

6 Conclusies

Op basis van de resultaten van het grootschalige modelonderzoek in de Deltagoot met een steenzetting van Hydroblokken is vastgesteld dat de stabiliteit van relatief open steenzettingen toeneemt met toenemende waarde van de brekerparameter ξ_{op} . De steenzetting in de Deltagoot had de volgende eigenschappen:

- taludhelling: 1:3,5
- toplaagdikte: $D = 0,15$ m
- soortelijke massa van de blokken: $\rho_b = 1952$ kg/m³
- inwasmateriaal: 4 – 40 mm ($D_{15} = 7,5$ mm)
- filterlaagdikte: $b = 0,10$ m
- korrelgrootte van het filter: 22 – 40 mm ($D_{15} = 22$ mm)

In de steenzetting waren 34 drukopnemers gemonteerd om de stijghoogte op het talud en in het filter in detail kunnen meten.

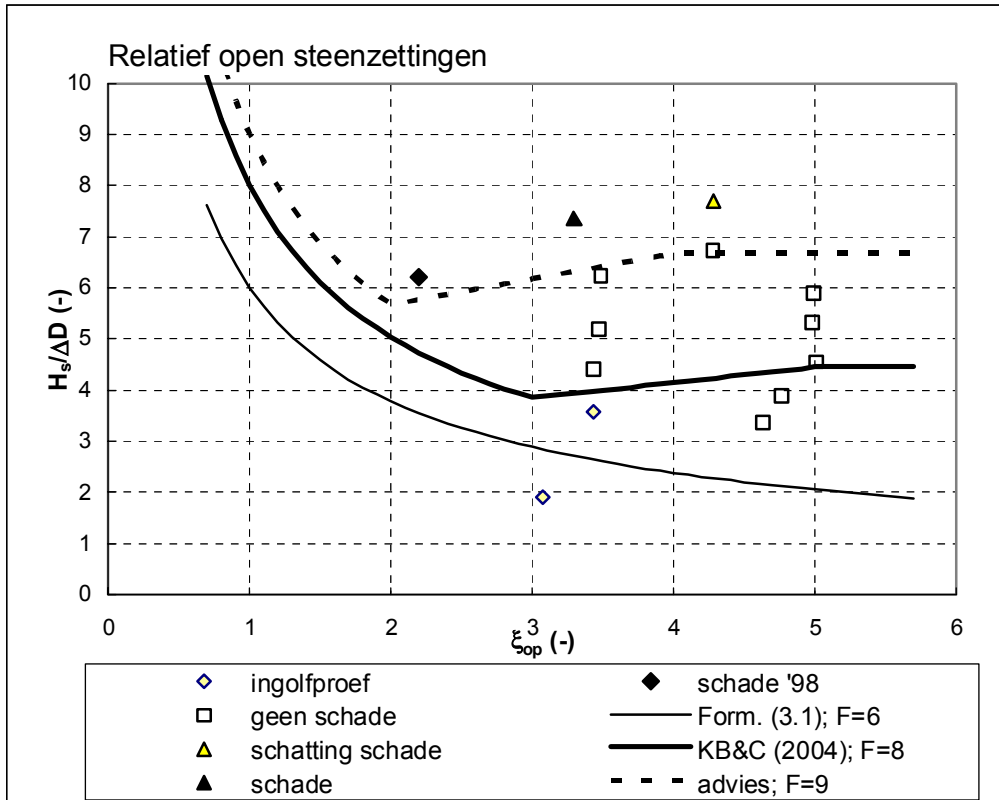
Stabiliteit

De proeven zijn uitgevoerd met $\xi_{op} \approx 3,5$, $\xi_{op} \approx 5$ en $\xi_{op} \approx 4,3$. In Figuur 6.1 is aangegeven welke proef schade heeft opgeleverd.

Op basis van de proefresultaten is de volgende aanbeveling opgesteld ten aanzien van de stabiliteit van open steenzettingen bij relatief lange golven:

- Als $\xi_{op} < 2$: ANAMOS op de gebruikelijke manier toepassen.
- Als $2 < \xi_{op} < 5$: met ANAMOS de maximaal toelaatbare waarde van $H_s/\Delta D$ berekenen bij $\xi_{op} = 2$ en vervolgens de maximaal toelaatbare $H_s/\Delta D$ berekenen met $H_s/\Delta D = [H_s/\Delta D]_{bij \xi=2} + 0,5 \cdot (\xi_{op} - 2)$.
- Als $\xi_{op} > 5$: de stabiliteit is vooralsnog onbekend; een realistische schatting is wellicht een constante stabiliteit: $H_s/\Delta D = [H_s/\Delta D]_{bij \xi=2} + 1$.

Dit advies, bij een stabiliteitsfactor van $F = 9$, is ingetekend in Figuur 6.1 (met de dikke gestippelde lijn: “advies;F=9”). In de praktijk zal een veel conservatievere stabiliteitsfactor gebruikt worden, bijvoorbeeld $F = 6$, waardoor de stabiliteitslijn wat lager komt te liggen. Deze aanbeveling is slechts geldig voor de relatief open steenzettingen. Dit zijn steenzettingen met een toplaag met een porositeit van meer dan 5 %, bijvoorbeeld basalt, Basalton, Hydroblokken of blokken op hun kant met afstandhouders.



Figuur 6.1 Proefresultaten en stabiliteitslijnen

Stijghoogteverschil

De stijghoogtemetingen op de toplaag en in het filter hebben geleid tot de conclusie dat het dimensieloze stijghoogteverschil (met 2% overschrijdingsfrequentie: $\phi_{w2\%}/H_s$) sterk afneemt bij toenemende waarde van ξ_{op} . De waarde van $\phi_{w2\%}/H_s$ blijkt te halveren van $\xi_{op} \approx 3$ tot $\xi_{op} \approx 5$.

Het stijghoogteverschil bij begin van schade blijkt vrij groot te zijn. Er is pas bezwijken opgetreden bij $\phi_{w2\%}/\Delta D \approx 5$ à 6, terwijl bij de rechthoekige blokken die in 1997 en 1998 in de Deltagoot beproefd zijn (Lubbers en Klein Breteler, 2000) doorgaans waarden bij bezwijken van $\phi_{w2\%}/\Delta D \approx 1,5$ à 4 gemeten zijn. Deze relatief grote stijghoogteverschillen zijn waarschijnlijk veroorzaakt door een relatief grote klemming en een relatief kort durende belasting. Bij golven met $1,5 < \xi_{op} < 2$ duurt het stijghoogteverschil orde 2 à 3 maal langer dan bij golven met $3 < \xi_{op} < 5$.

Golfklappen en golffronten

Op een vergelijkbare wijze als Klein Breteler en Coeveld (2004) zijn de drukken op het talud geanalyseerd. Daarbij is gekeken naar de eigenschappen van de golfklappen en die van de golffronten. In het huidige onderzoek konden de meetpunten uit het kleinschalig onderzoek aangevuld worden met een serie proeven uit het huidige grootschalige modelonderzoek.

De vergelijking van de grootschalige en kleinschalige proefresultaten hebben geleid tot de conclusie dat er schaaleffecten zijn als uitsluitend de schaalregel van Froude gehanteerd wordt. De vermoedelijke reden van deze schaaleffecten is waarschijnlijk te vinden in de invloed van luchtbellen. Gezien het feit dat de oppervlaktespanning van het water ($\sigma_w \approx 0,073 \text{ N/m}$) belangrijk is bij de vorming van de luchtbellen, is voorgesteld om de schaalregel uit te breiden met een term gebaseerd op het getal van Weber. De karakteristieke parameters van het brekerproces en van de golfklap kunnen als volgt dimensieloos gemaakt worden (voorbeelden):

$$\frac{\phi_k}{H_s} \left(\frac{\rho g H_s^2}{\sigma_w} \right)^a \quad (5.29)$$

$$\frac{t_k}{\sqrt{H_s / g}} \left(\frac{\rho g H_s^2}{\sigma_w} \right)^a \quad (5.30)$$

De grootte van de correctie met het getal van Weber zal voor elk aspect van het brekerproces en van de golfklap verschillend zijn, hetgeen ingesteld kan worden met de grootte van de macht a . Als $a = 0$, dan blijft een zuivere schaling volgens Froude over, terwijl naarmate a groter wordt, er een groter aandeel van de Weber-schaling in komt.

Op deze manier konden de resultaten van de grootschalige en de kleinschalige proeven met elkaar vergeleken worden als het gaat om:

- de maximale druk ten opzichte van het talud (p_{\max}), met $a = 0,15$,
- de maximale stijghoogte ten opzichte van de trog (ϕ_k), met $a = 0,20$,
- de breedte van de golfklap ($B_{\text{klap}50\%}$), met $a = 0$,
- de gediptheid tijdens de golfklap (ϕ_{dip}), met $a = 0,15$, en
- de hoogte (ϕ_b), de helling en de minimale stijghoogte (ϕ_{min}) van het golffront, met $a = 0$.

Voor de tijdsgerelateerde parameters (zoals t_{stijg} en t_k) is er nog geen manier gevonden om de resultaten goed met elkaar te kunnen vergelijken. Wellicht is de manier waarop deze aspecten in de golfbelasting-analyse-software geprogrammeerd zijn (nog) niet optimaal.

De resultaten van het grootschalig onderzoek geven een bevestiging van de resultaten van het kleinschalig onderzoek: bij een toenemende waarde van ξ_{op} neemt de grootte van de golfklap af en neemt ook het stijghoogteverschil over de toplaag af. Dit betekent dat de stabiliteit toeneemt bij toenemende waarde van ξ_{op} , mits $\xi_{\text{op}} > 2$ à 3 . De trend in de geïntegreerde gediptheid is sterk vergelijkbaar met die van het gemeten stijghoogteverschil over de toplaag.

Literatuur

Coeveld (2003)

Inloed van golfklappen op stabiliteit: literatuurstudie
WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H4134, november 2003

Coeveld, E.M. en M. Klein Breteler (2004)

Kwantificering van golfbelasting op steenzettingen
Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen
WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H4419, september 2004

Colin, C. X. Riou en J. Fabre (2004)

Turbulence and shear-induced coalescence in gas-liquid pipe flows
5th International Conference on Multiphase flow

Doom, Th. van (1979)

Schaaleffekten bij golfklappen op een talud
WL | Delft Hydraulics, rapport nr. M1057 deel 1-tekst, augustus 1979

Ellingsen, K. en F. Risso (2001)

On the rise of an ellipsoidal bubble in water: oscillatory paths and liquid-induced velocity
Journal of Fluid Mechanics, Vol. 440, pp. 235 - 268

Eysink, W.D. en M. Klein Breteler (2003)

Deltagootonderzoek naar stabiliteit van basalt; Meetverslag Fase 1 en 2
WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H4327, december 2003

Howarth, M.W., N.W.H. Allsop, A.M. Vann, R.J. Jones en J.P. Davis (1996)

Scale effects of wave impact pressures on cob armour units
Proceedings of Coastal Engineering, Vol. 1, pp. 1075 - 1089

Kamp, A.M., A.K. Chesters, C. Colin en J. Fabre (2001)

Bubble coalescence in turbulent flows: A mechanistic model for turbulence-induced coalescence applied to microgravity bubbly pipe flow
International Journal of Multiphase Flow 27, pp. 1363 - 1396

Klein Breteler, M. en E.M. Coeveld (2004)

Inloed lange golven op stabiliteit van steenzettingen
Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen
WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H4421, september 2004

Kuiper, C., en B. Van Vossen (2003)

Golfdrukken op talud ten gevolge van lange golven
Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen
WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H4329, december 2003

Leeuwestein, W (1998)

Pit-Polygoonzuilen en Hydroblocks; Grootschalig modelonderzoek in Deltagoot
WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H3224, oktober 1998

Lubbers, C., en M. Klein Breteler (2000)

Grootschalig modelonderzoek naar stabiliteit van taludbekledingen: Samenvatting van
onderzoek in Deltagoot
WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H3272.77, november 2000

Peters D.J. (2002)

Gezette steenbekledingen onder golfaanval, mechanicastudie liggerwerking
Royal Haskoning, 9 december 2002

Risso, F en J. Fabre (1998)

Oscillations and breakup of a bubble immersed in a turbulent field
Journal of Fluid Mechanics, Vol. 372, pp. 323 - 355

Rudolph, D. en M. Klein Breteler (2004)

Analyse van de stabiliteit van basalt
WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H4422, oktober 2004

Wouters, J., 2003

Plan van aanpak invloed lange golfperiodes op stabiliteit
Deelplan 7.1 van het onderzoeksprogramma kennisleemtes steenbekledingen
Infram, verslag i 706, november 2003

Waal, J.P. de, M. Klein Breteler en H. den Adel (1995)

Taludbekledingen van gezette steen
Golfdruk op het talud
WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H195, december 1995

Bijlage A:

Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen

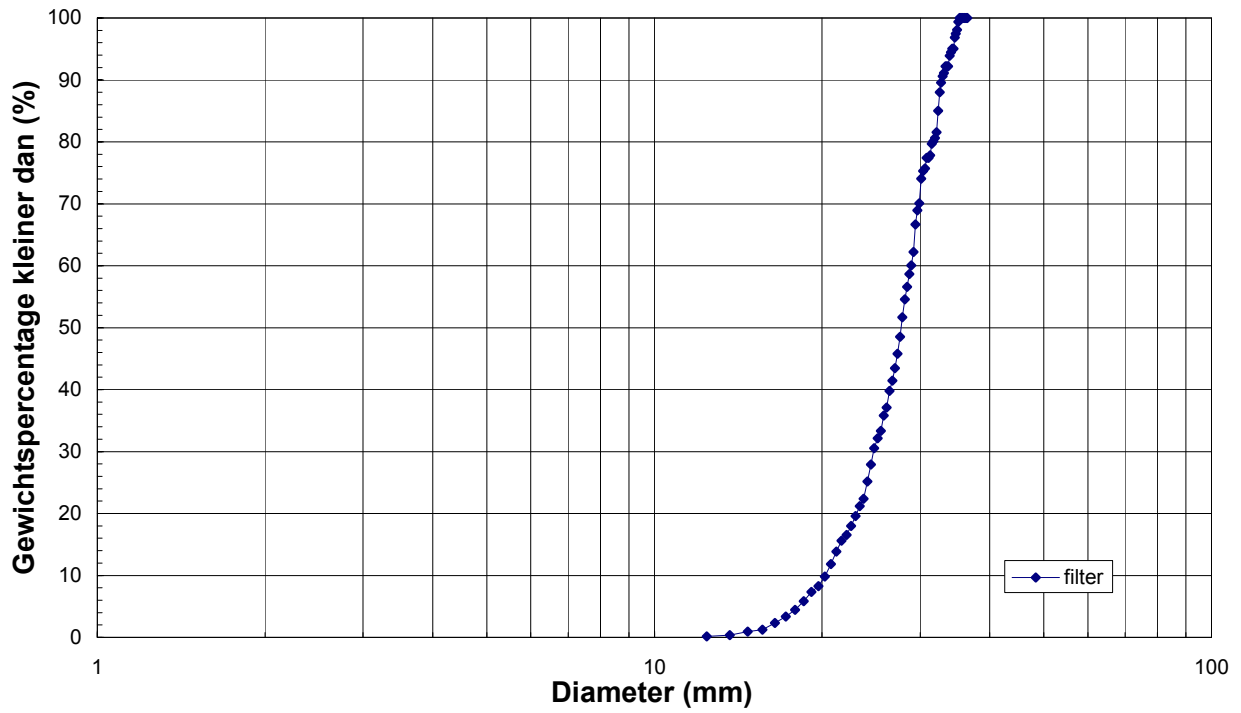
Bijlage B:
Tabellen

Proef	$\xi_{op} (-)$	$\xi_{op} / \tan \alpha (-)$	Aantal golven	Aantal golfklappen	Aantal golffronten
t301	2.52	7.56	979	595	912
t302	2.74	8.22	1032	553	967
t303	3.03	9.09	1037	525	980
t304	3.15	9.45	1091	466	1058
t305	3.35	10.05	1092	388	1050
t306	3.60	10.80	1109	372	1053
t307	3.81	11.43	1119	306	1087
t308	4.00	12.00	1125	334	1093
t309	4.34	13.02	1137	250	1088
t310	4.39	13.17	1138	245	1089
t311	4.81	14.43	1135	148	1081
t312	5.15	15.45	1125	123	1081
t313	5.51	16.53	1126	22	879
t314	6.19	18.57	1008	33	938
t315	7.04	21.12	1037	28	968
t401	2.42	9.68	1015	351	975
t402	2.66	10.64	1087	317	1027
t403	2.87	11.48	1091	275	1040
t404	3.11	12.44	1100	226	1070
t405	3.30	13.20	1082	184	1058
t406	3.64	14.56	1148	147	1109
t407	3.70	14.80	1169	131	1133
t408	4.04	16.16	1169	94	1115
t409	4.17	16.68	1202	80	1160
t410	4.57	18.28	1184	69	1137
t411	4.59	18.36	1182	43	1156
t412	5.80	23.20	1118	61	1080
t413	6.12	24.48	1098	9	1053
t414	6.56	26.24	1207	5	1168
t415	7.28	29.12	1020	7	943
t501	2.51	10.04	1191	429	983
t502	3.42	13.68	1557	498	1327
t503	2.40	9.60	1713	985	1555
P10	3.07	10.745	881	29	719
P11	4.63	16.205	1103	1	1080
P12	4.75	16.625	1153	1	1058
P13	5.00	17.500	1187	6	1098
P14	4.98	17.430	1285	25	1182
P15	4.99	17.465	1015	37	740
P16	4.28	14.980	958	45	903
P22	3.43	12.005	973	62	908
P23	3.44	12.040	1047	74	980
P24	3.47	12.145	937	59	900
P25	3.49	12.215	963	77	892
P26	3.30	11.550	437	53	408

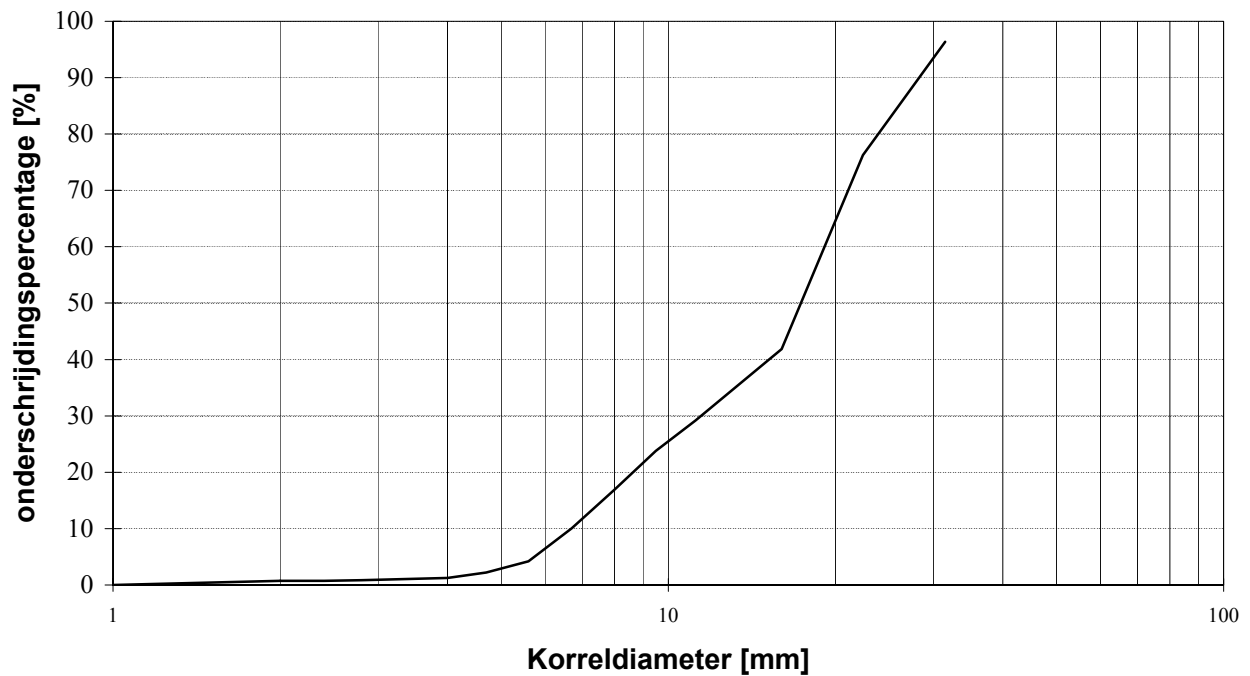
Tabel B.1 Gegevens per proef op basis van golfbelasting-analyse-software van Coeveld en Klein Breteler (2004).

Bijlage C:
Figuren

Zeefkromme van filter



Zeefkromme van inwasmateriaal



Zeefkromme van filter en inwasmateriaal



Bouw van de steenzetting met Hydroblocks, waarin een gele cylinder van polystyreen is aangebracht



Aanbrengen van de drukopnemers

Bouw van steenzetting

WL | Delft Hydraulics

H4421

Fig. C.3



Afwerking langs bovenrand

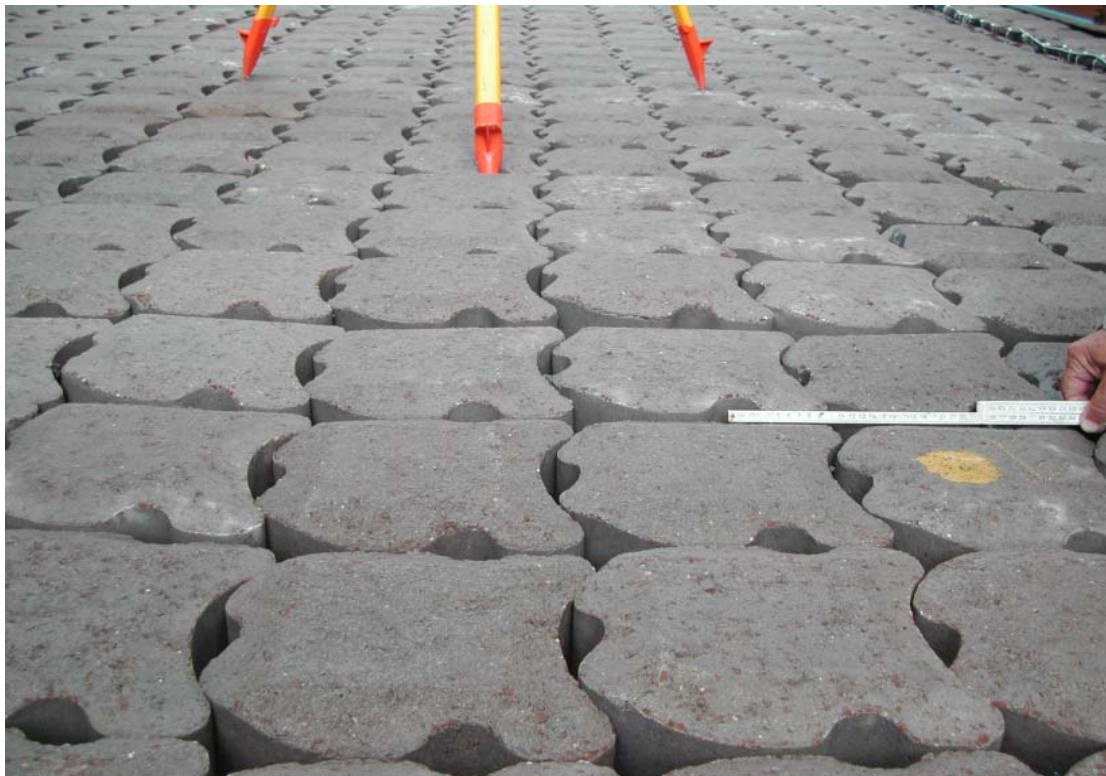


Overzicht van model na proef 12

Afwerking bovenrand en overzicht model na proef 12



Tijdens proef 14



Vervorming na proef 16

Foto tijdens proef 14 en vervorming na proef 16



Overzicht na proef 16



Overzicht voor proef 22

Overzicht van talud na proef 16 en voor 22



Tijdens proef 25

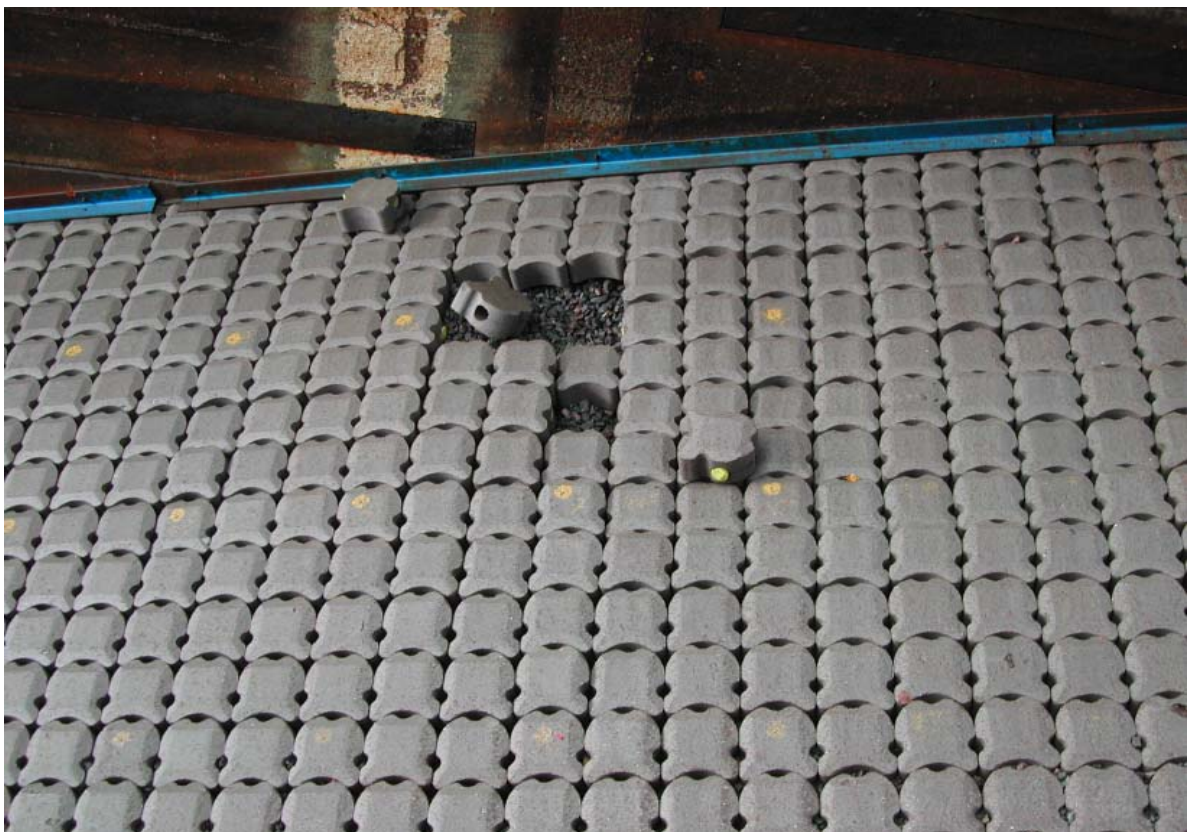
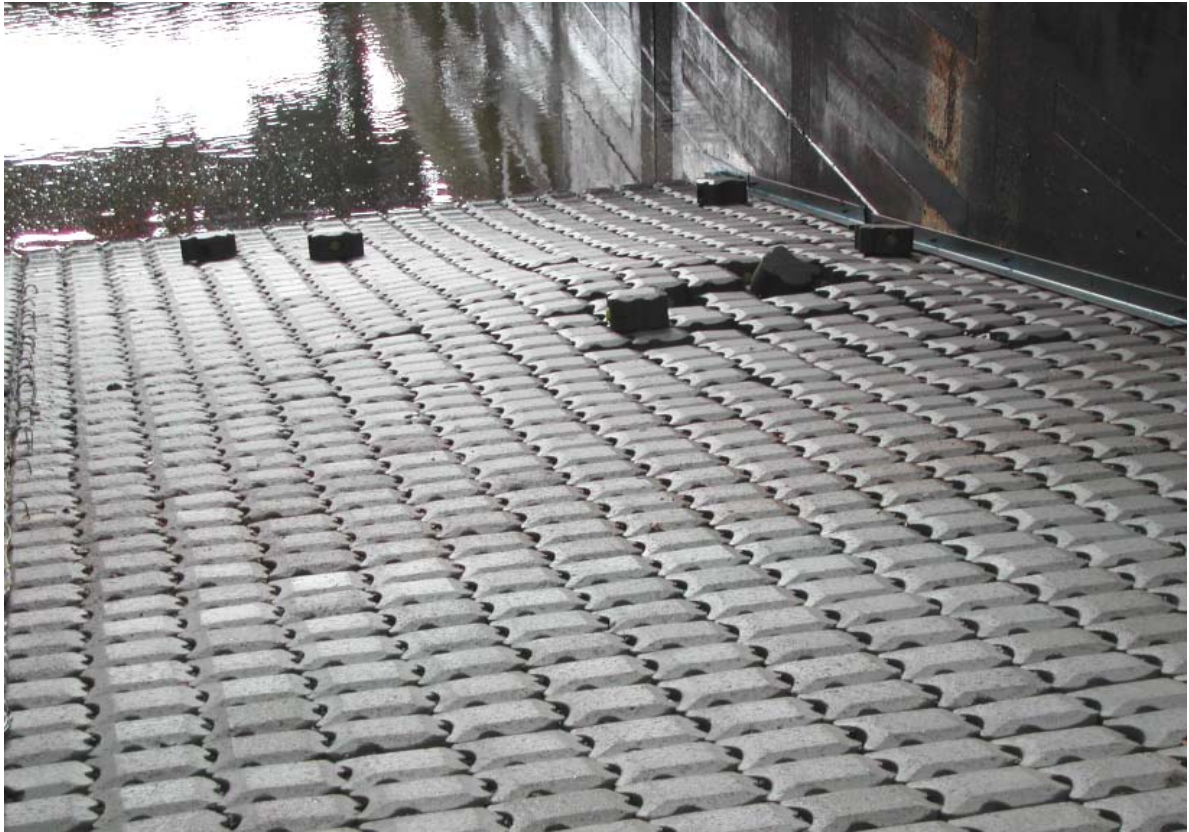


Overzicht na proef 25

Foto tijdens proef 25 en overzicht van talud na proef 25



Schade na proef 26 (1)



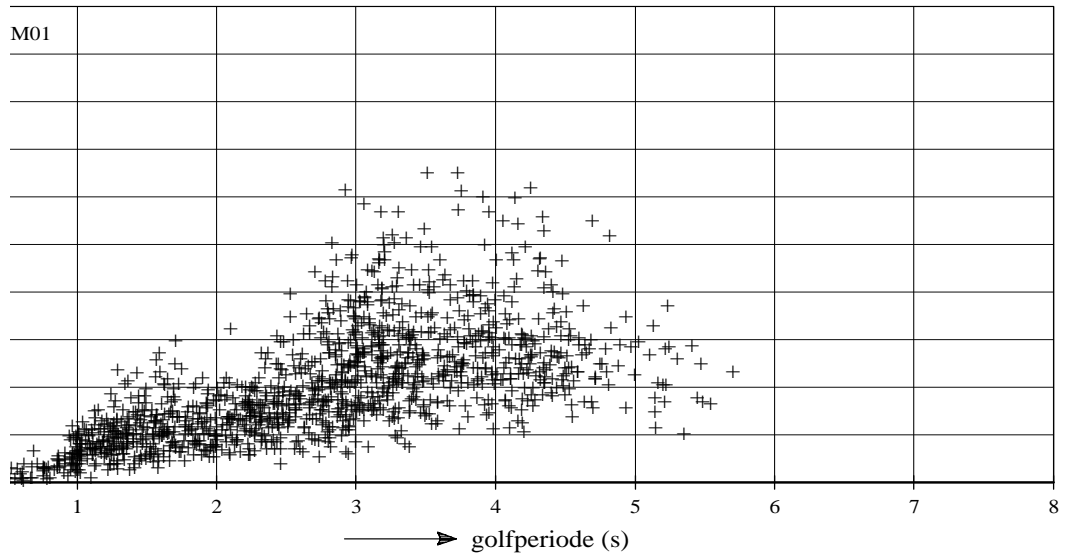
Schade na proef 26 (2)

WL | Delft Hydraulics

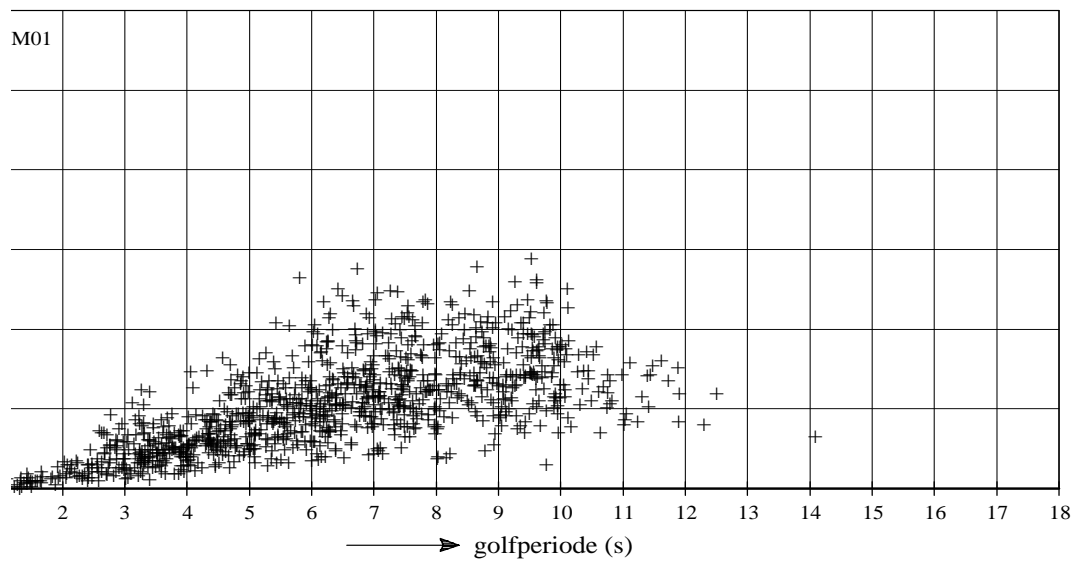
H4421

Fig. C.9

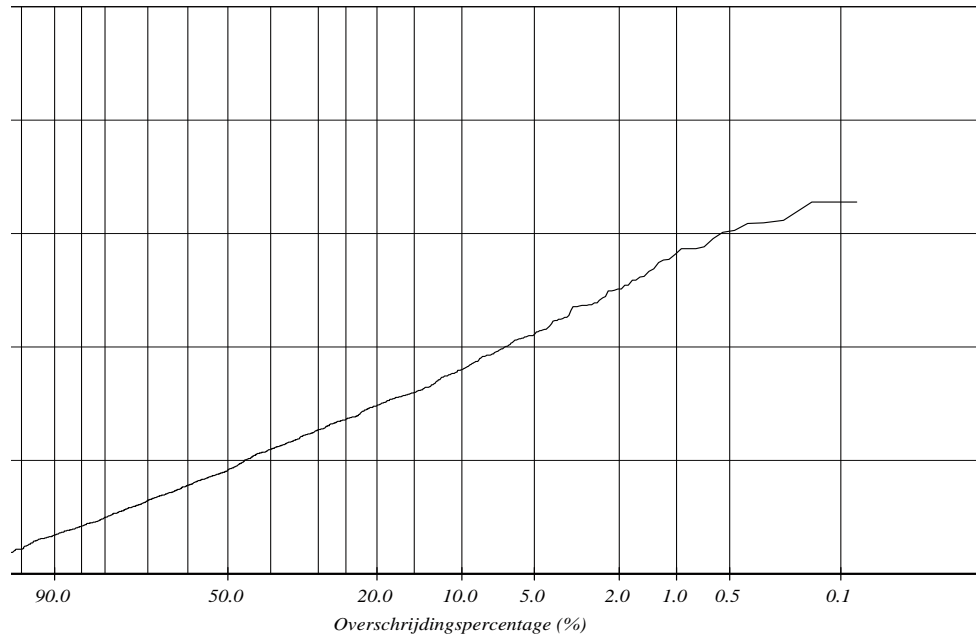
proef T308



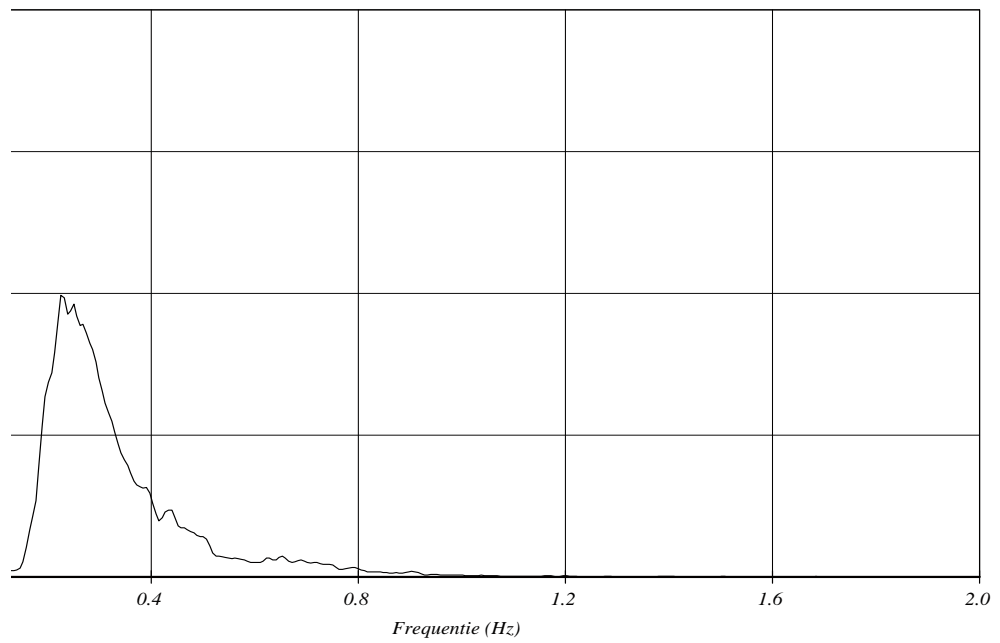
proef 25



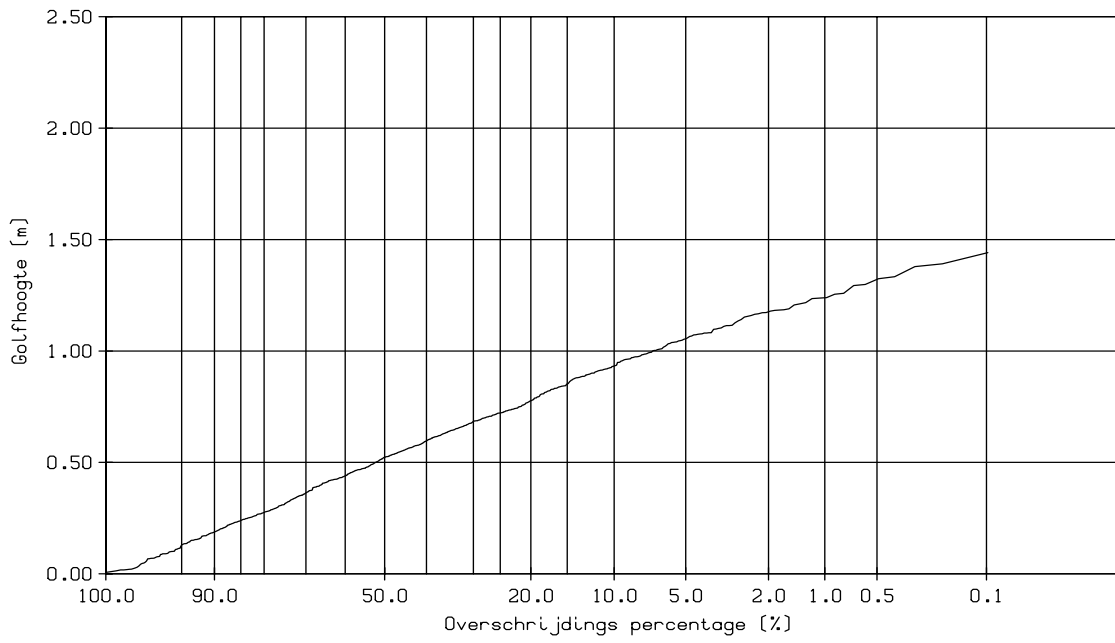
H-T correlatie (inkomend signaal) van
proef T308 (boven) en proef 25 (onder)



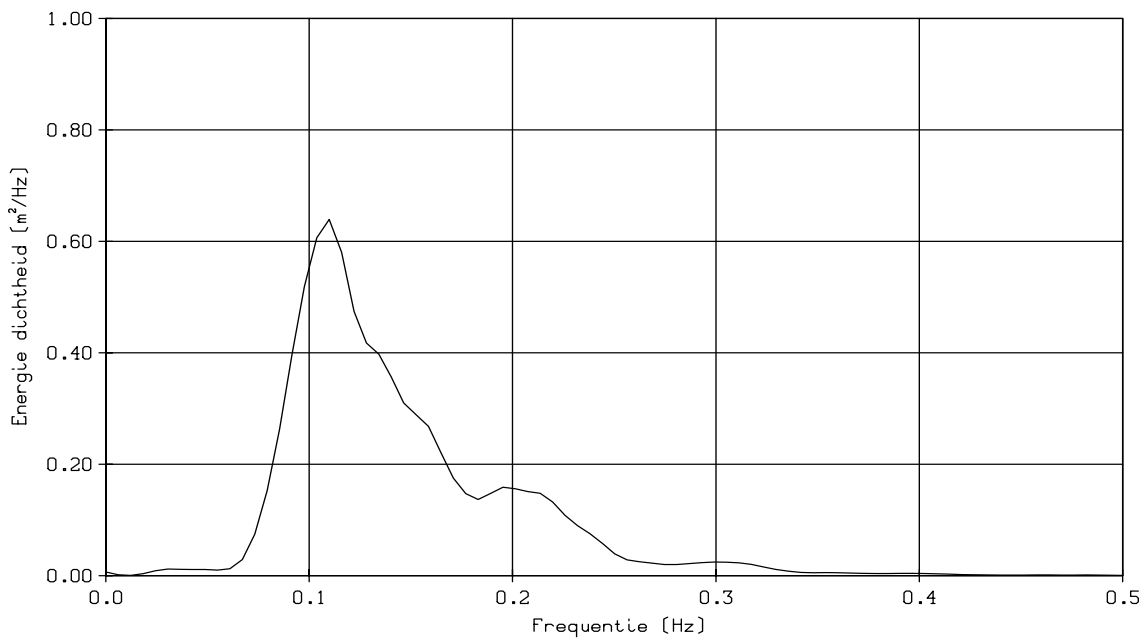
— Inkomend(Golfschot)



Overschrijdingskromme en energiedichtheidsspectrum
van inkomende golven van proef T308

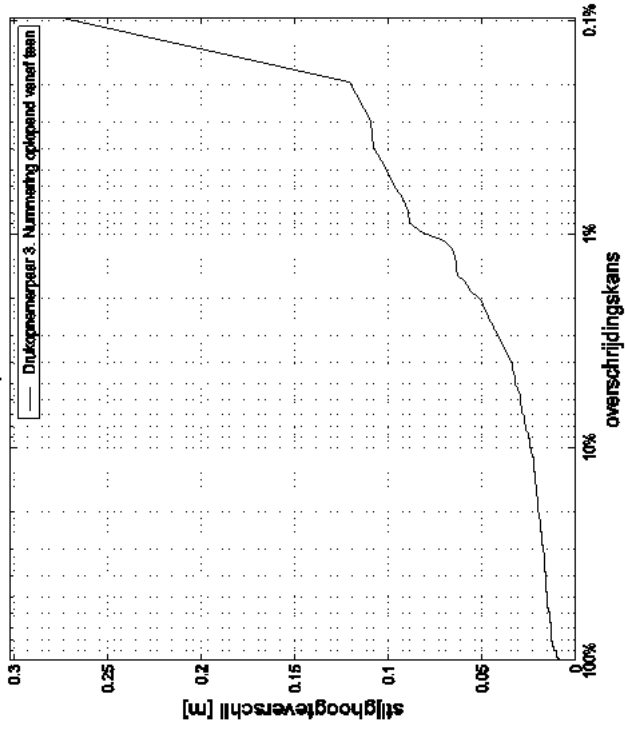


———— Inkomend(diep water)

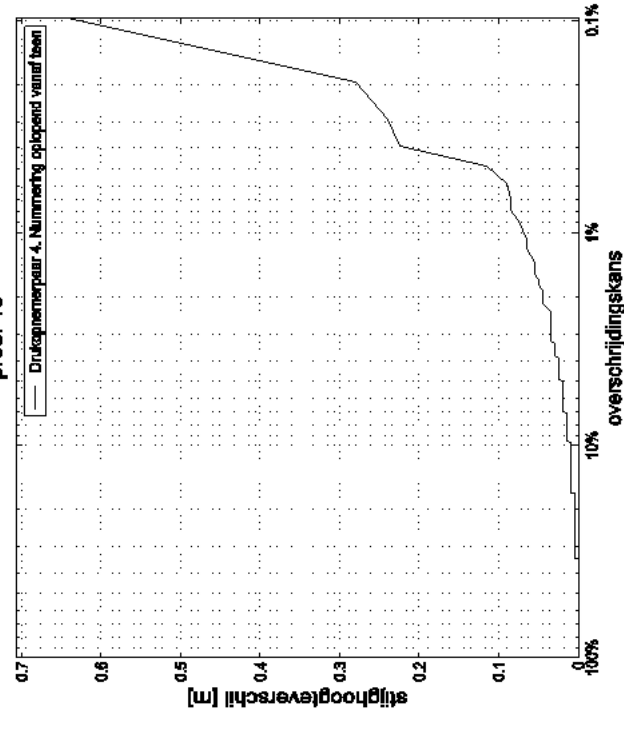


Overschrijdingskromme en energiedichtheidsspectrum van inkomende golven van proef 25

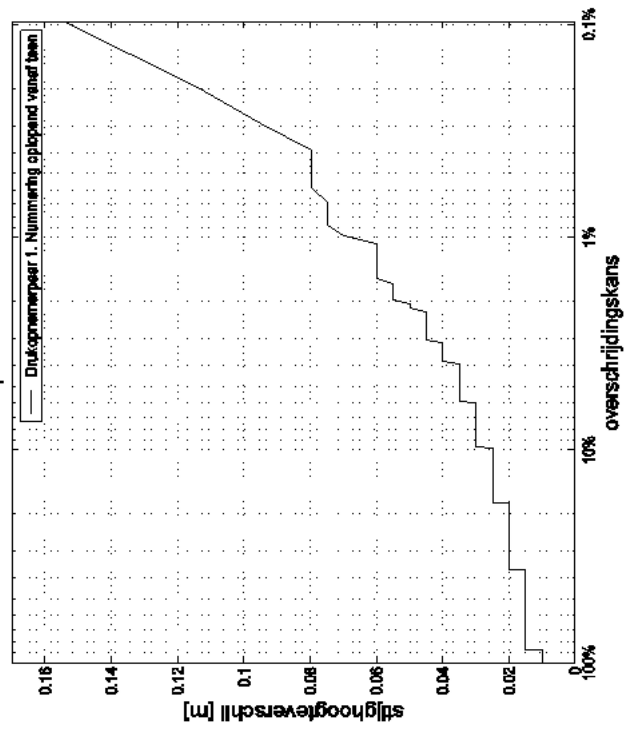
proef 15



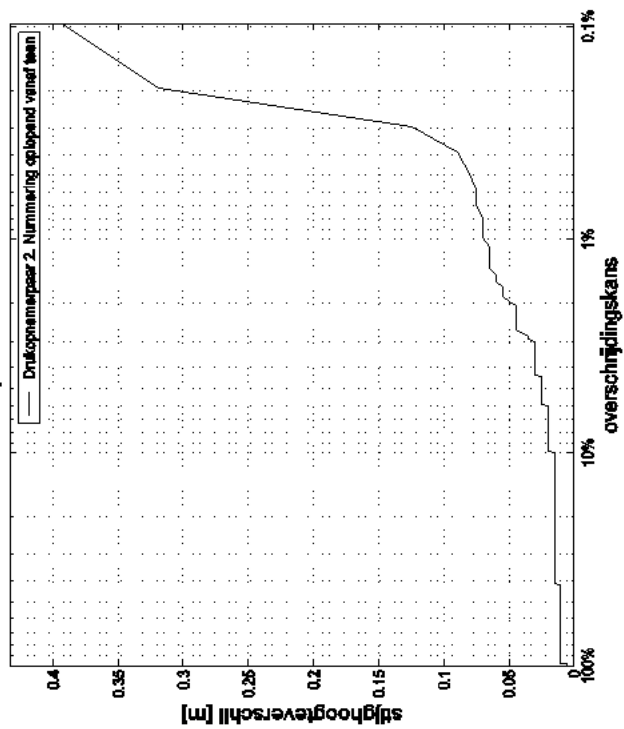
proef 15



proef 15

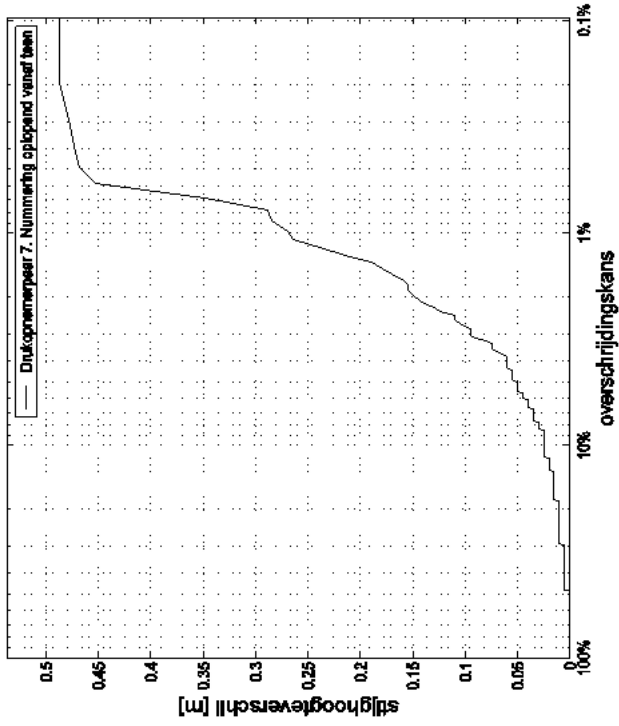


proef 15

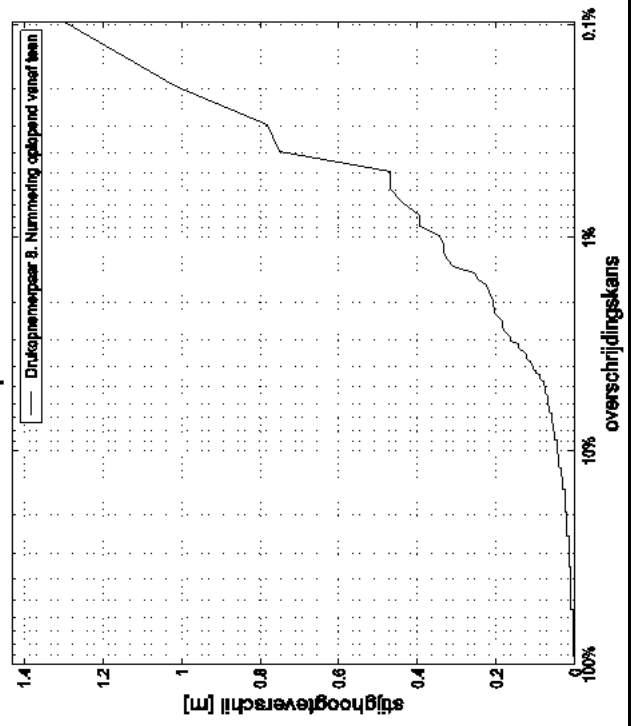


Overschrijdingskrommes van stijghoogteverschillen in drukopnemerpaar 1-4 in proef 15

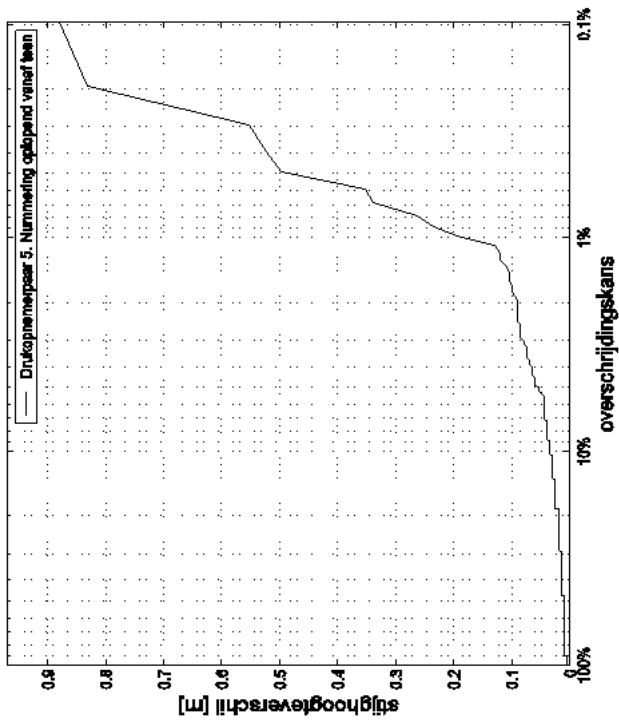
proef 15



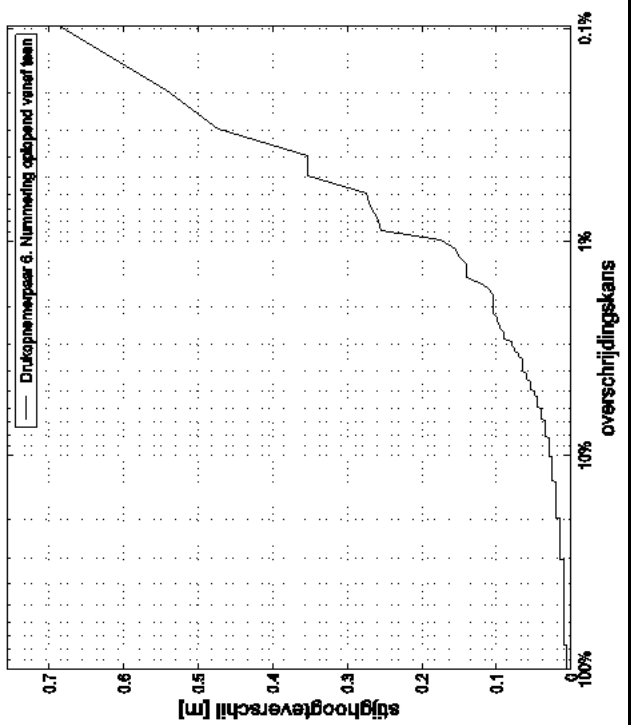
proef 15



proef 15

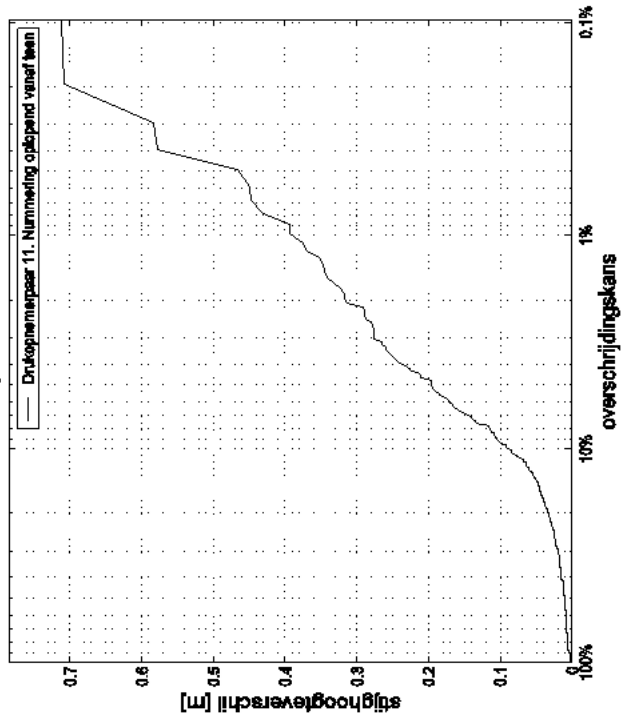


proef 15

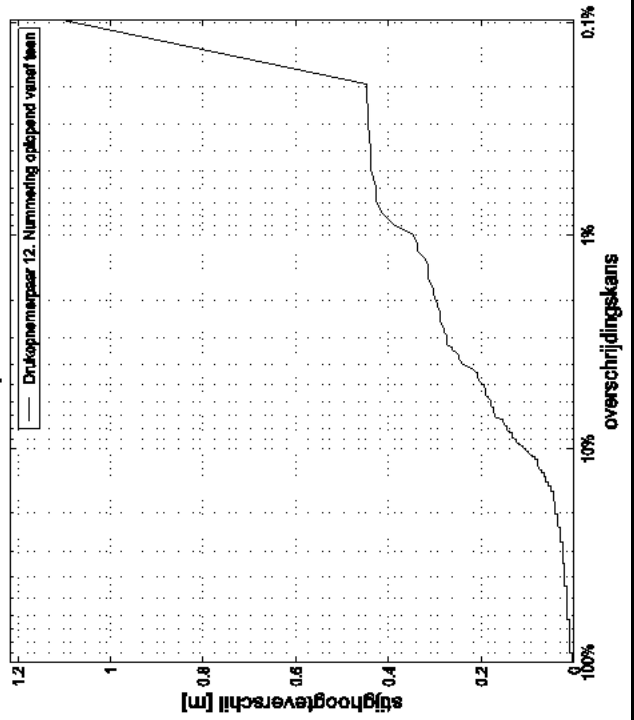


Overschrijdingskrommes van stijghoogteverschillen
in drukopnemerpaar 5-8 in proef 15

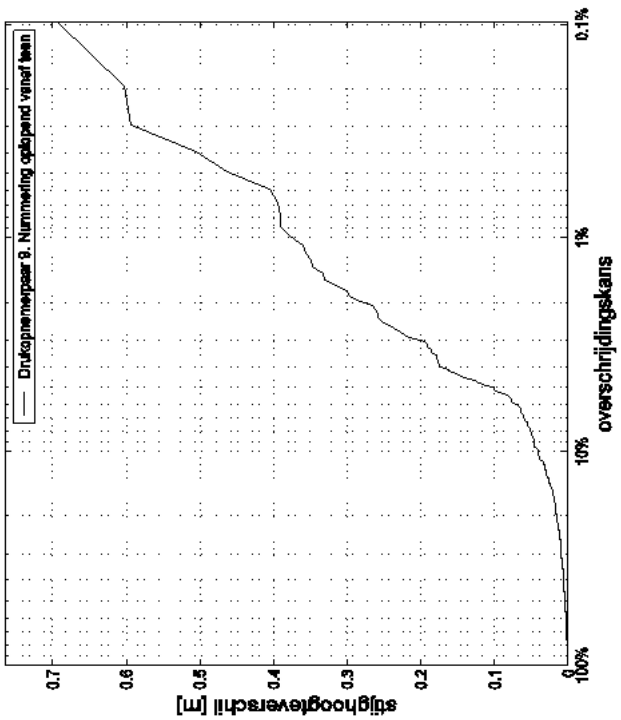
proef 15



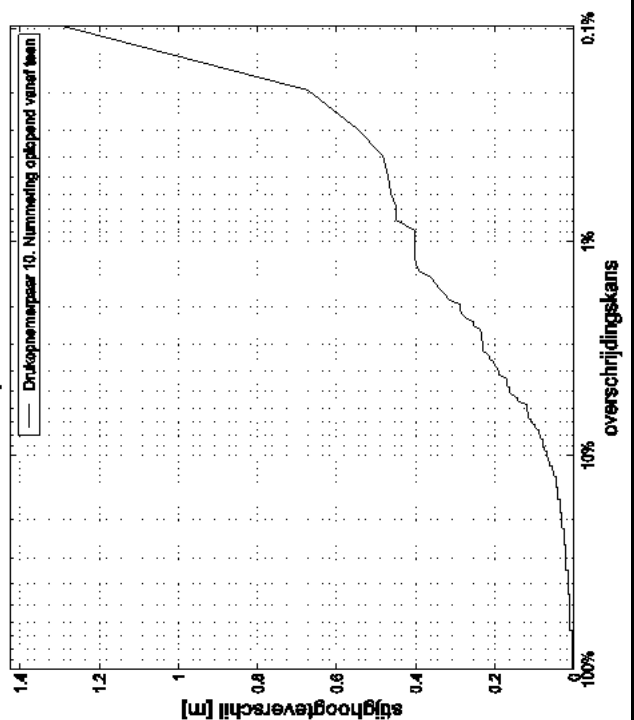
proef 15



proef 15

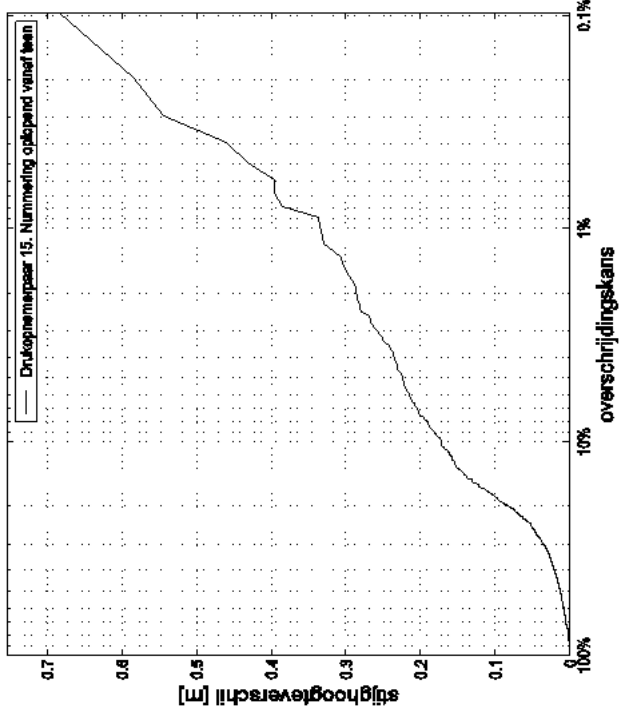


proef 15

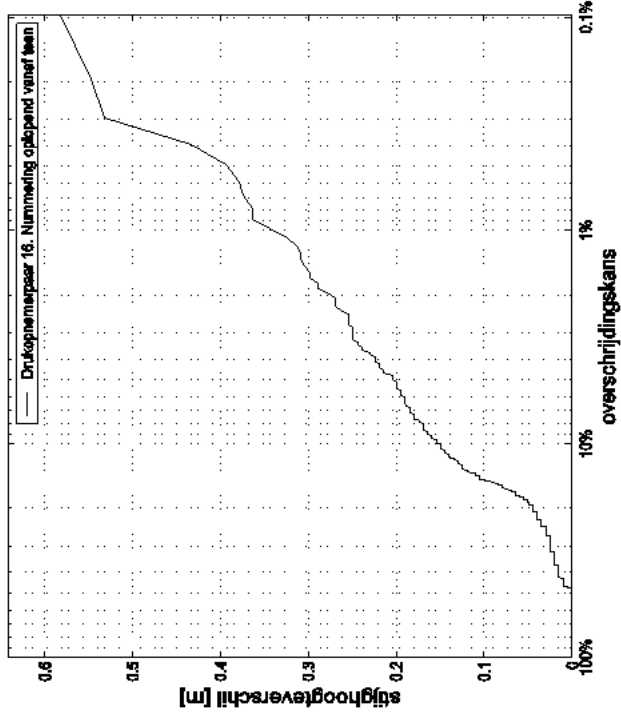


Overschrijdingskrommes van stijghoogteverschillen in drukopnemerpaar 9-12 in proef 15

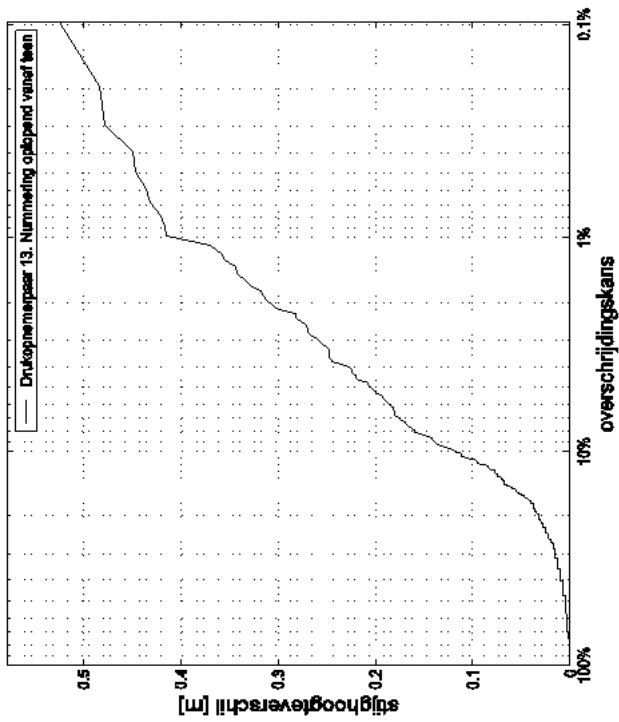
proef 15



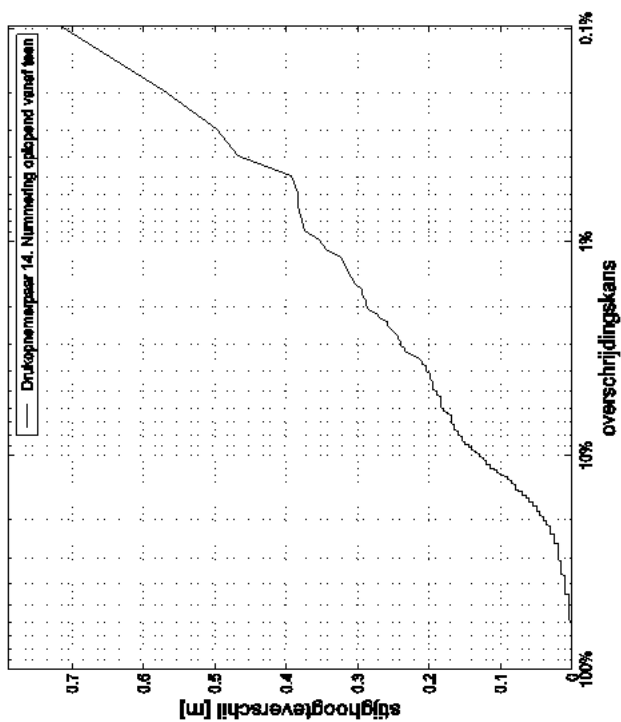
proef 15



proef 15

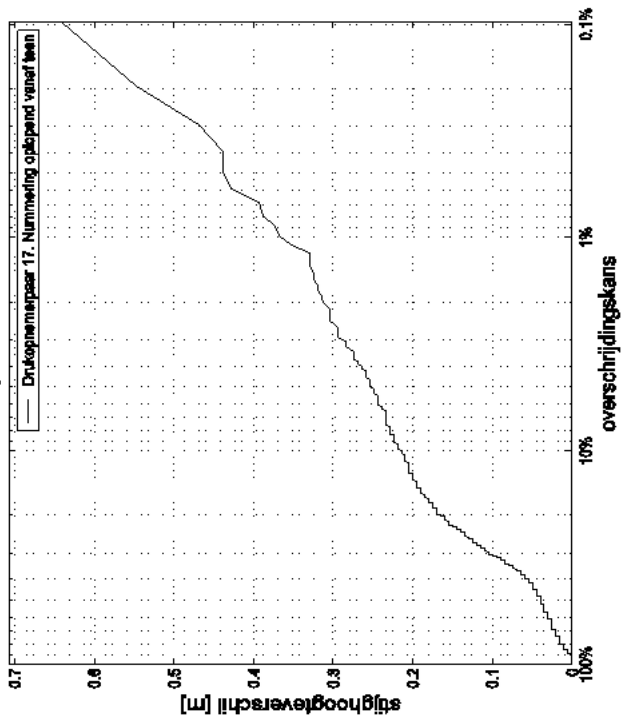


proef 15

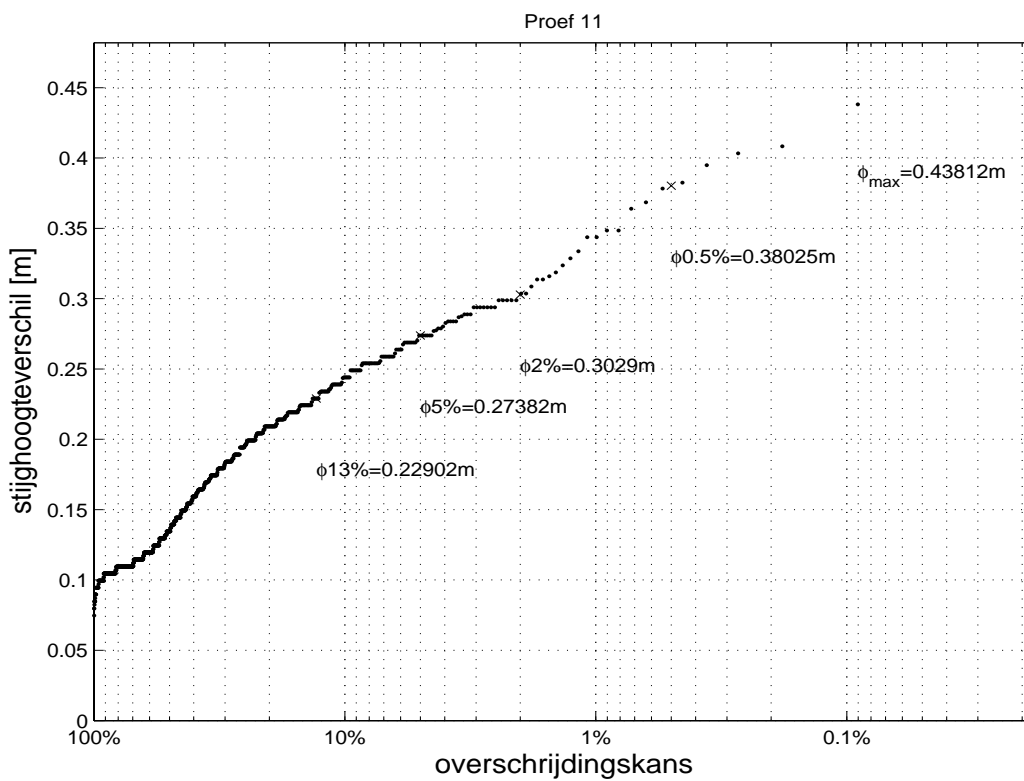
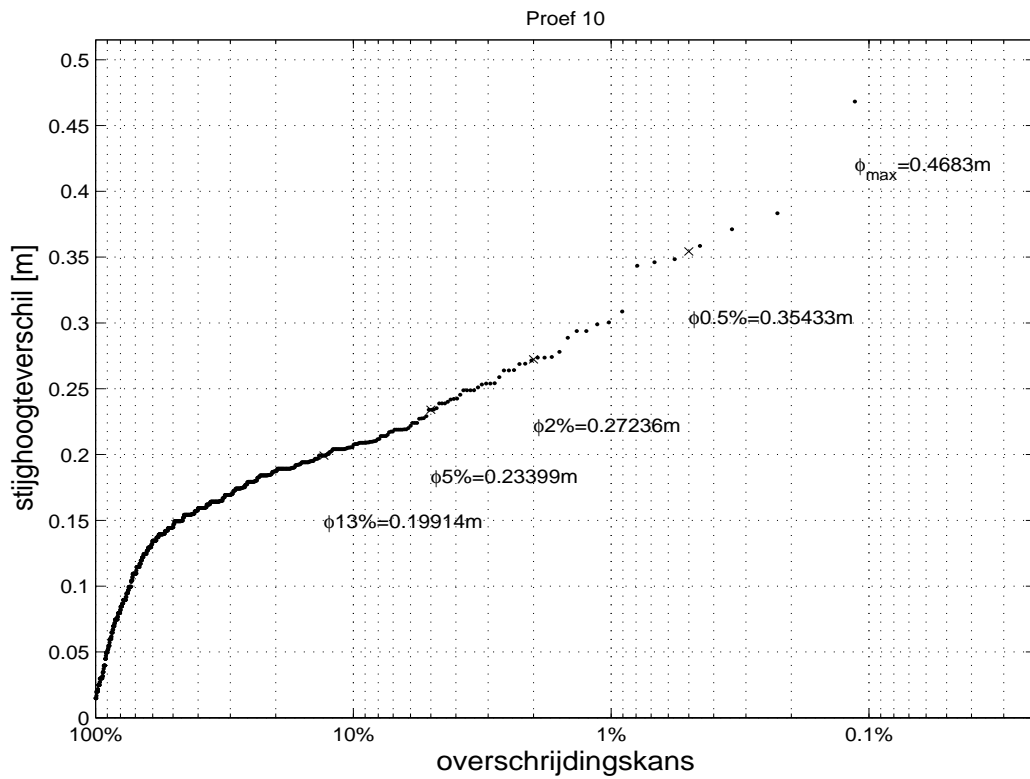


Overschrijdingskrommes van stijghoogteverschillen
in drukopnemerpaar 13-16 in proef 15

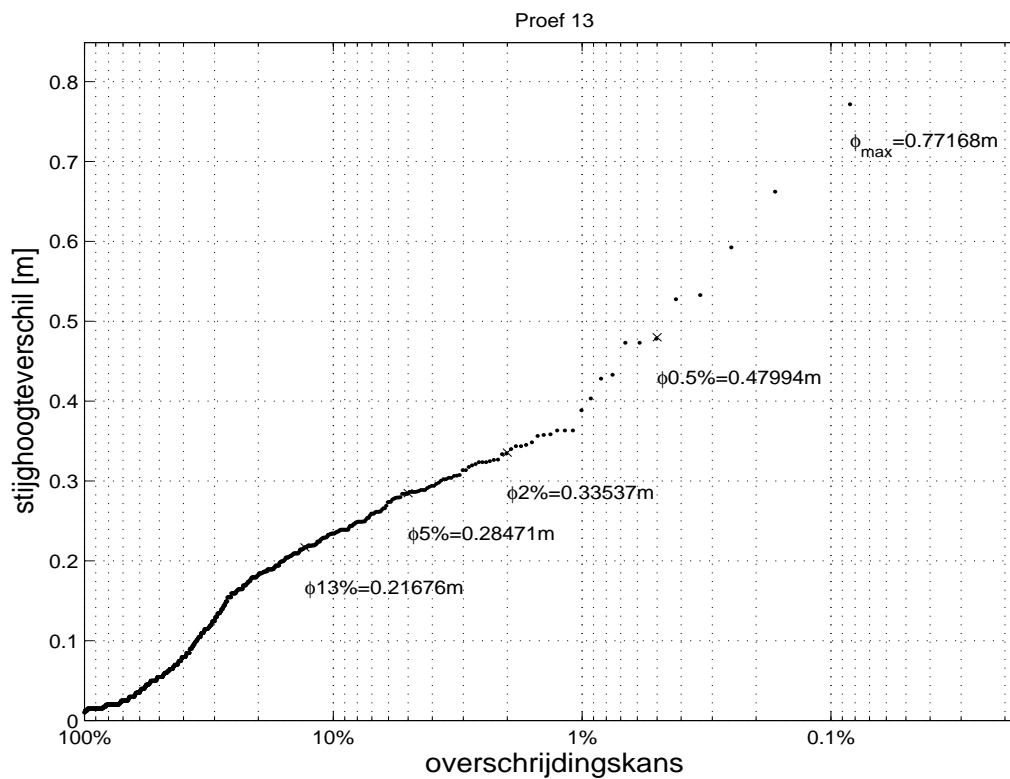
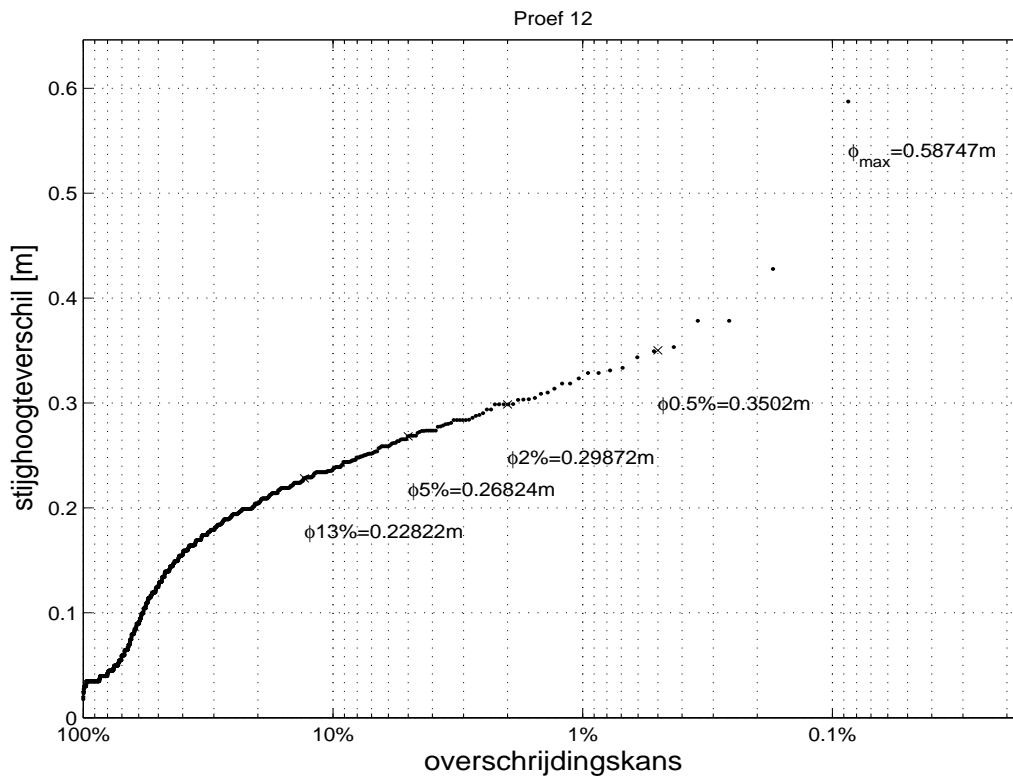
proef 15



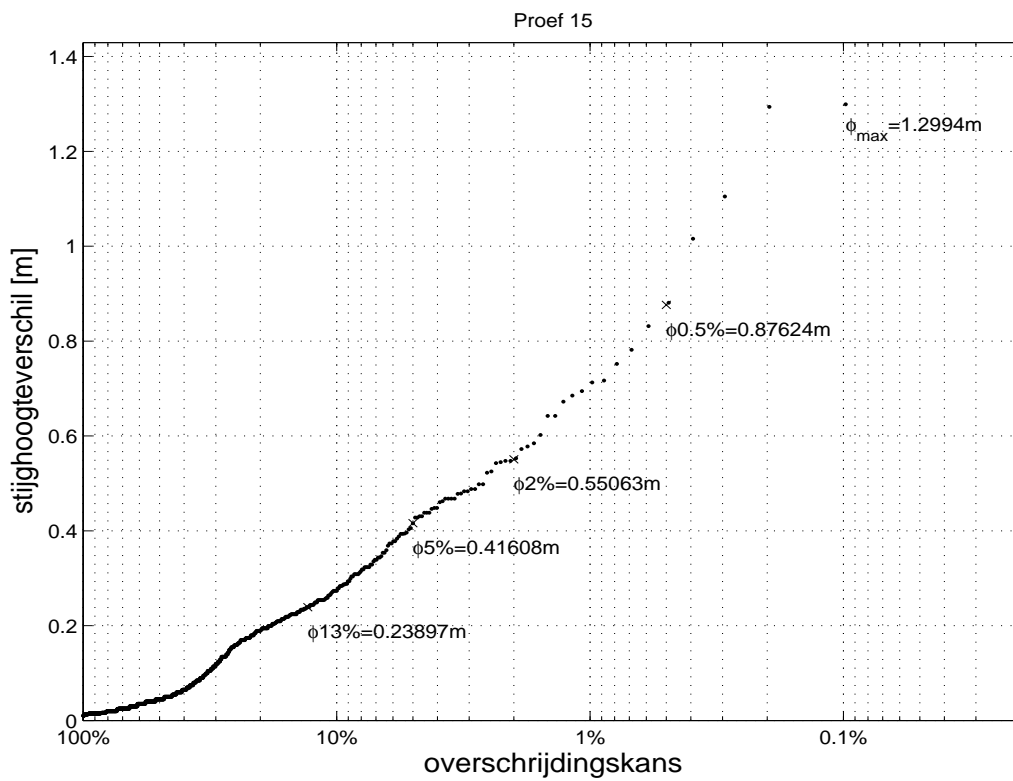
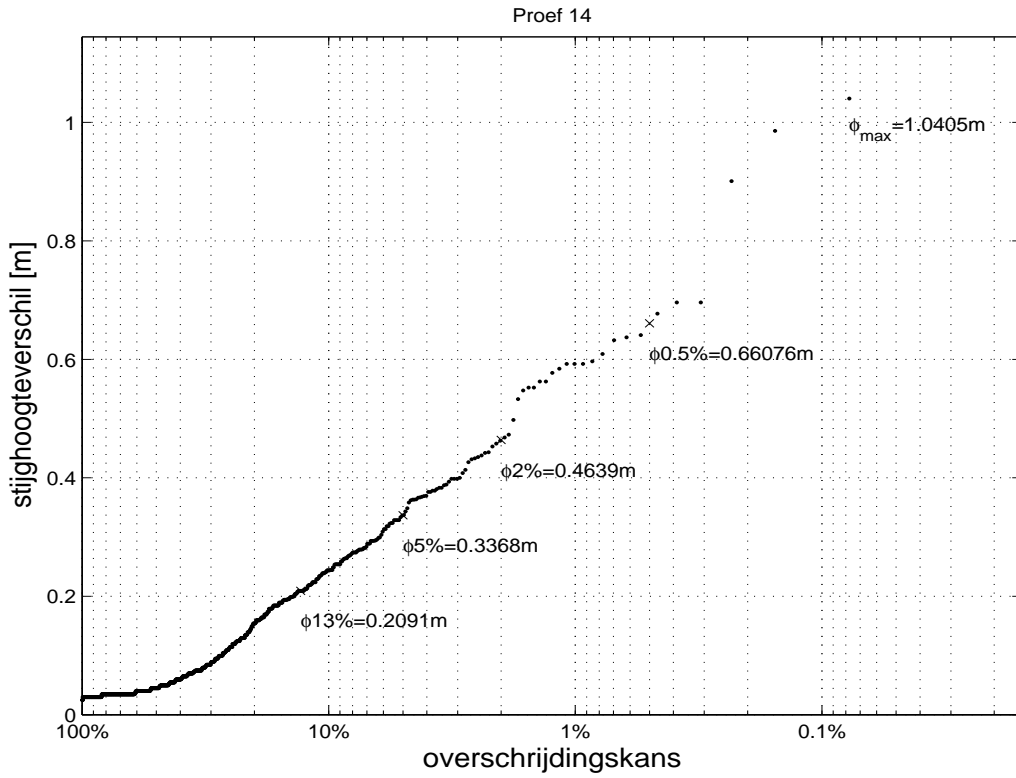
Overschrijdingskromme van stijghoogteverschillen
in drukopnemerpaar 17 in proef 15



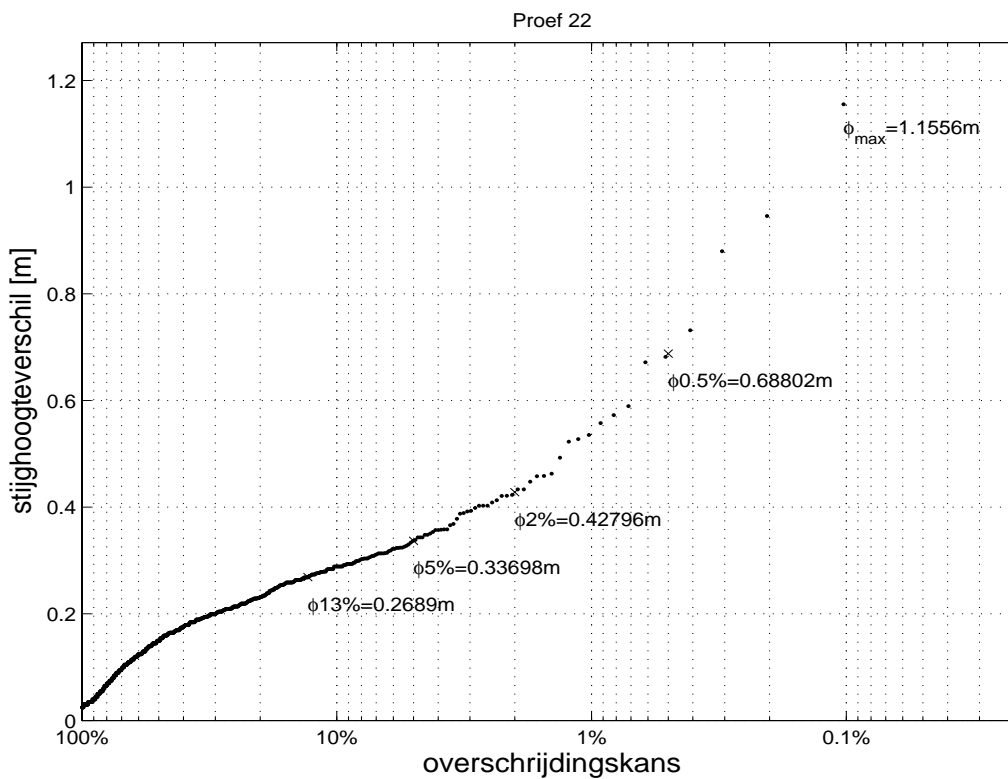
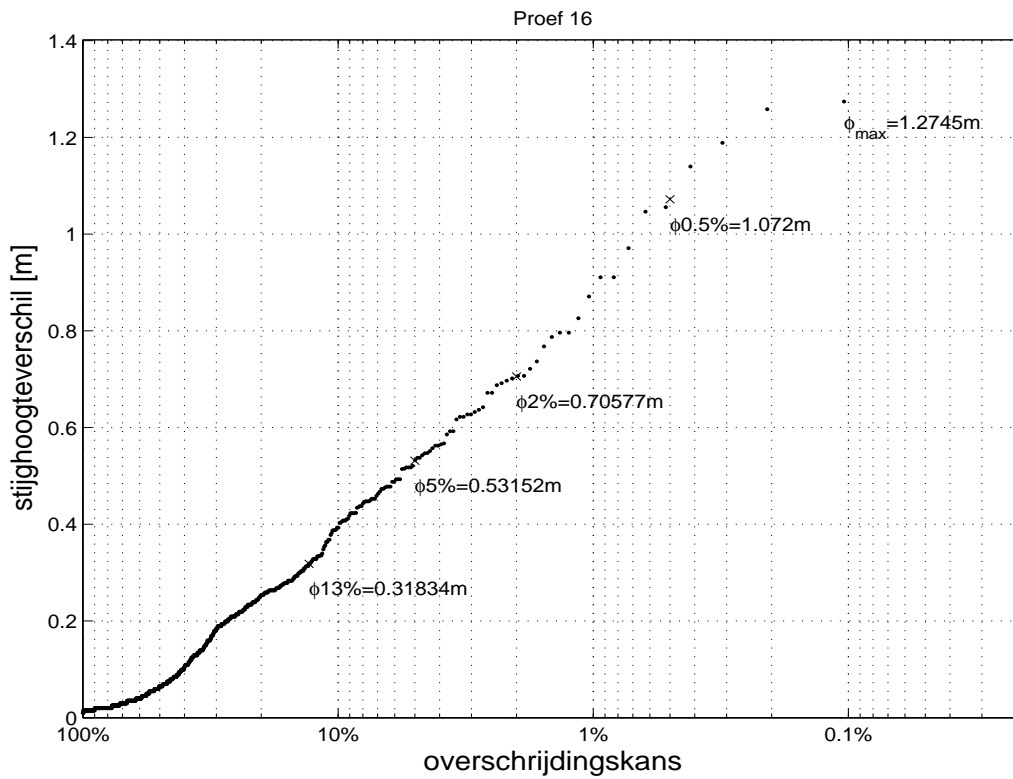
Overschrijdingskrommes van stijghoogteverschillen
in proef 10 en proef 11



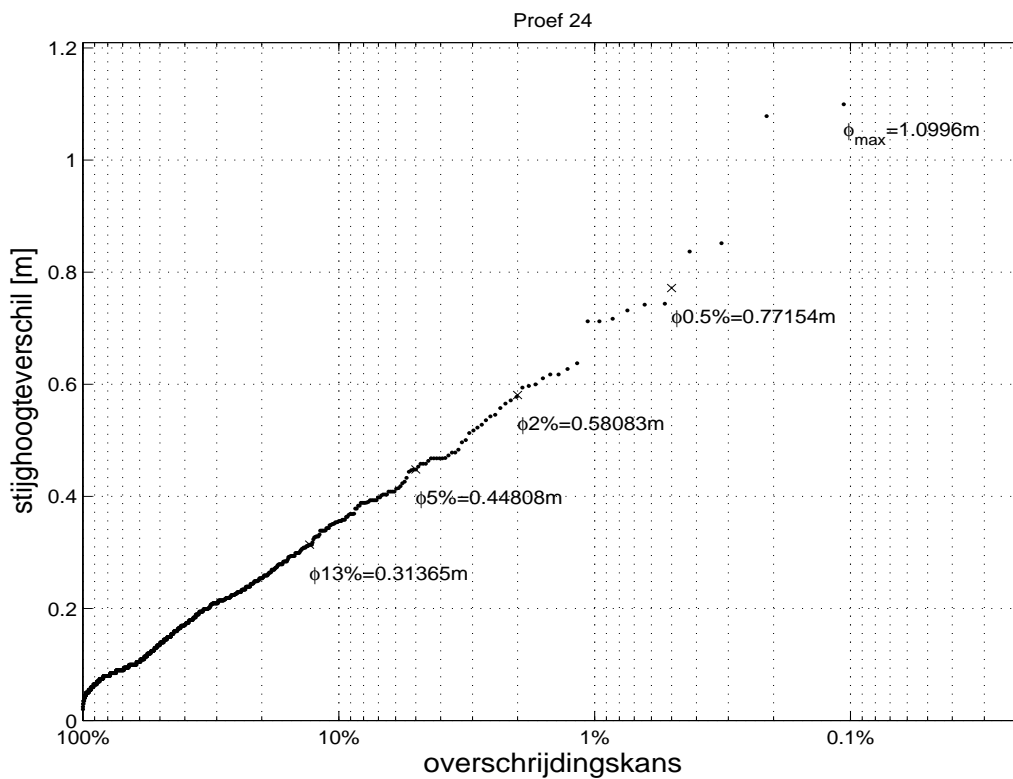
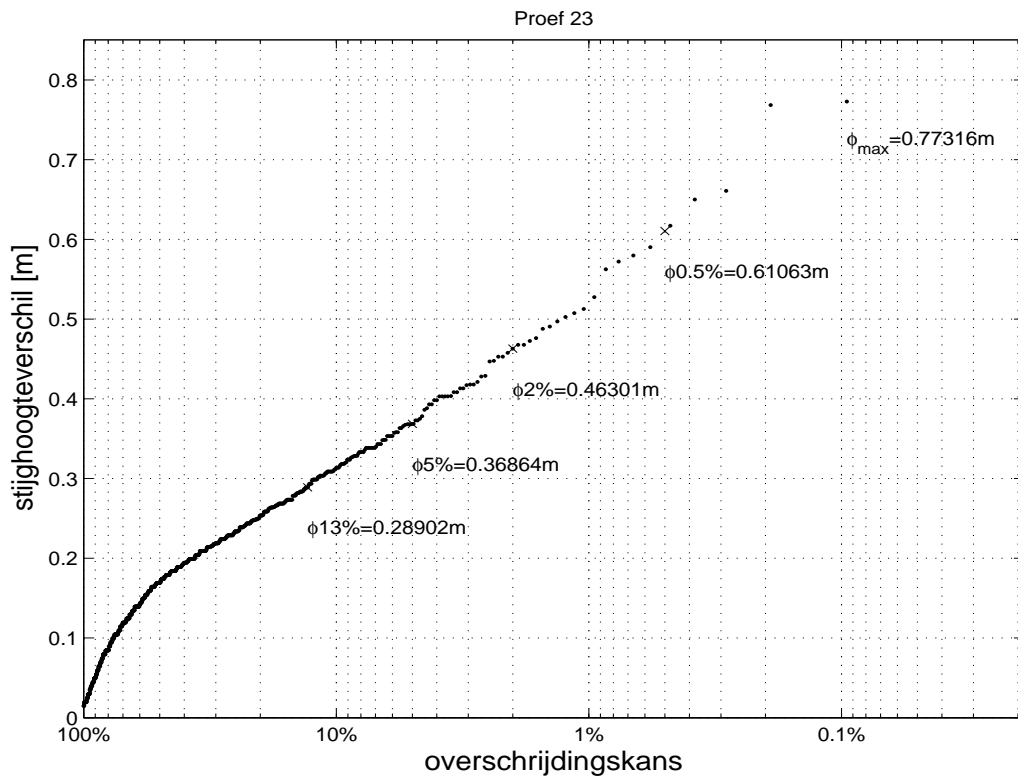
Overschrijdingskrommes van stijghoogteverschillen
in proef 12 en proef 13



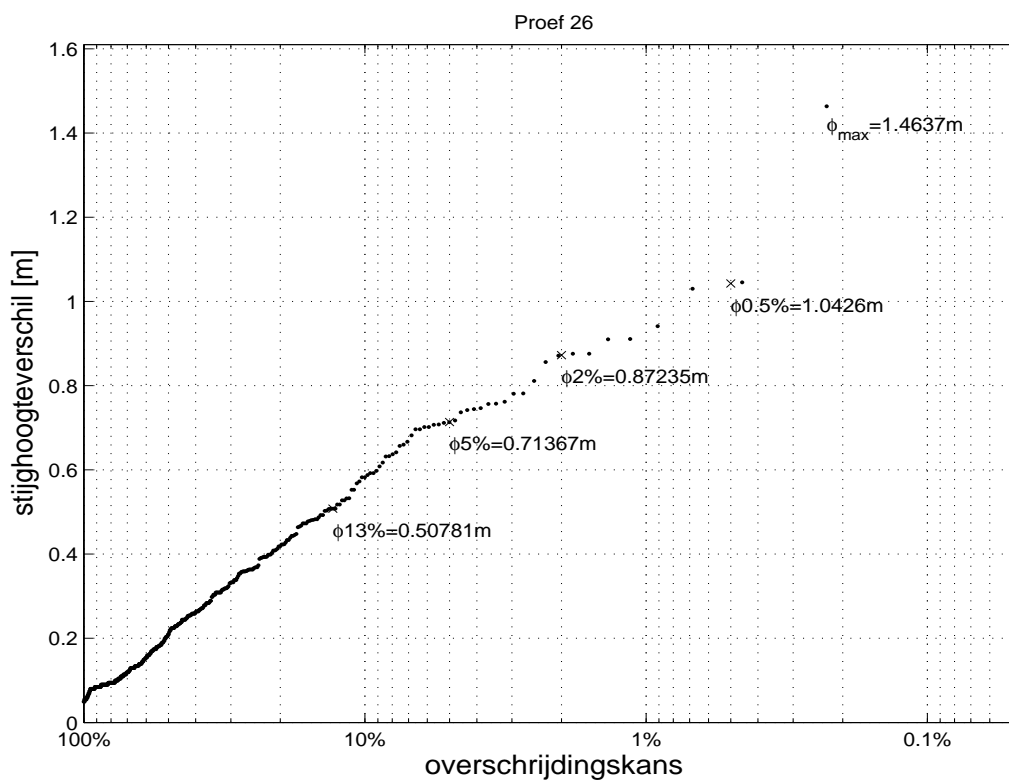
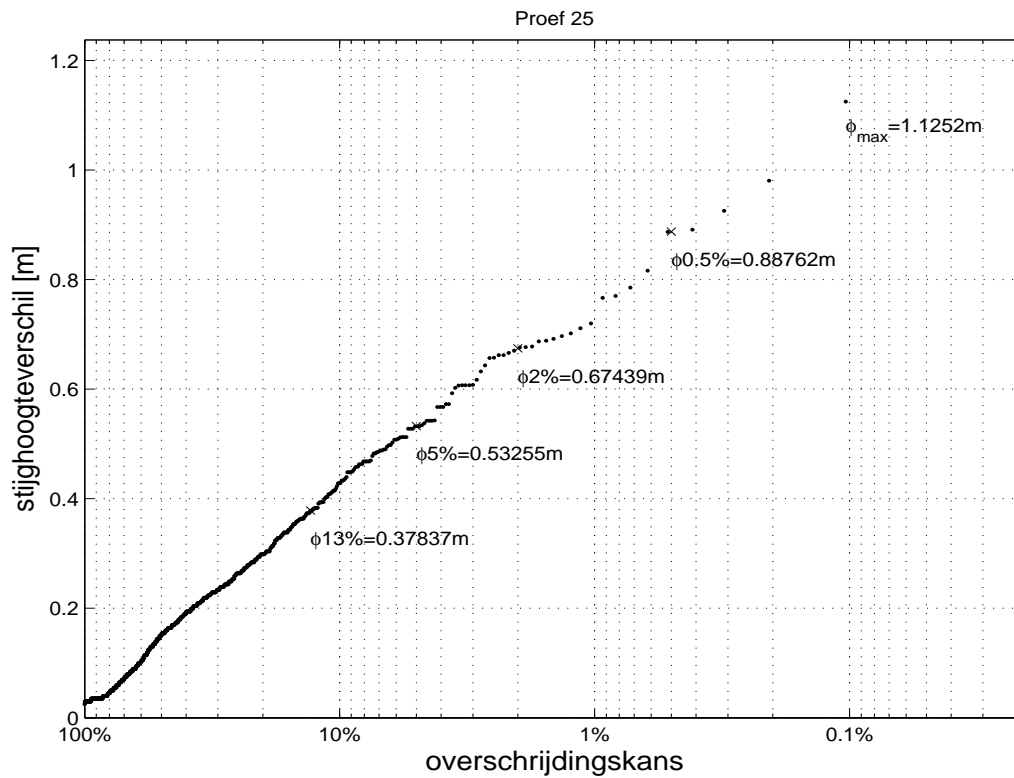
Overschrijdingskrommes van stijghoogteverschillen
in proef 14 en proef 15



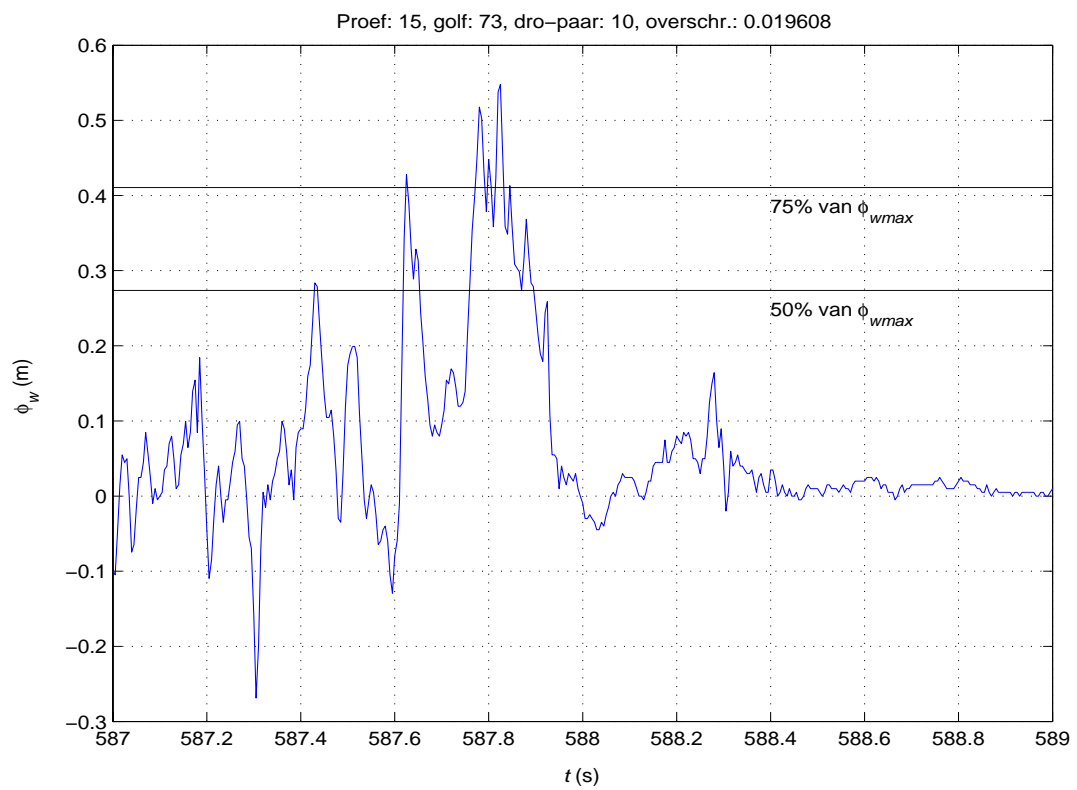
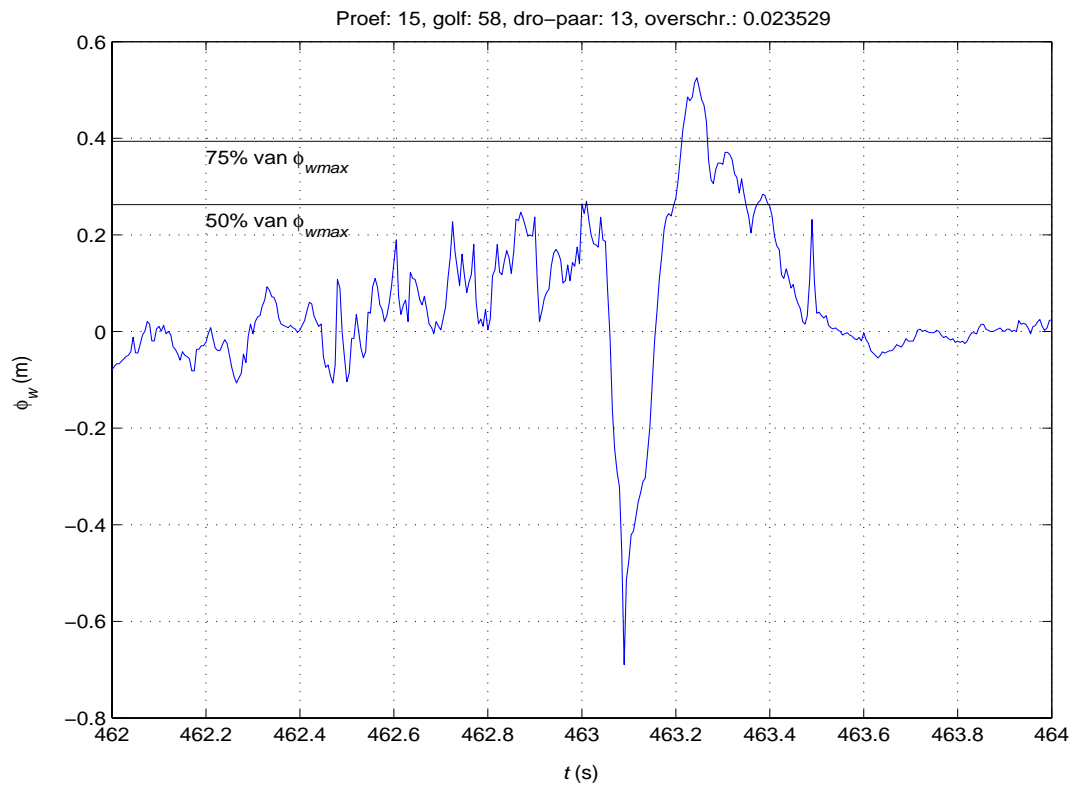
Overschrijdingskrommes van stijghoogteverschillen
in proef 16 en proef 22



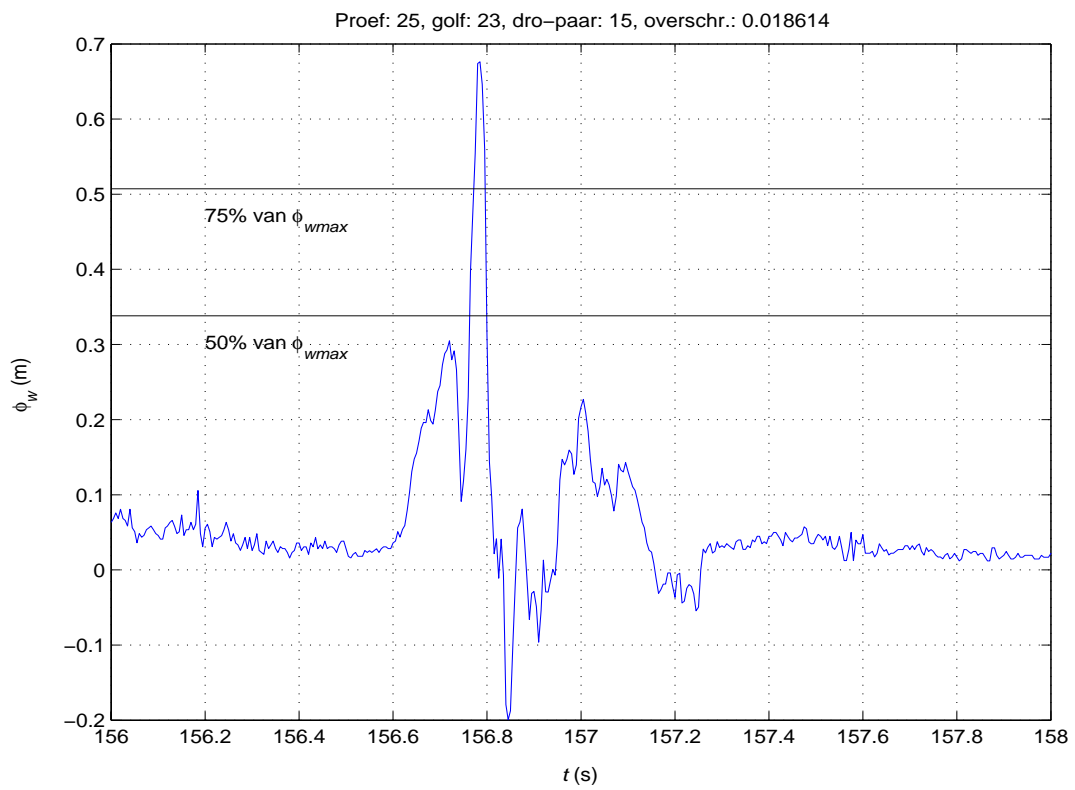
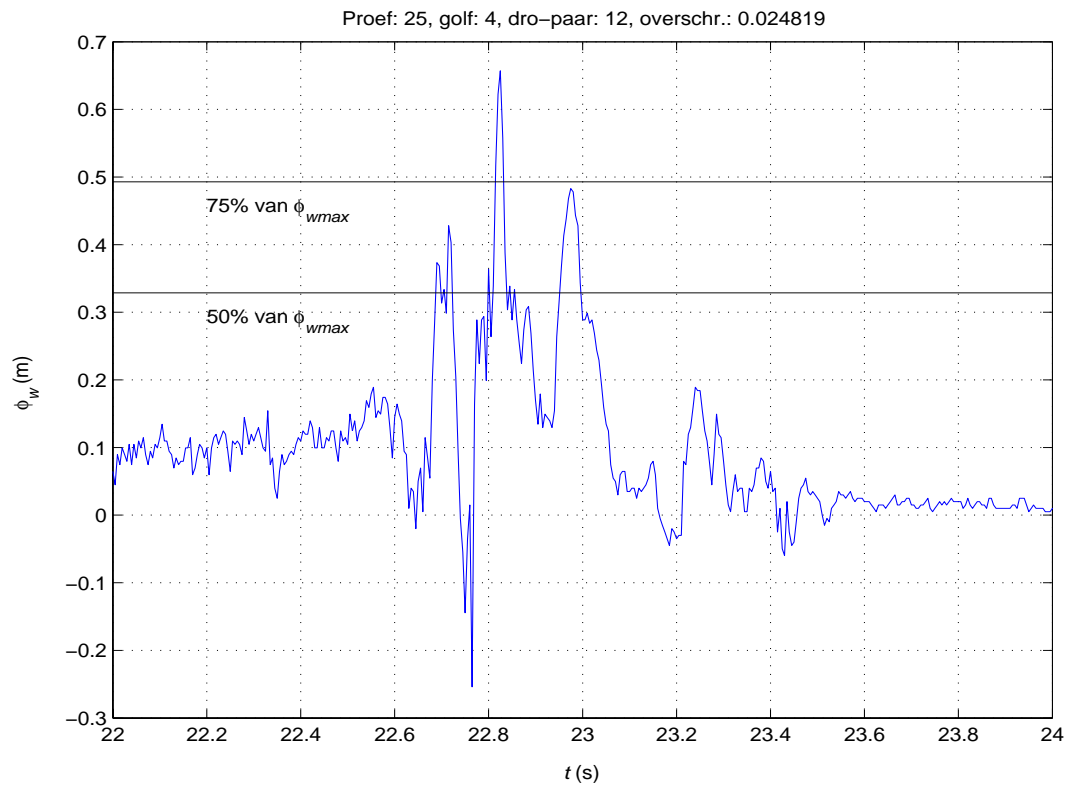
Overschrijdingskrommes van stijghoogteverschillen
in proef 23 en proef 24



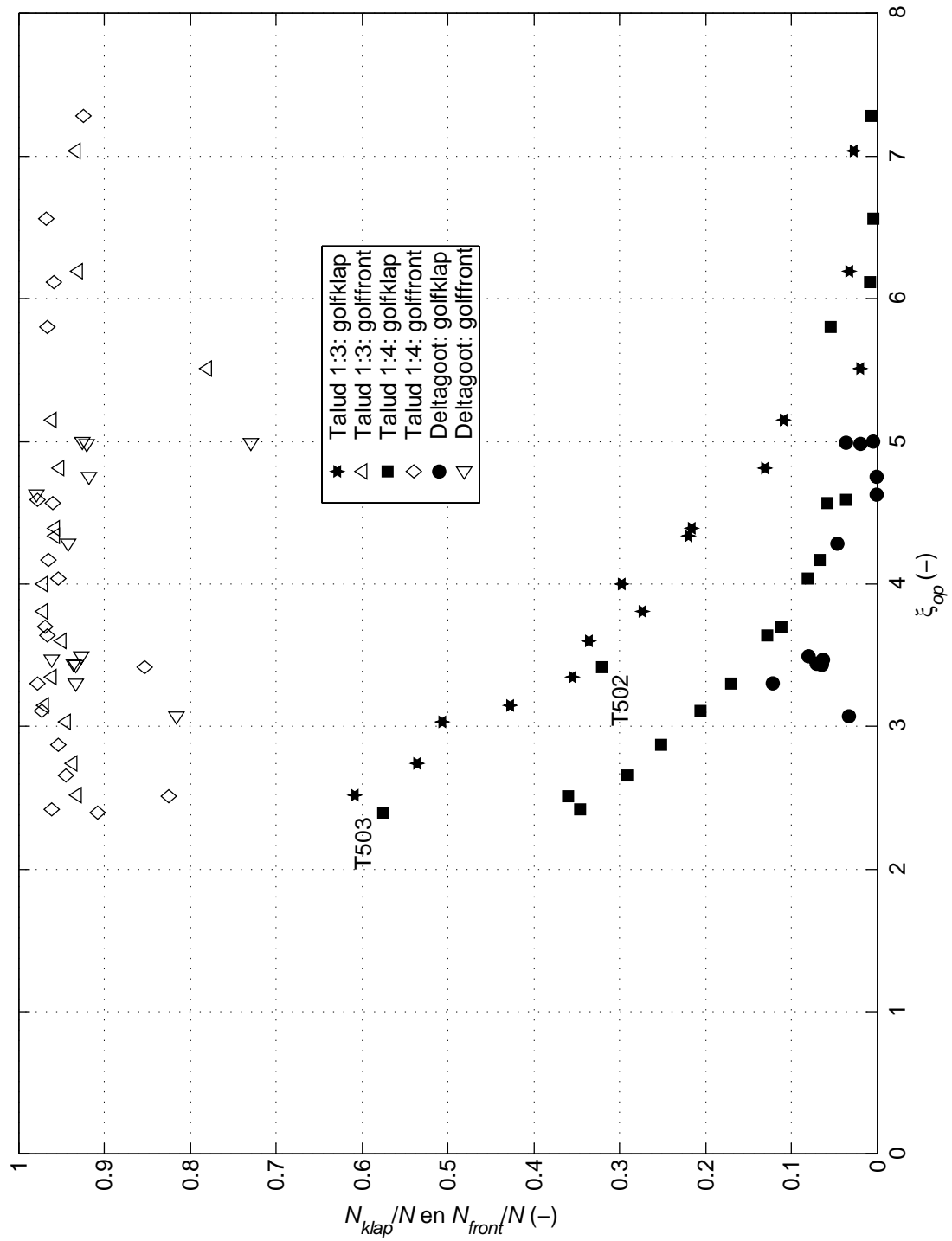
Overschrijdingskrommes van stijghoogteverschillen
in proef 25 en proef 26



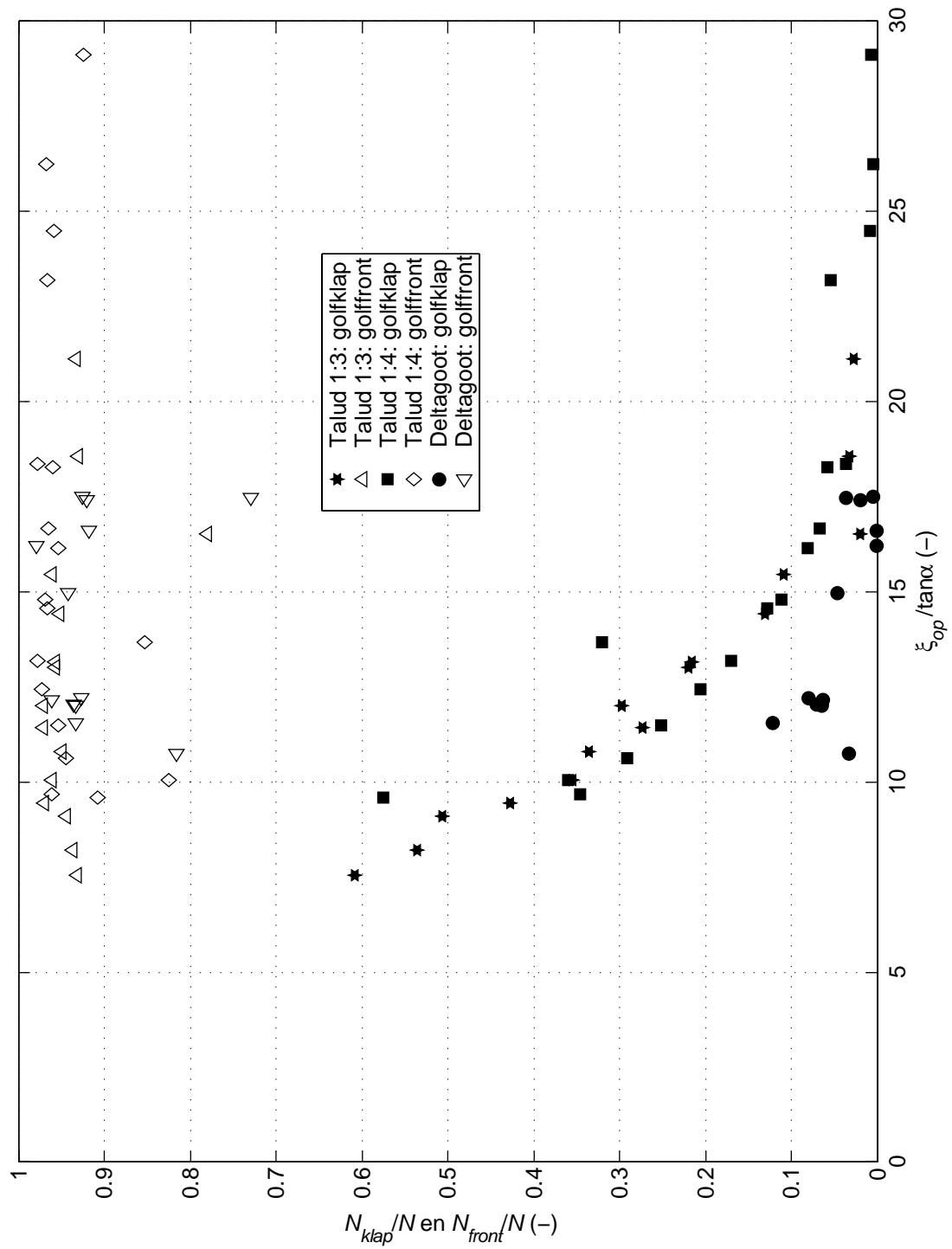
Verloop van stijghoogteverschil rond het maximum
in proef 15



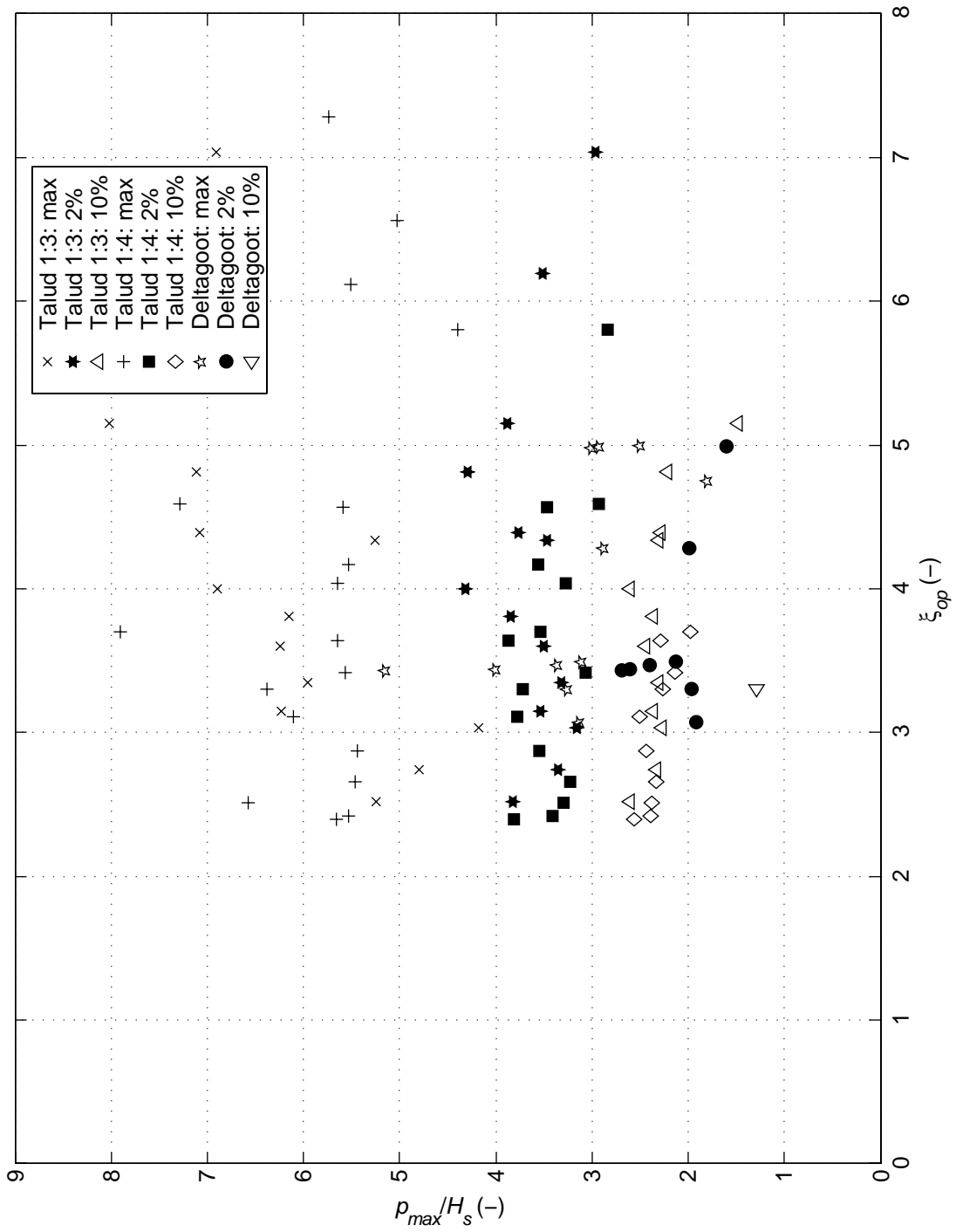
Verloop van stijghoogteverschil rond het maximum
in proef 25



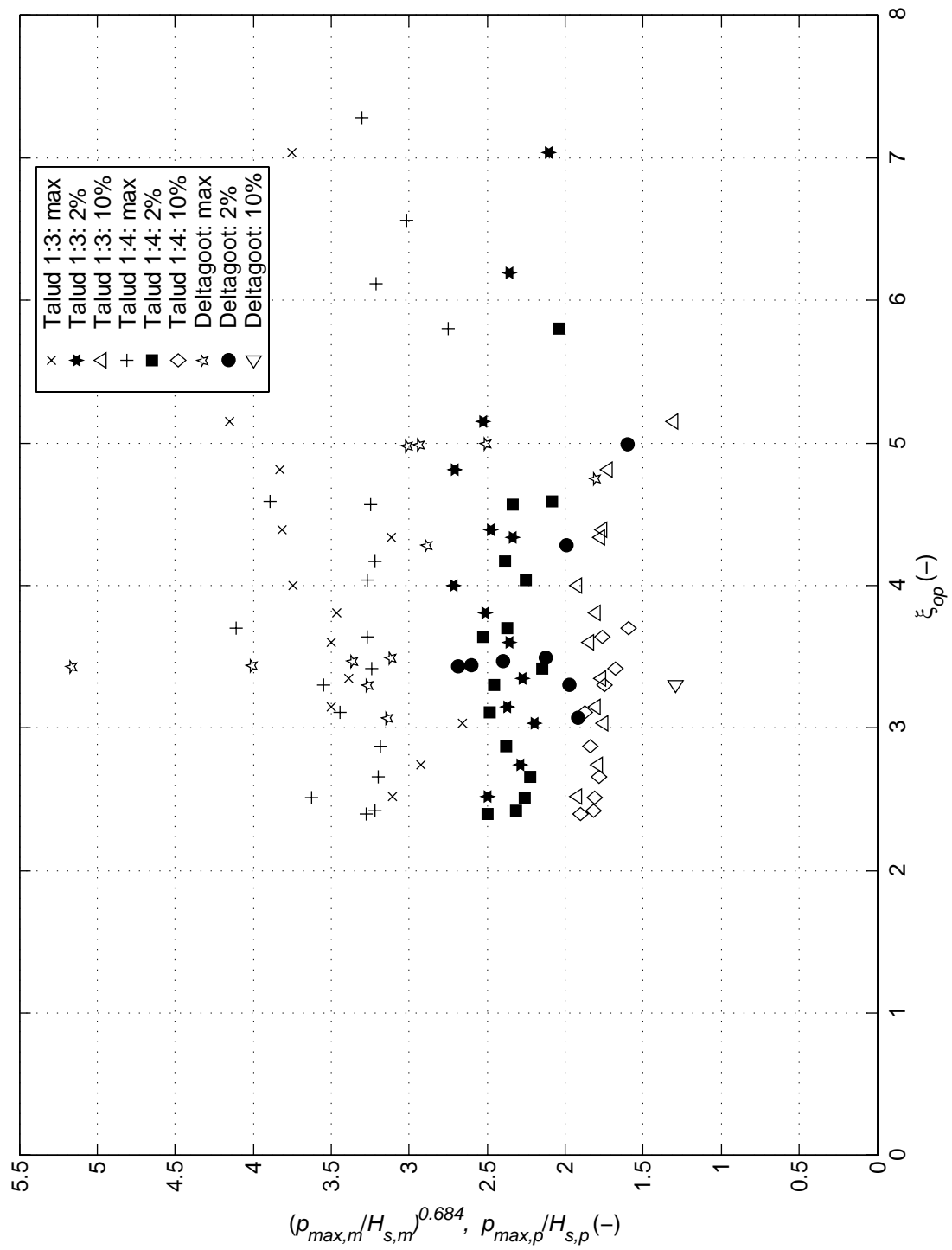
Aantal golfklappen en golffronten per totaal aantal golven



Aantal golflappen en golffronten per totaal aantal golven tegen golfsteilheid

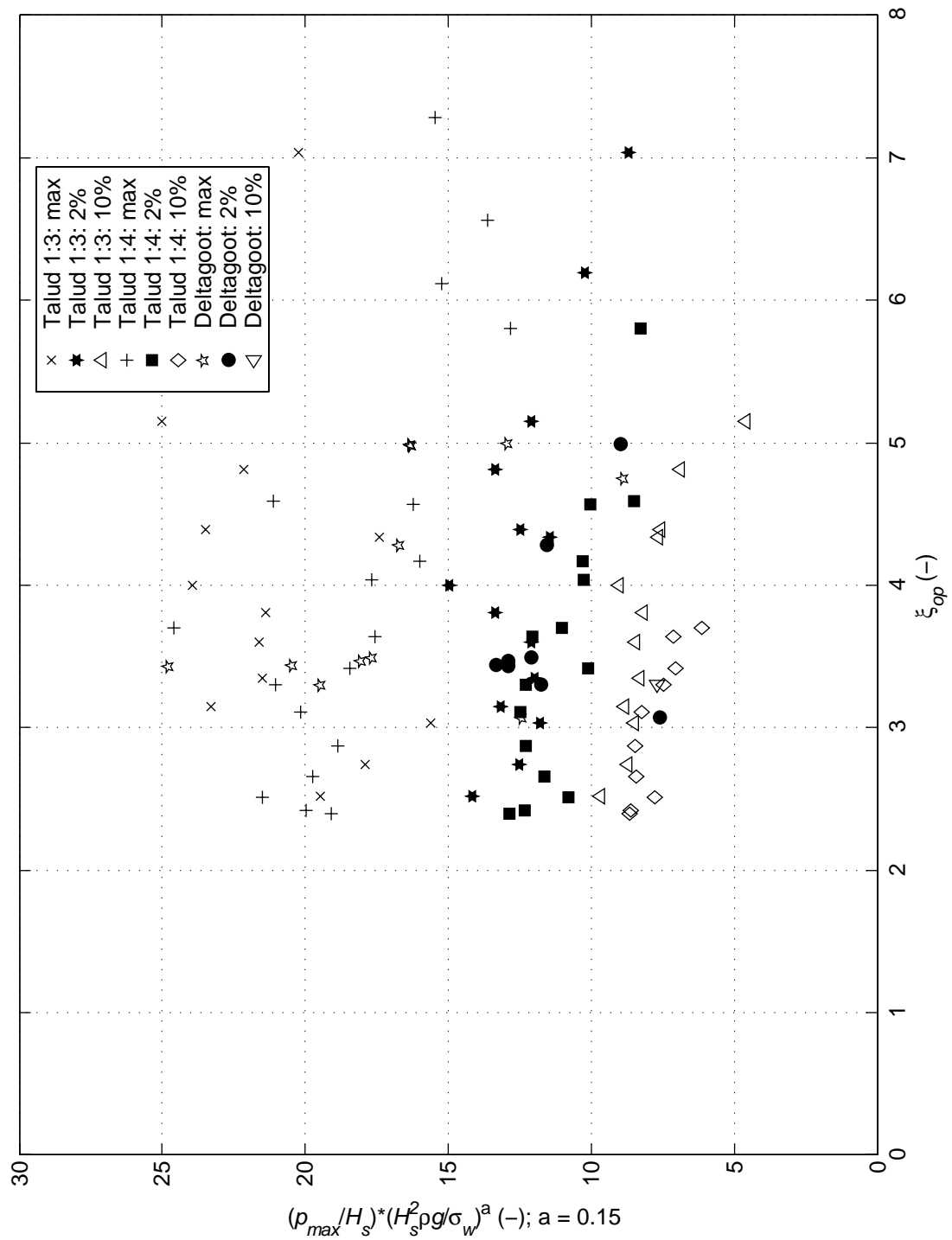


Maximale druk t.o.v. het talud (p_{max})



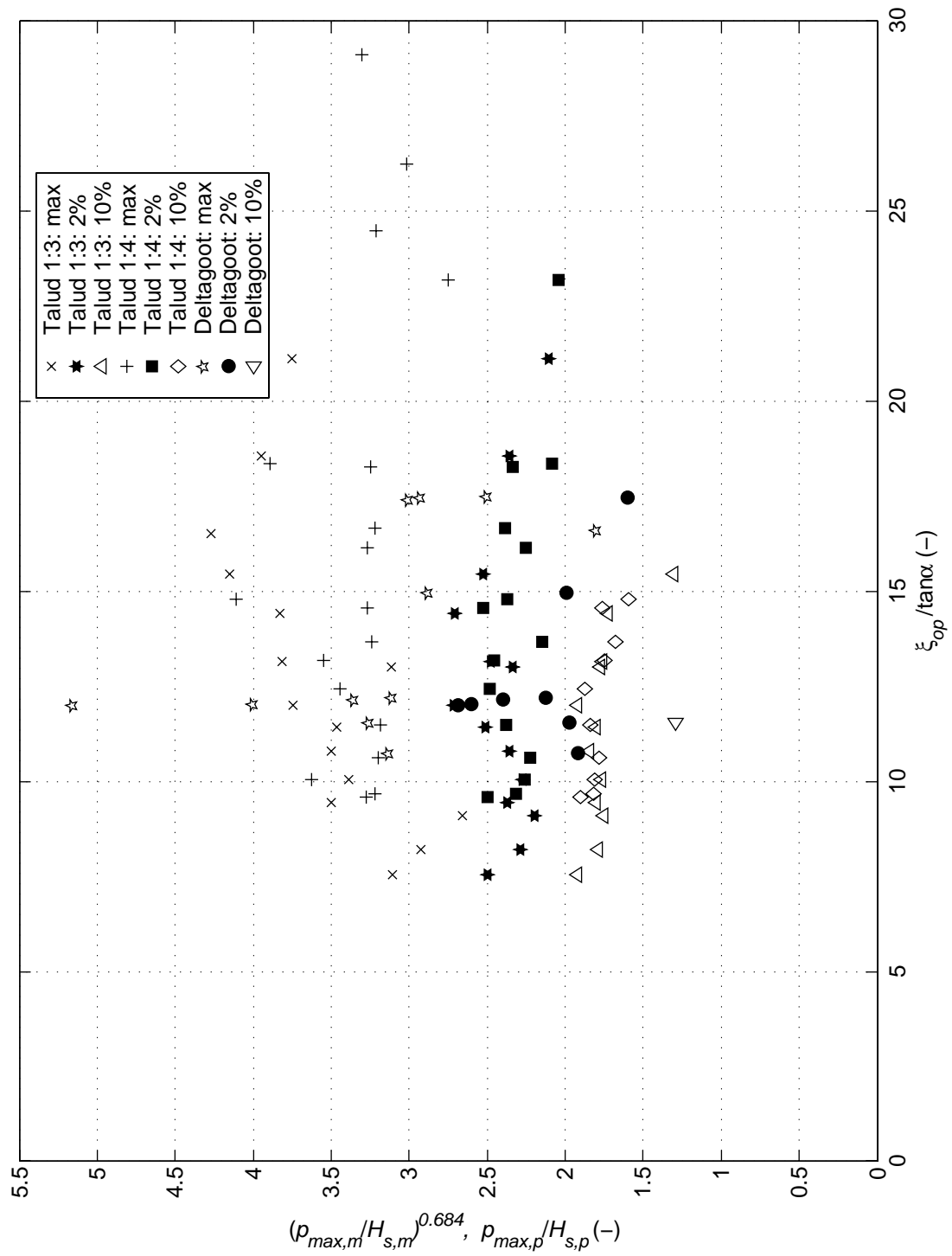
Maximale druk t.o.v. het talud (p_{max}).

Howarth-schaling



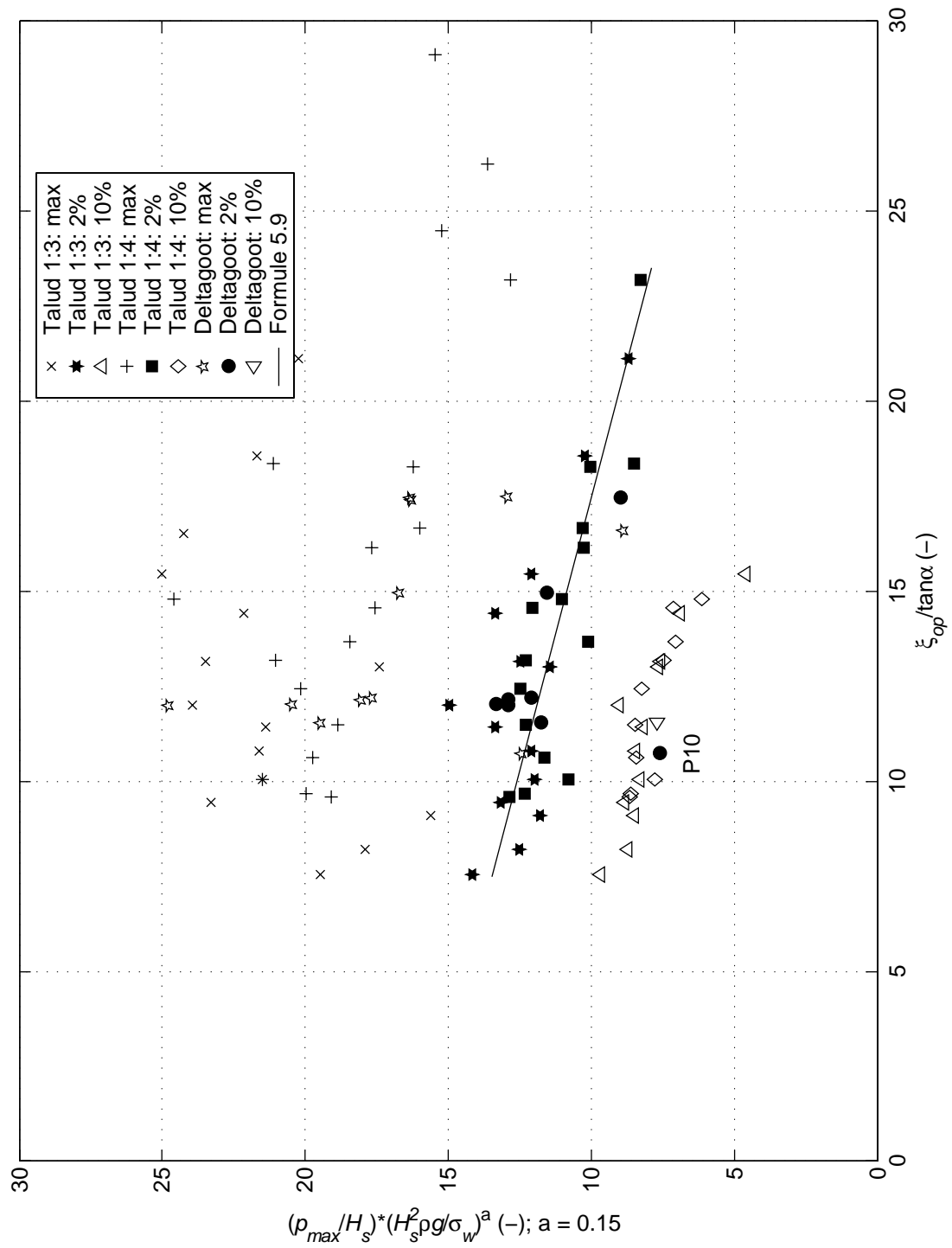
Maximale druk t.o.v. het talud (p_{max}).

Weber-schaling



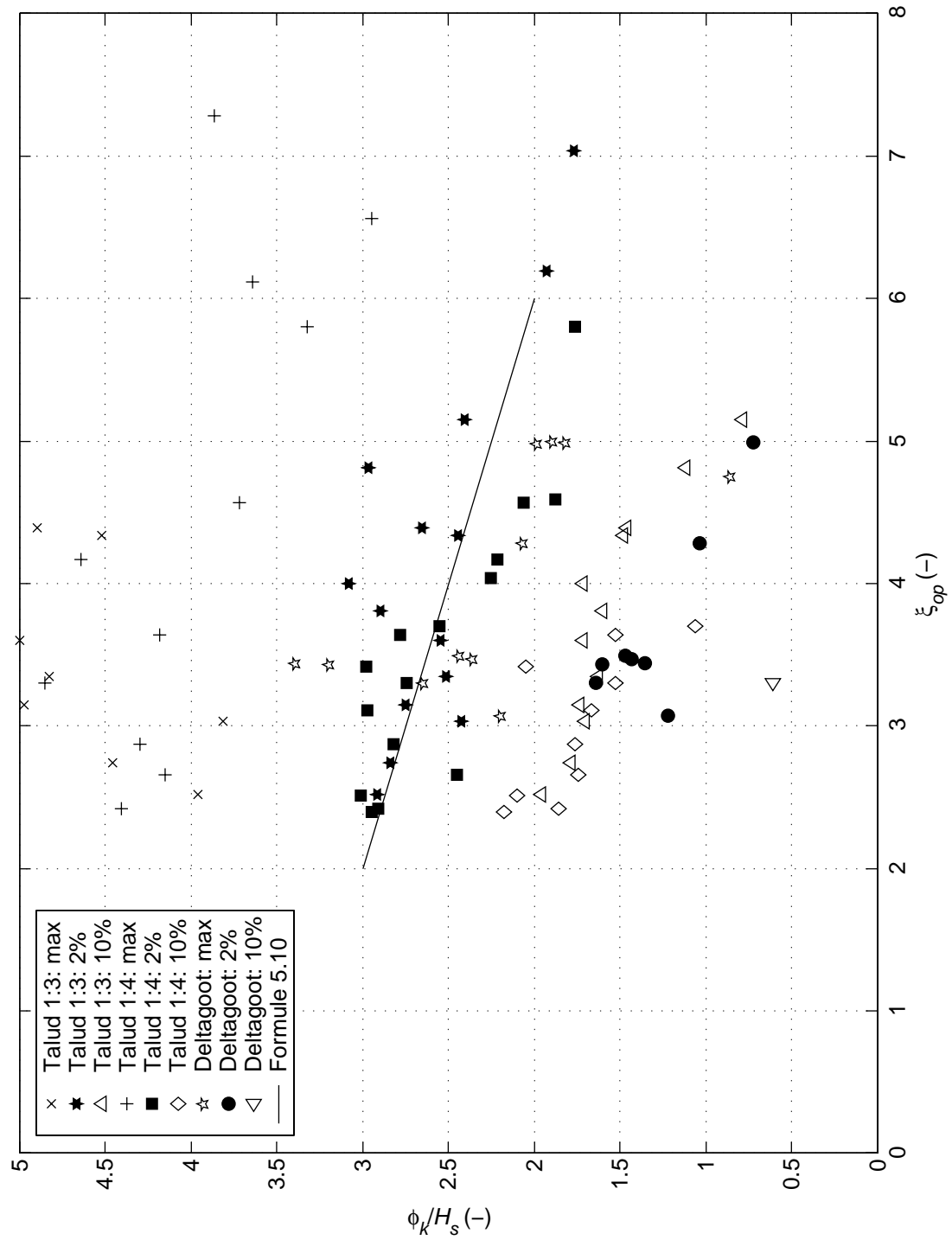
Maximale druk t.o.v. het talud (p_{max}) tegen golfsteilheid.

Howarth-schaling

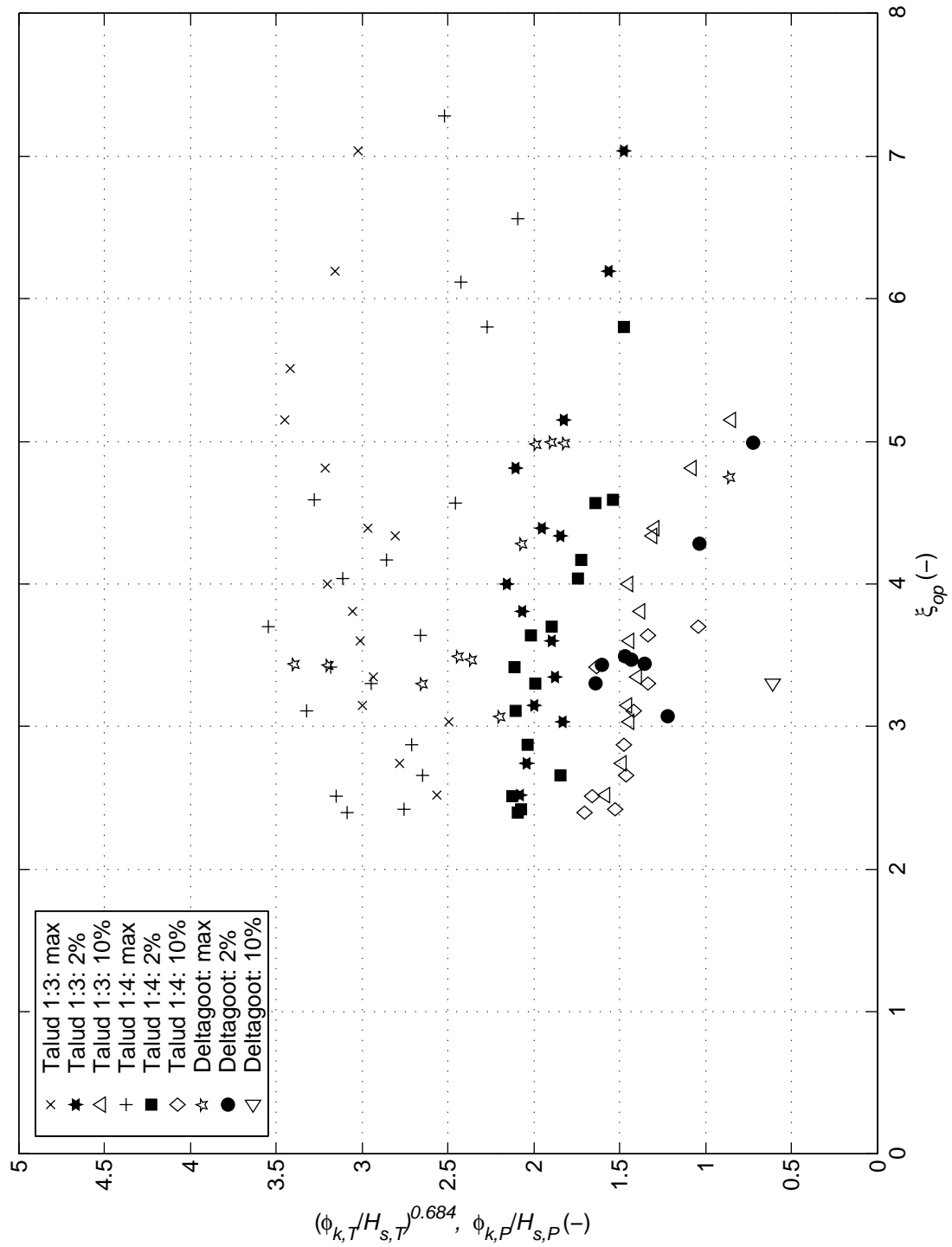


Maximale druk t.o.v. het talud (p_{max}) tegen golfsteilheid.

Weber-schaling

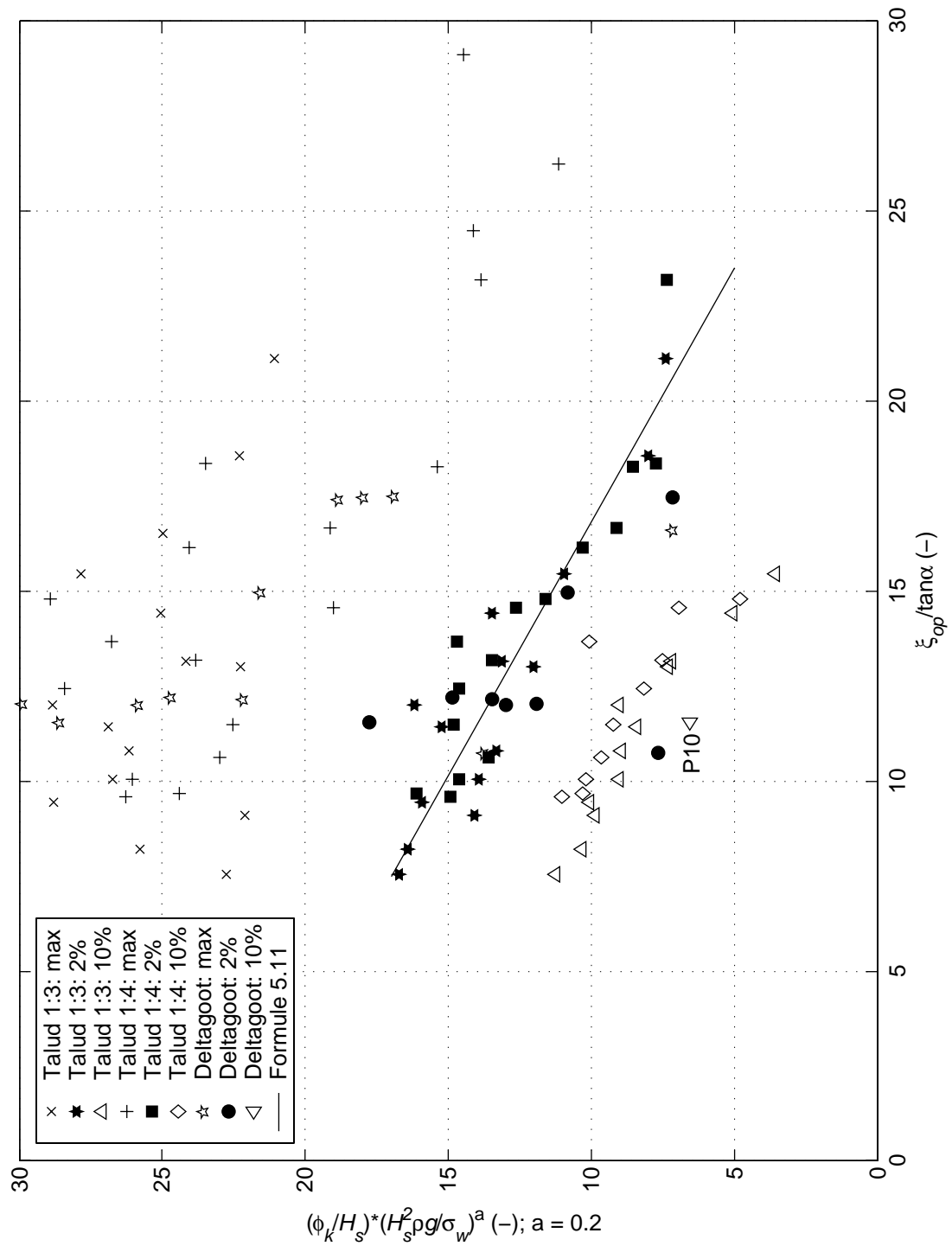


Maximale stijghoogte t.o.v. trog (ϕ_k)



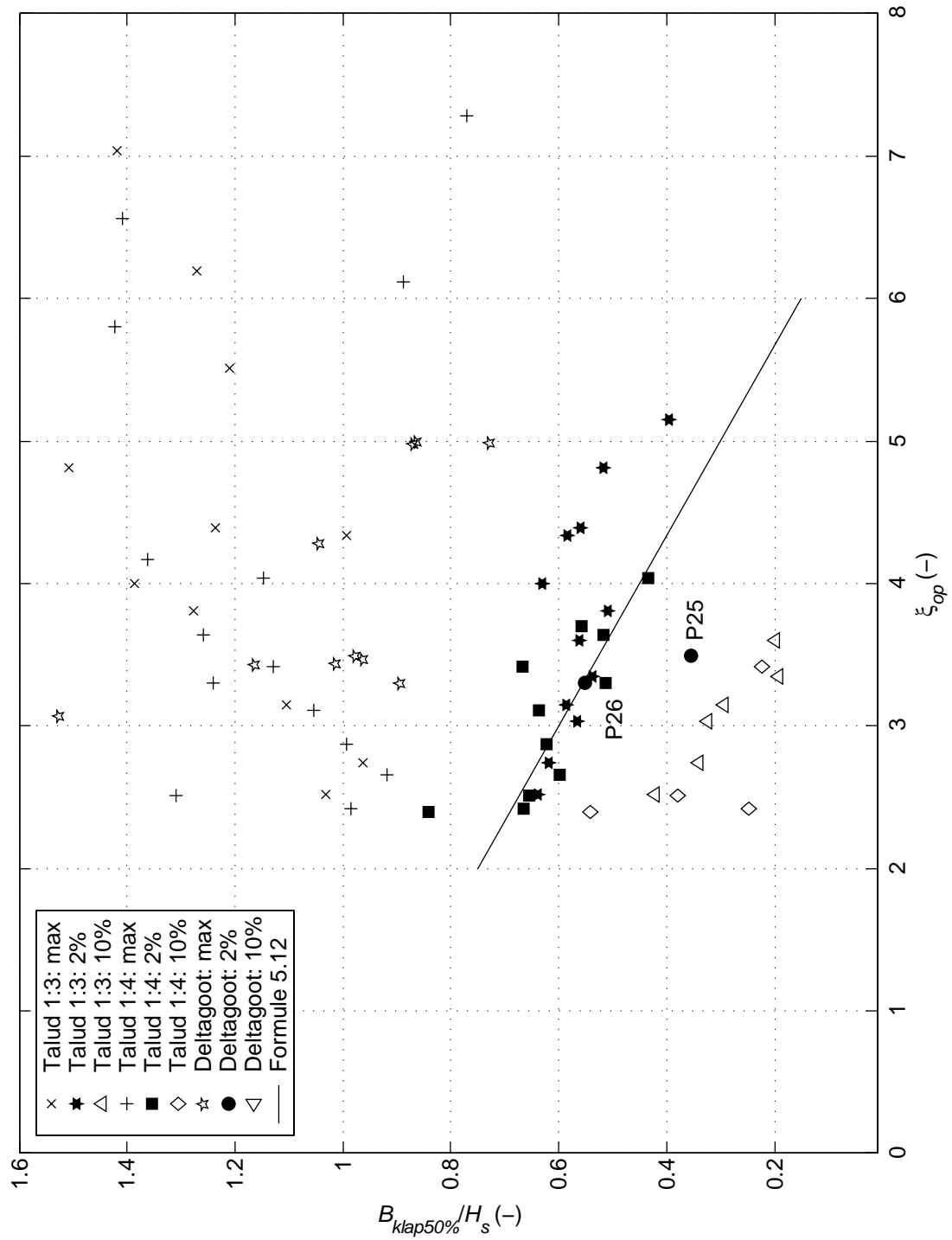
Maximale stijghoogte t.o.v. trog (ϕ_k).

Howarth-schaling



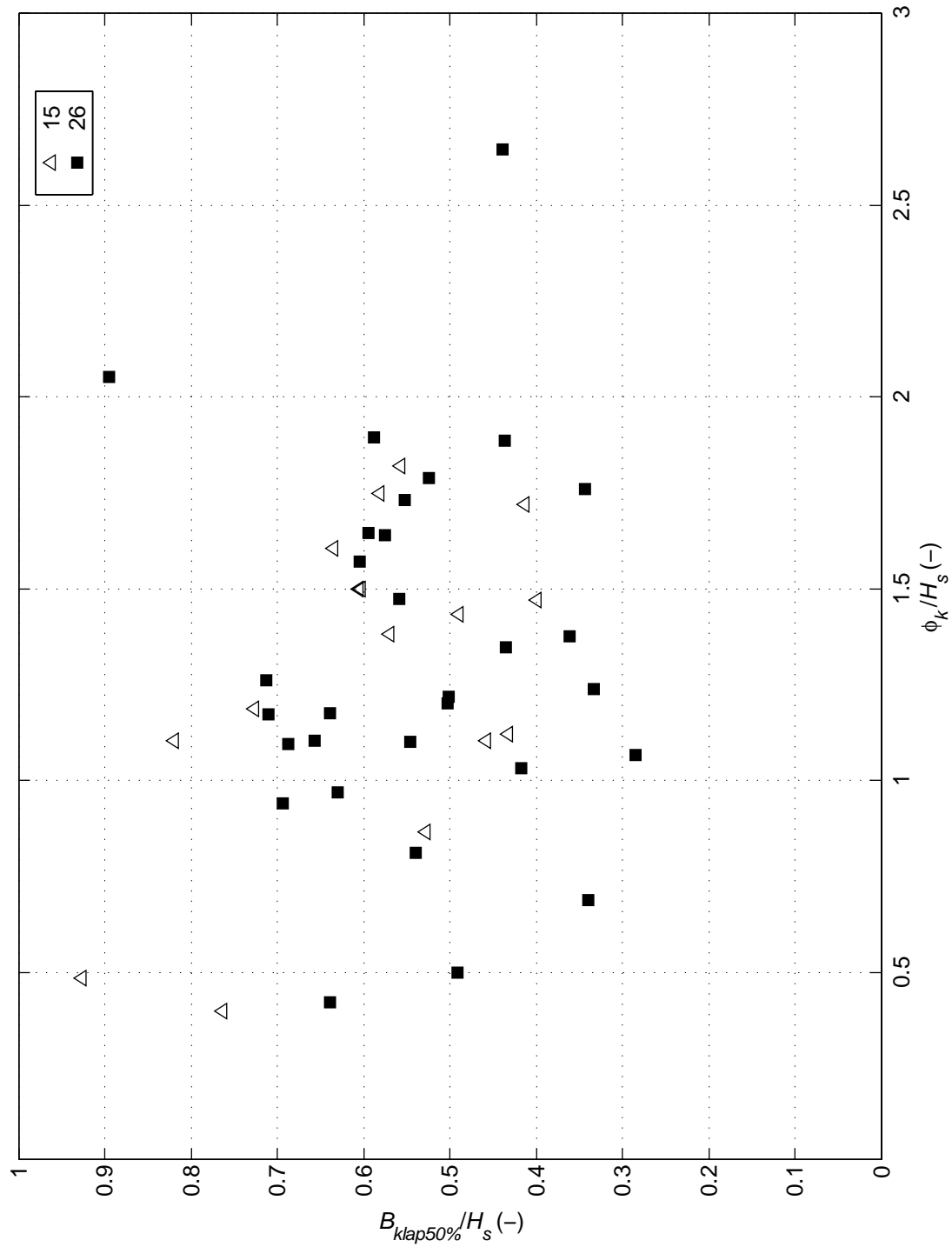
Maximale stijghoogte t.o.v. trog (ϕ_k).

Weber-schaling

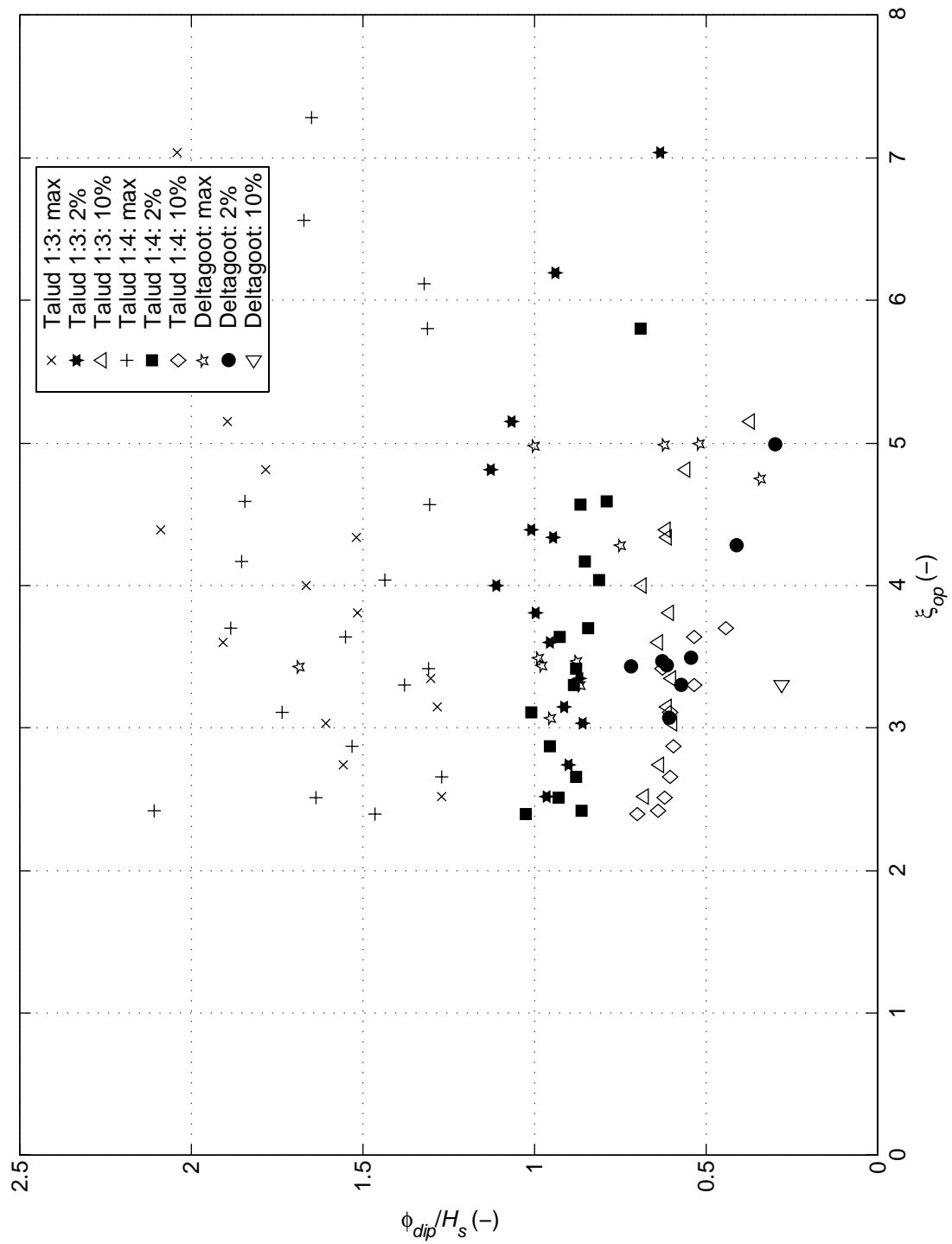


Breedte van de golfklap ($B_{klap50\%}$)

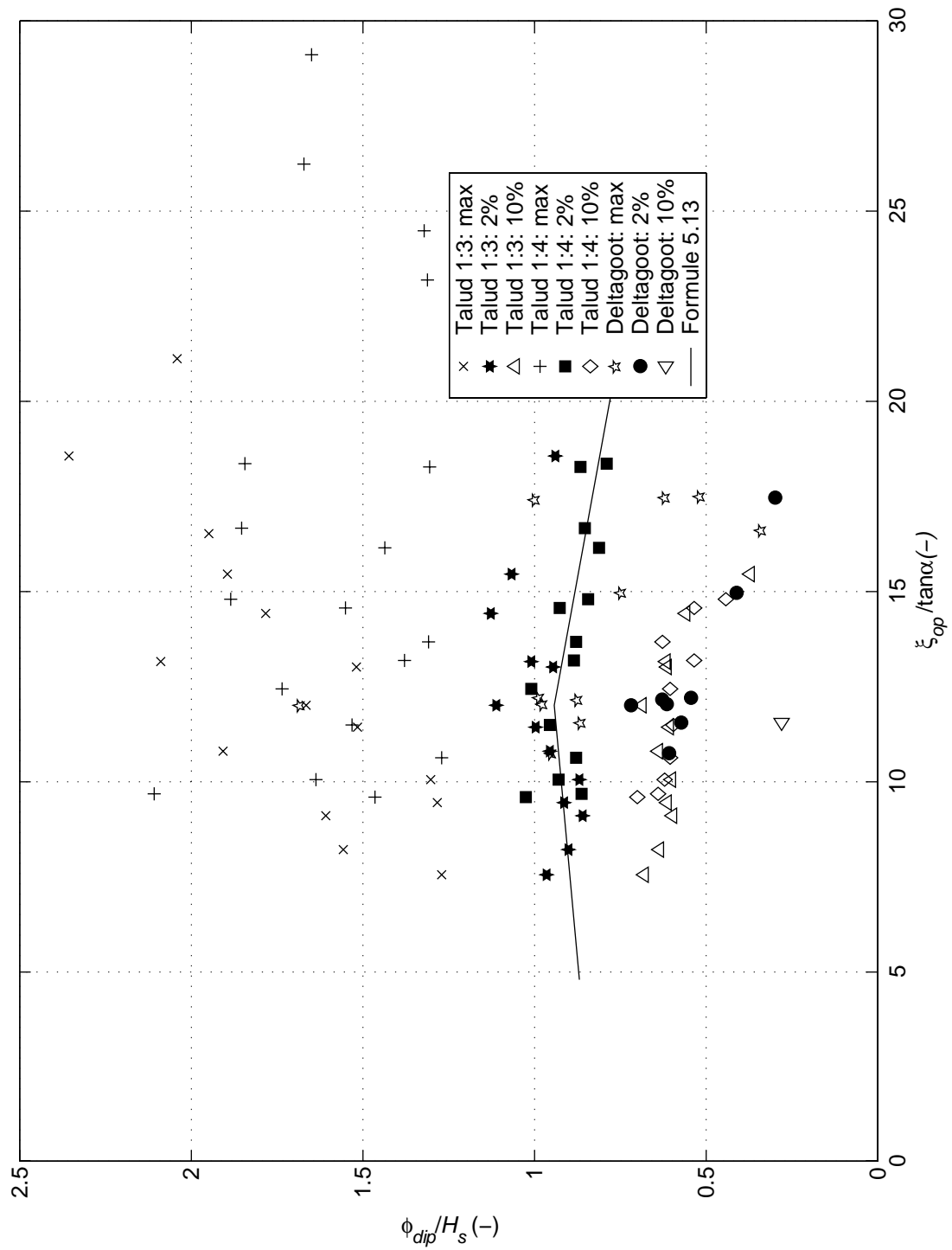
Grootste 33 % van ϕ_k



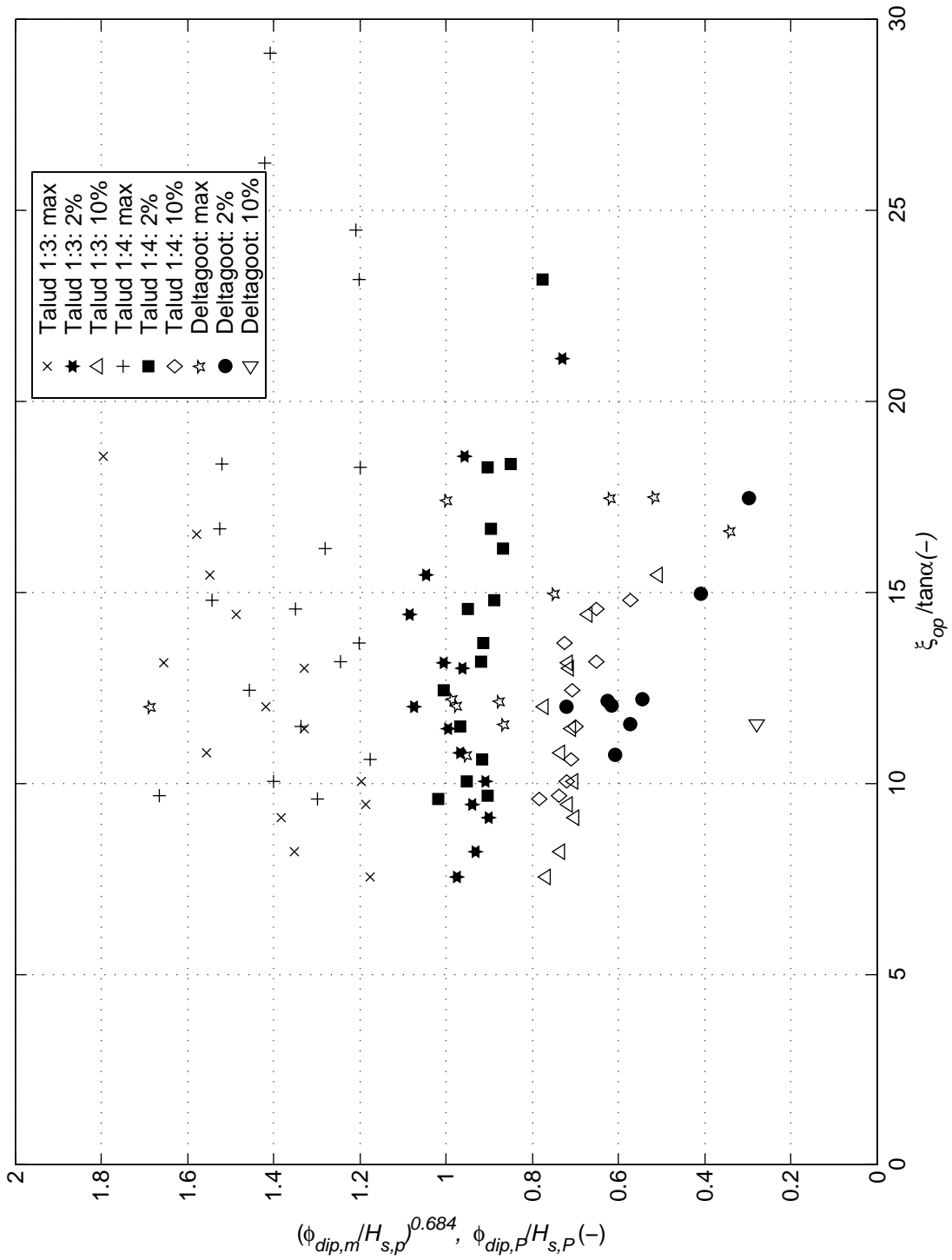
$B_{klap50\%}$ vs ϕ_k



Gediptheid tijdens golfklap (ϕ_{djp})

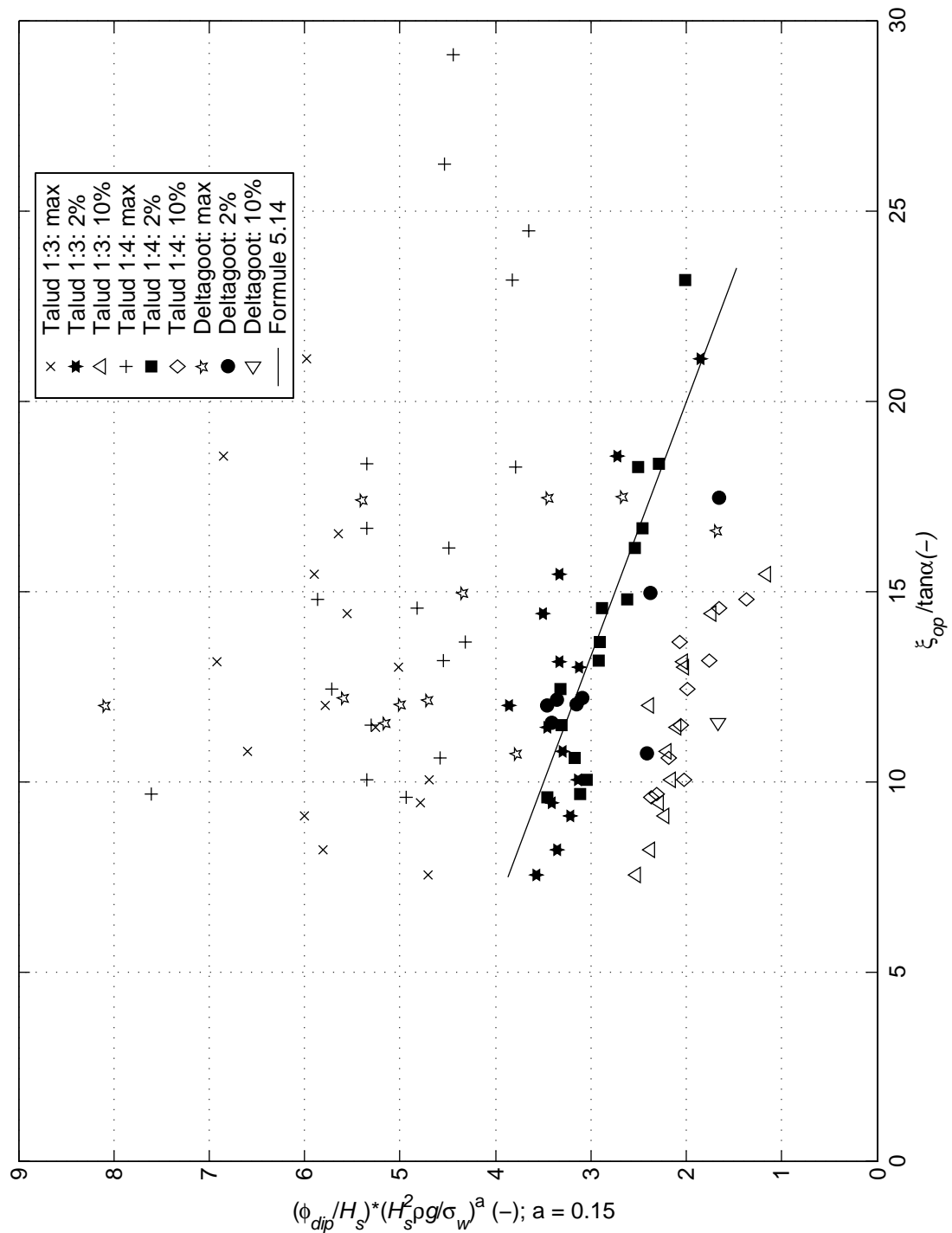


Gediptheid tijdens golfklap (ϕ_{dip}) tegen golfsteilheid



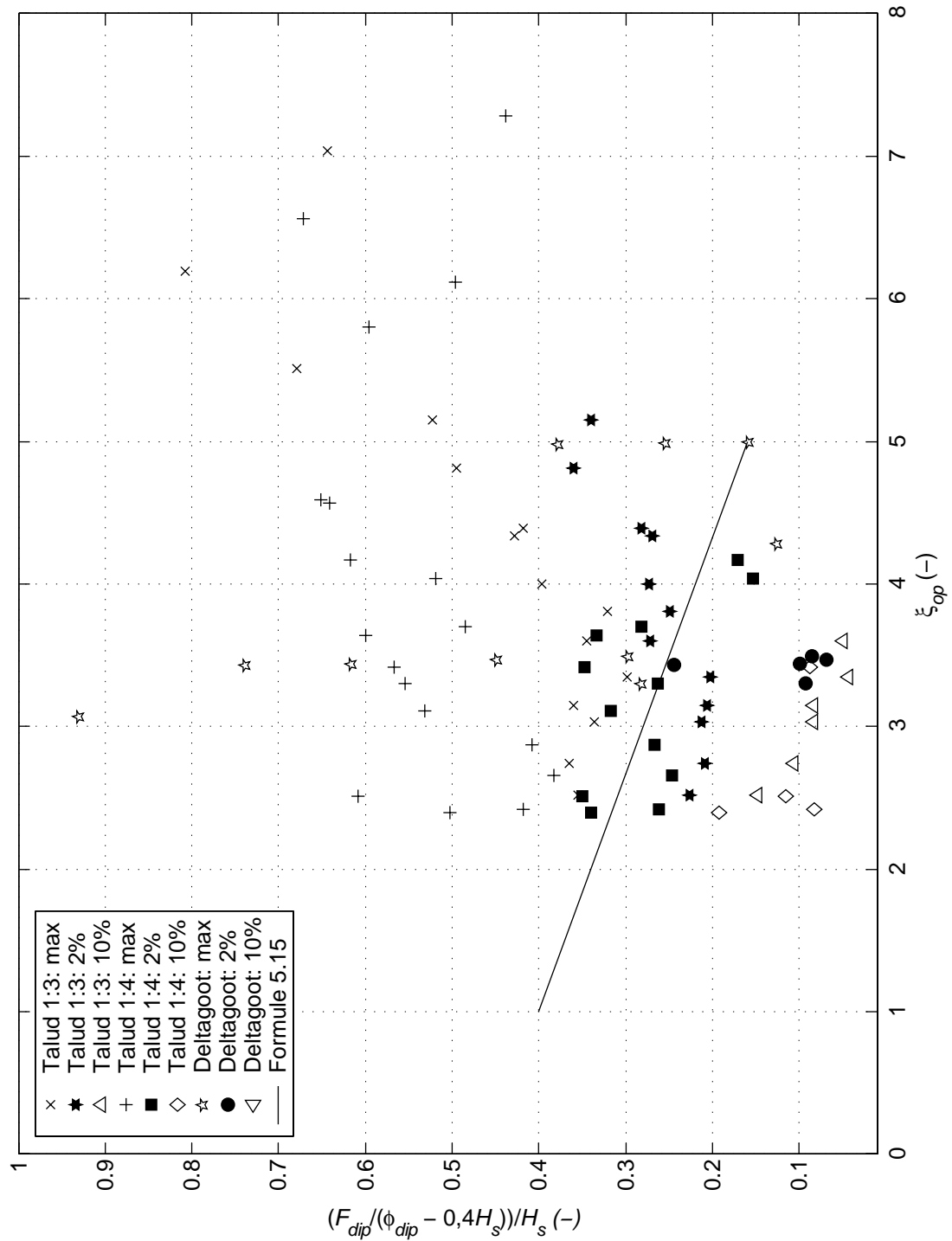
Gediptheid tijdens golfklap (ϕ_{dip}) tegen golfsteilheid.

Howarth-schaling



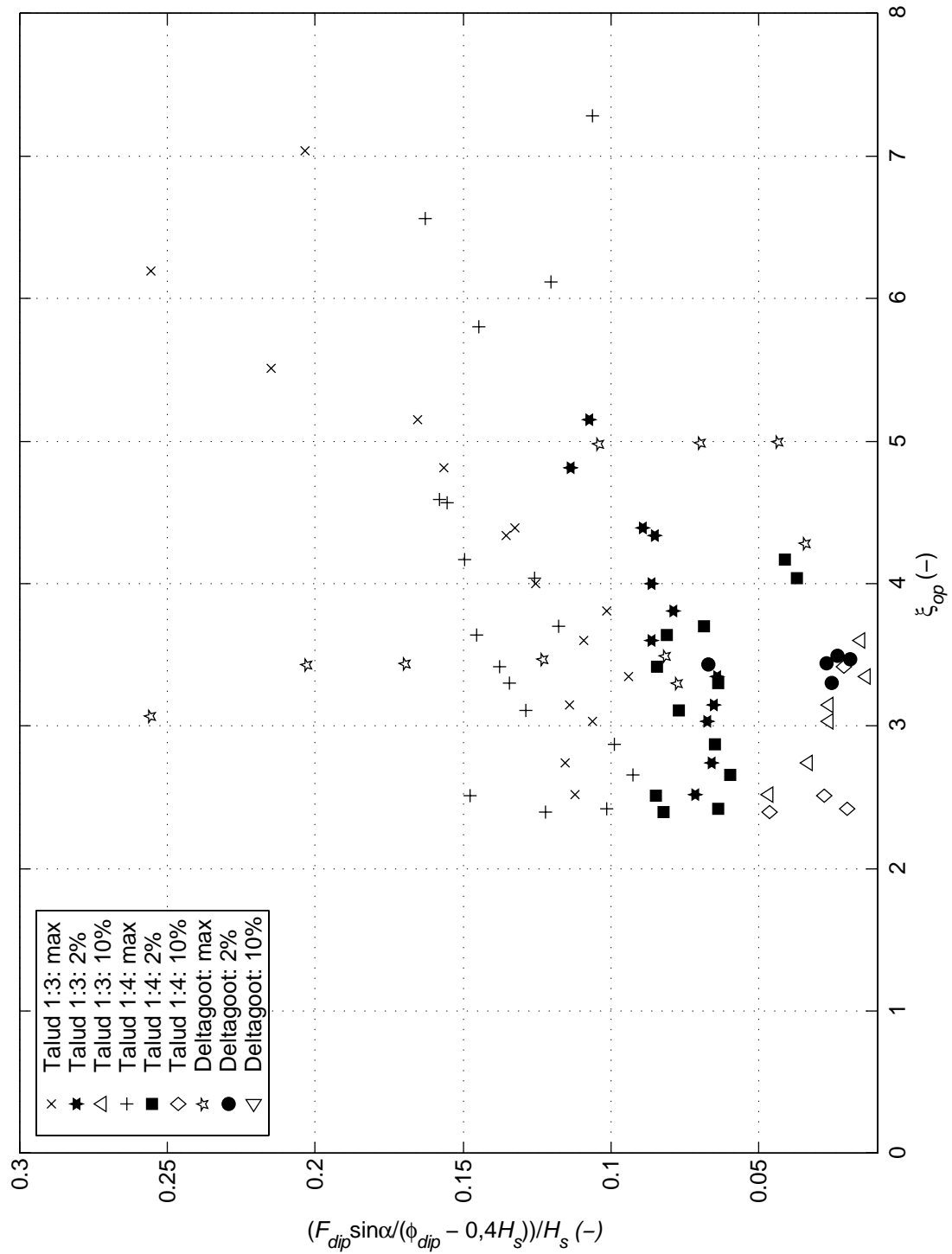
Gediptheid tijdens golfklap (ϕ_{dip}) tegen golfsteilheid.

Weber-schaling

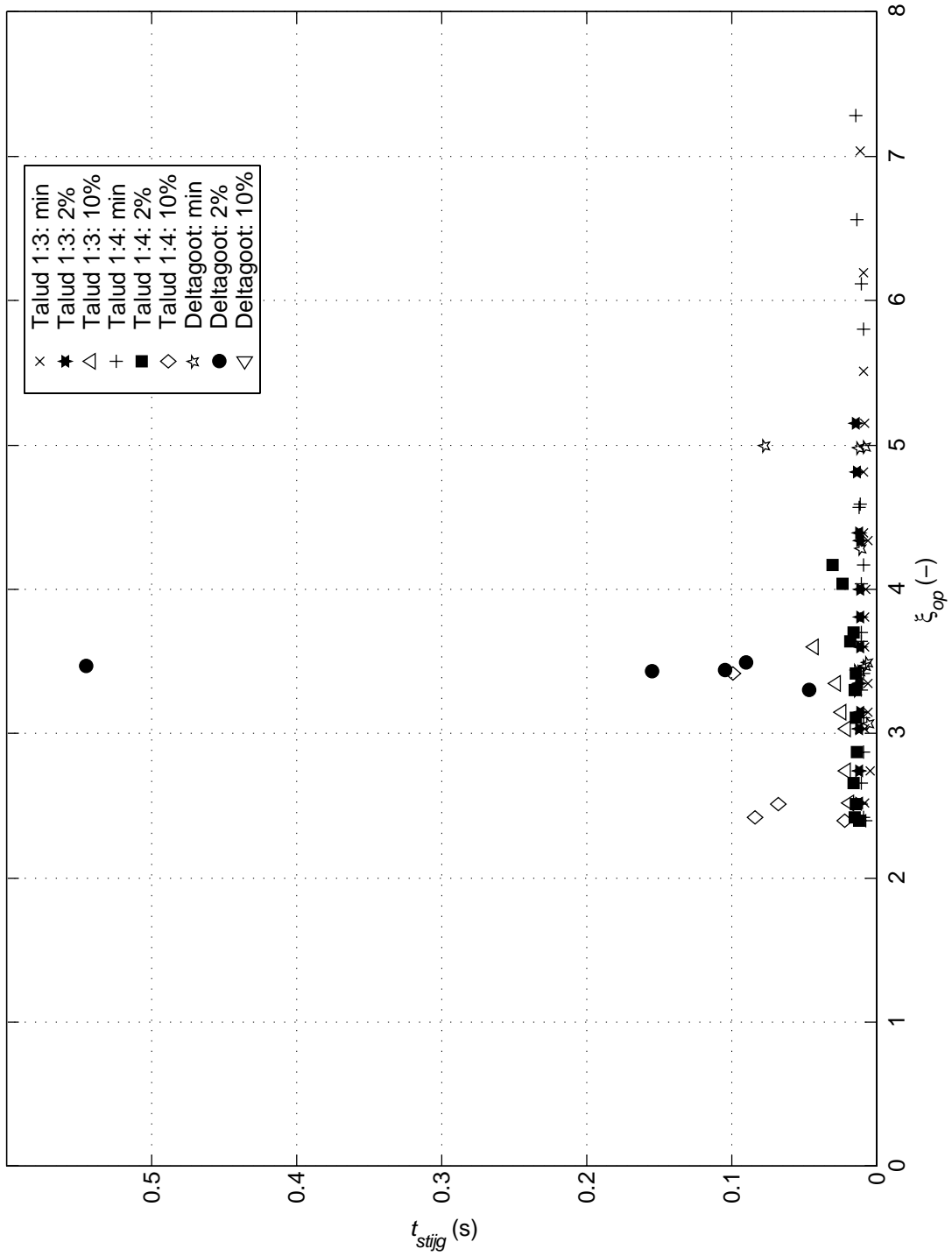


Belaste breedte $F_{dip} / (\phi_{dip} - 0,4H_s)$ tijdens golfklap

Grootste 33 % van ϕ_k

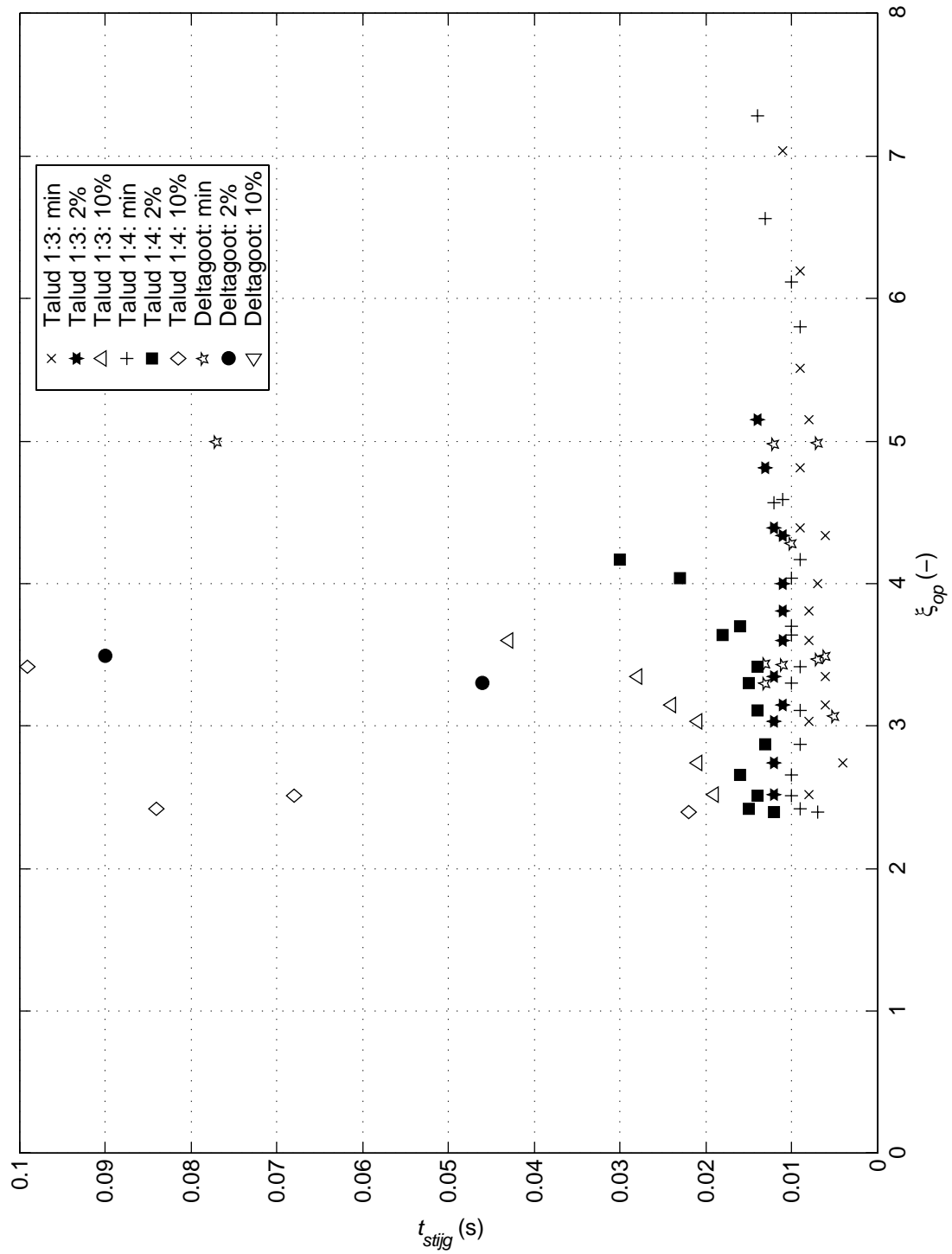


Belaste breedte $F_{dip} \sin \alpha / (\phi_{dip} - 0,4 H_s)$ tijdens golfklap		
	Grootste 33 % van ϕ_k	
WL DELFT HYDRAULICS	H4421	Fig. C.43



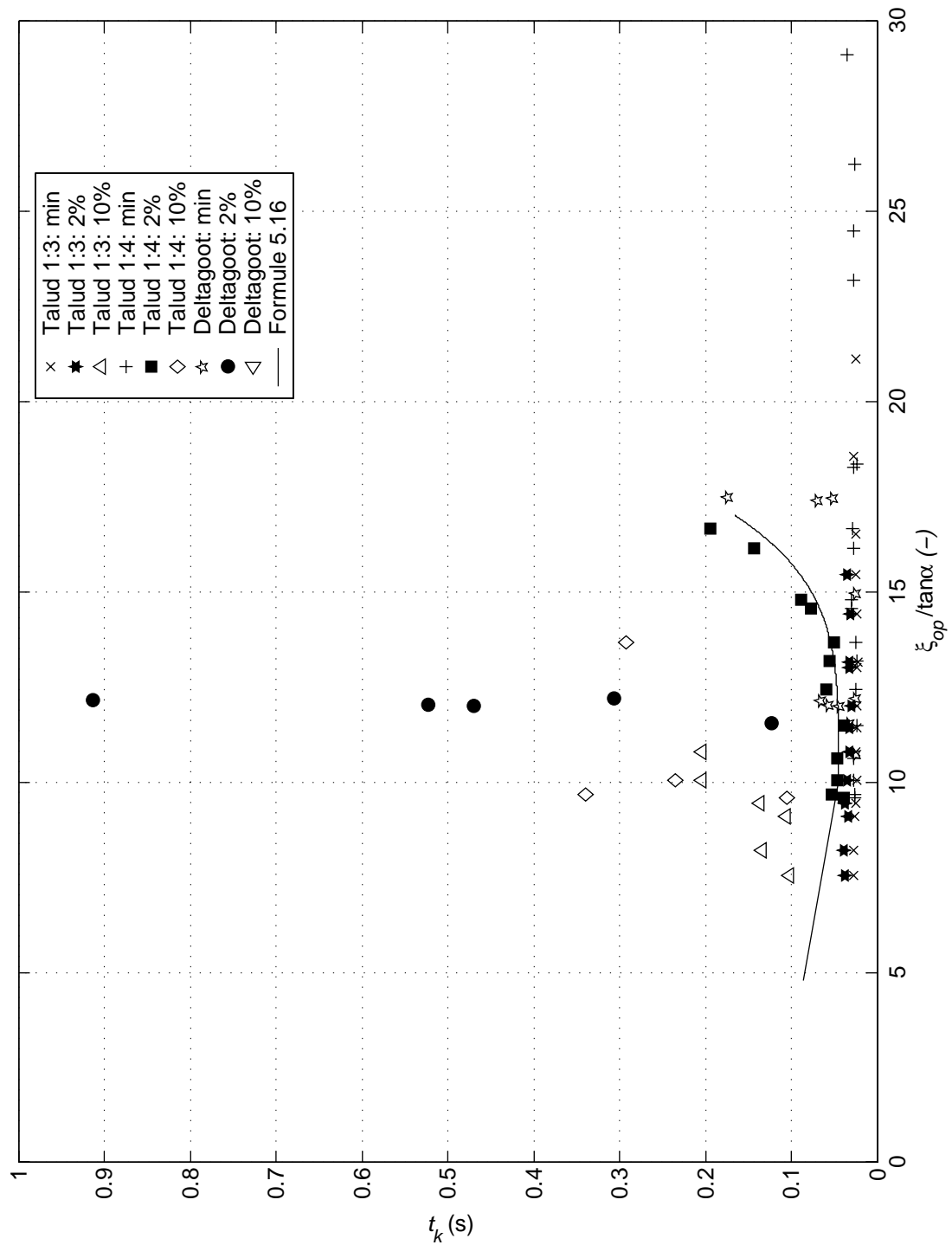
Stijgtijd (t_{stijg})

Grootste 33 % van ϕ_k



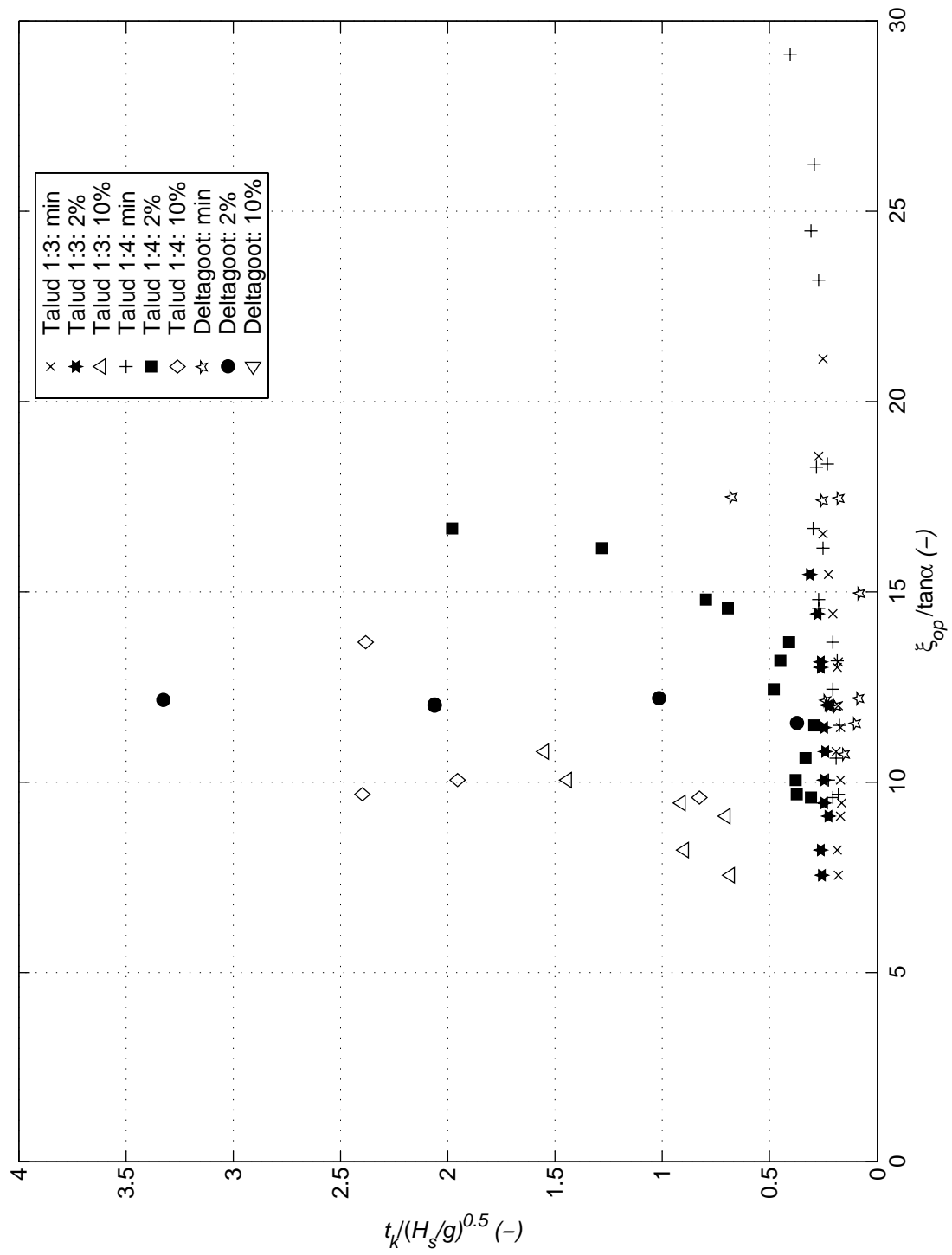
Stijgtijd (t_{stijg}). Inzoom

Grootste 33 % van ϕ_k



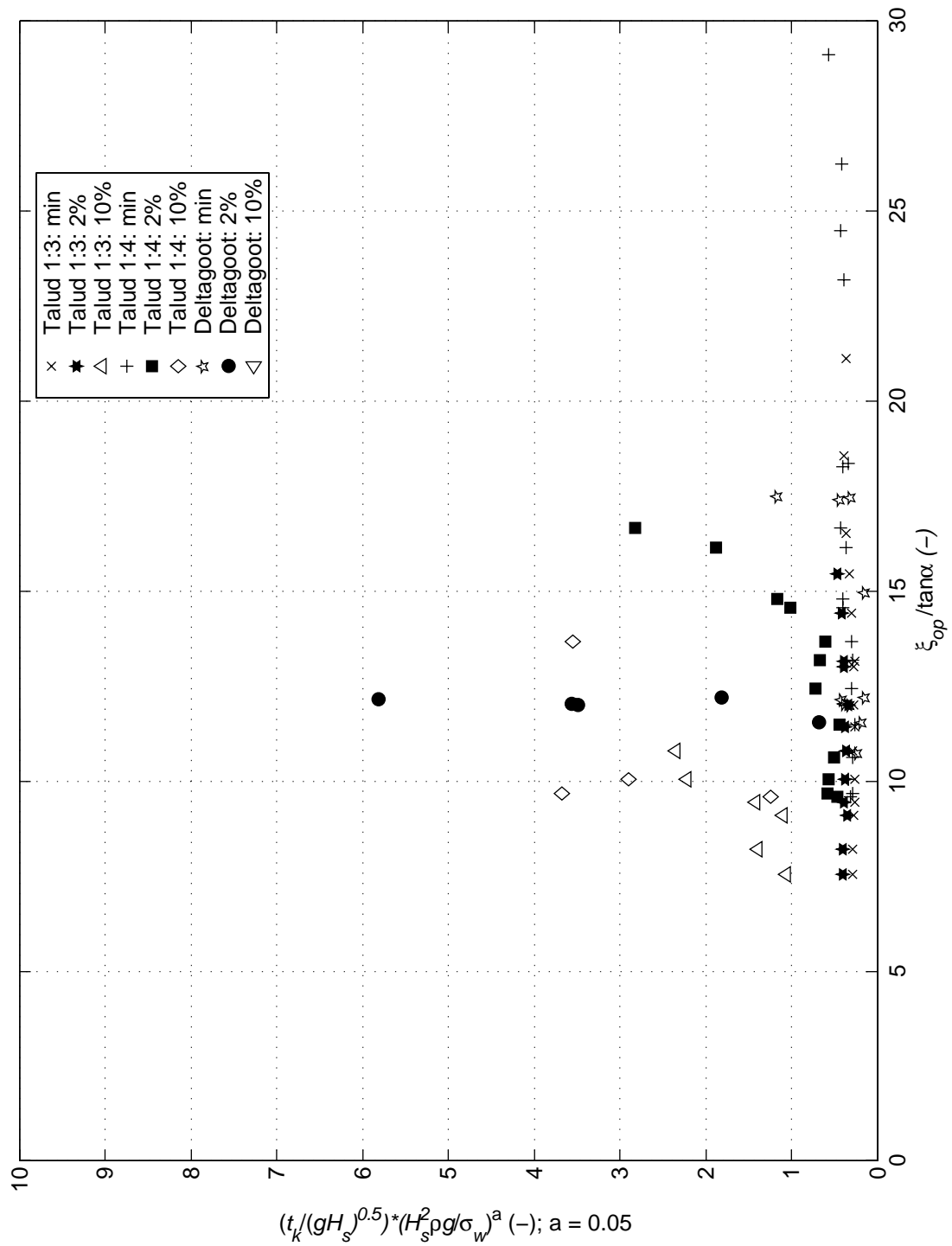
Golfklapduur (t_k) tegen golfsteilheid

Grootste 33 % van ϕ_k



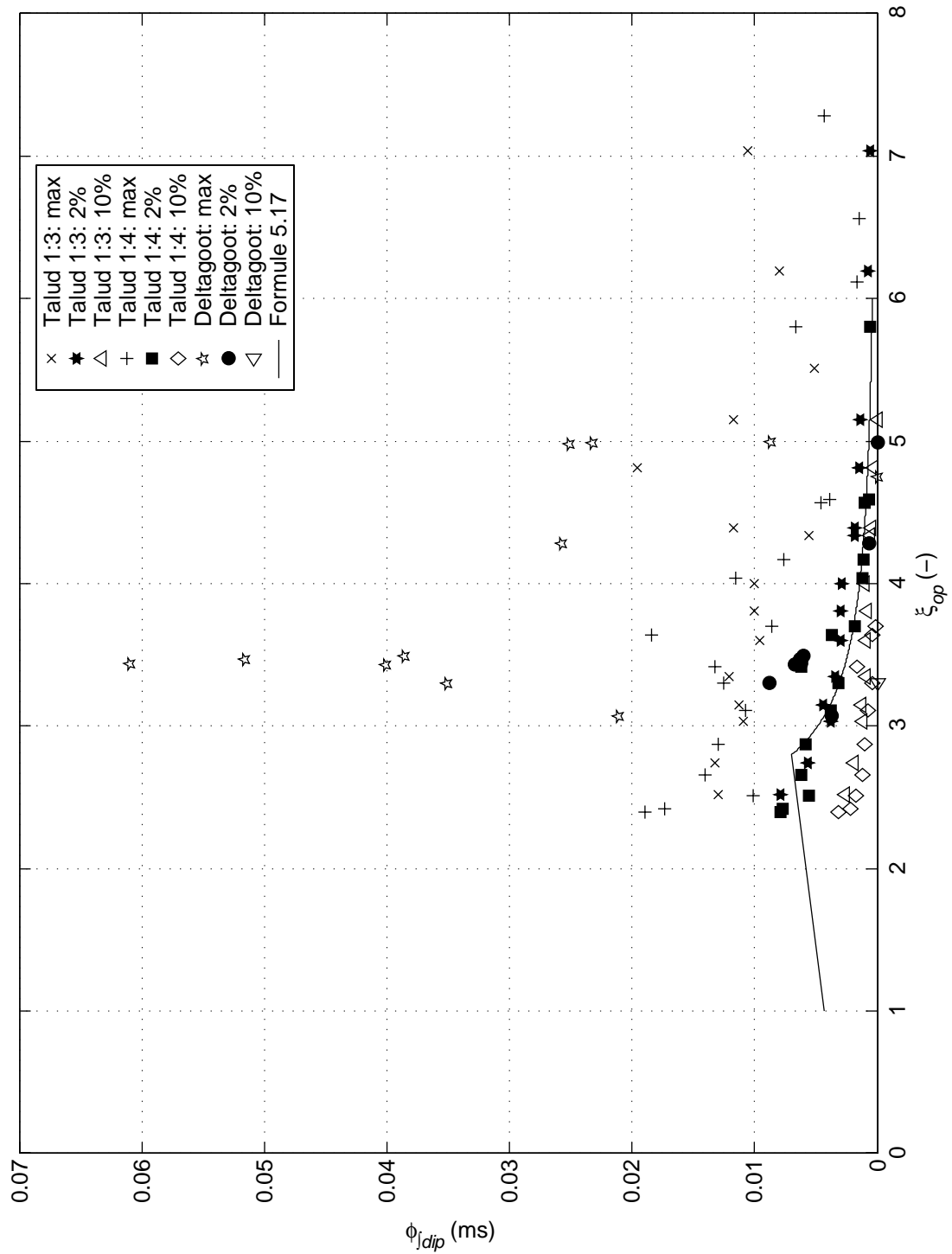
Golfklapduur (t_k) tegen golfsteilheid. Froude-schaling

Grootste 33 % van ϕ_k

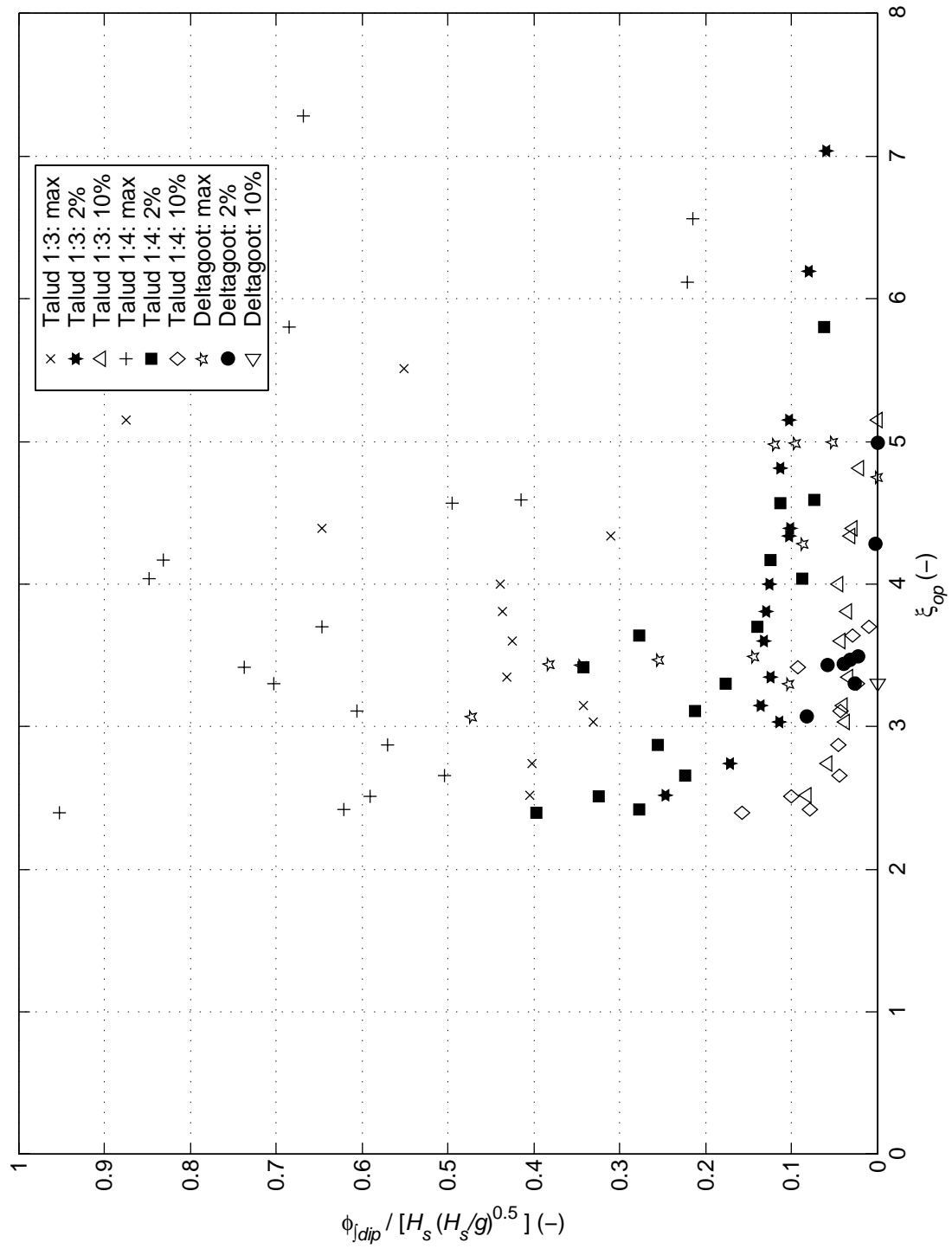


Golfklapduur (t_k) tegen golfsteilheid. Weber-schaling

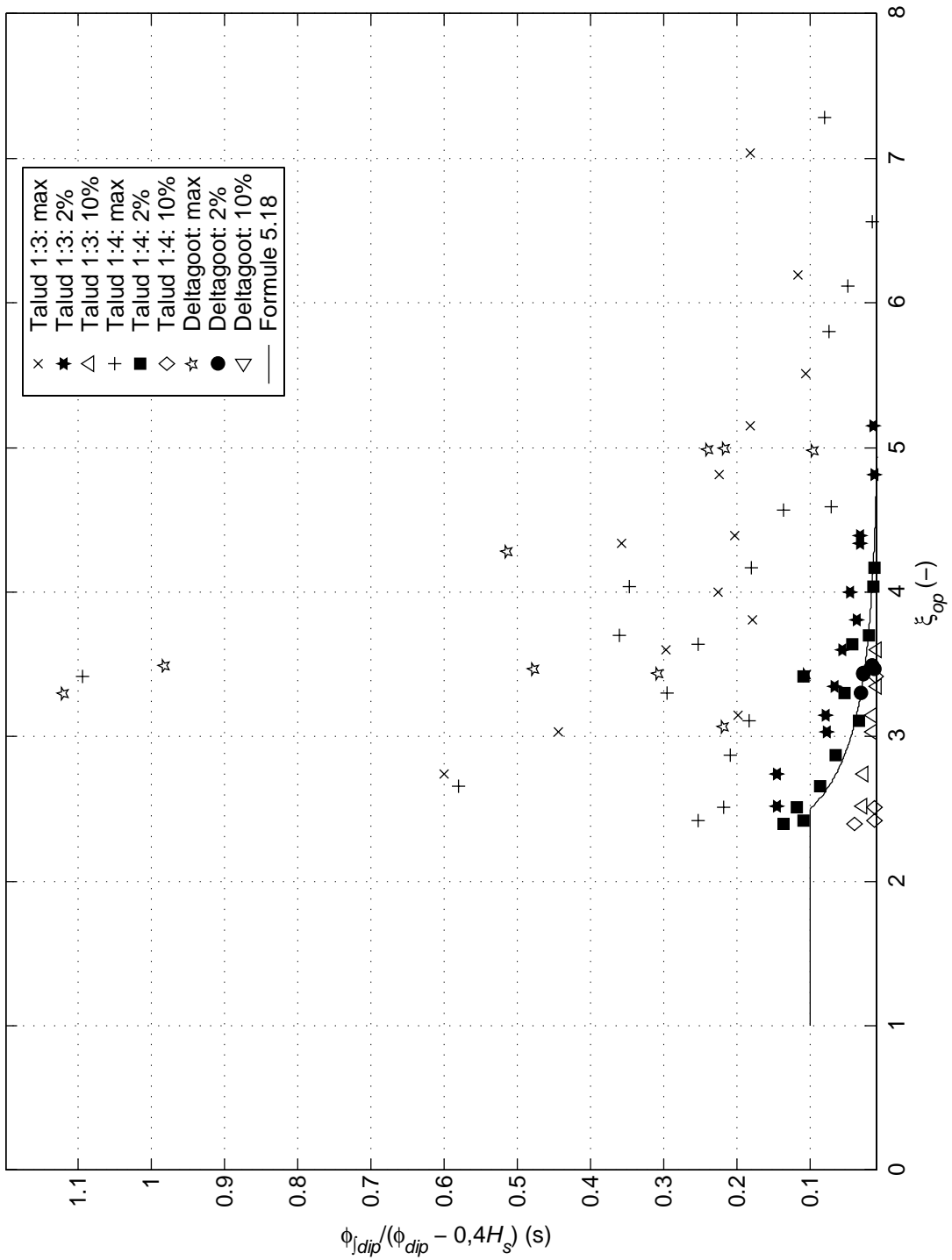
Grootste 33 % van ϕ_k



Geïntegreerde gediptheid tijdens golfklap (ϕ_{djdp})

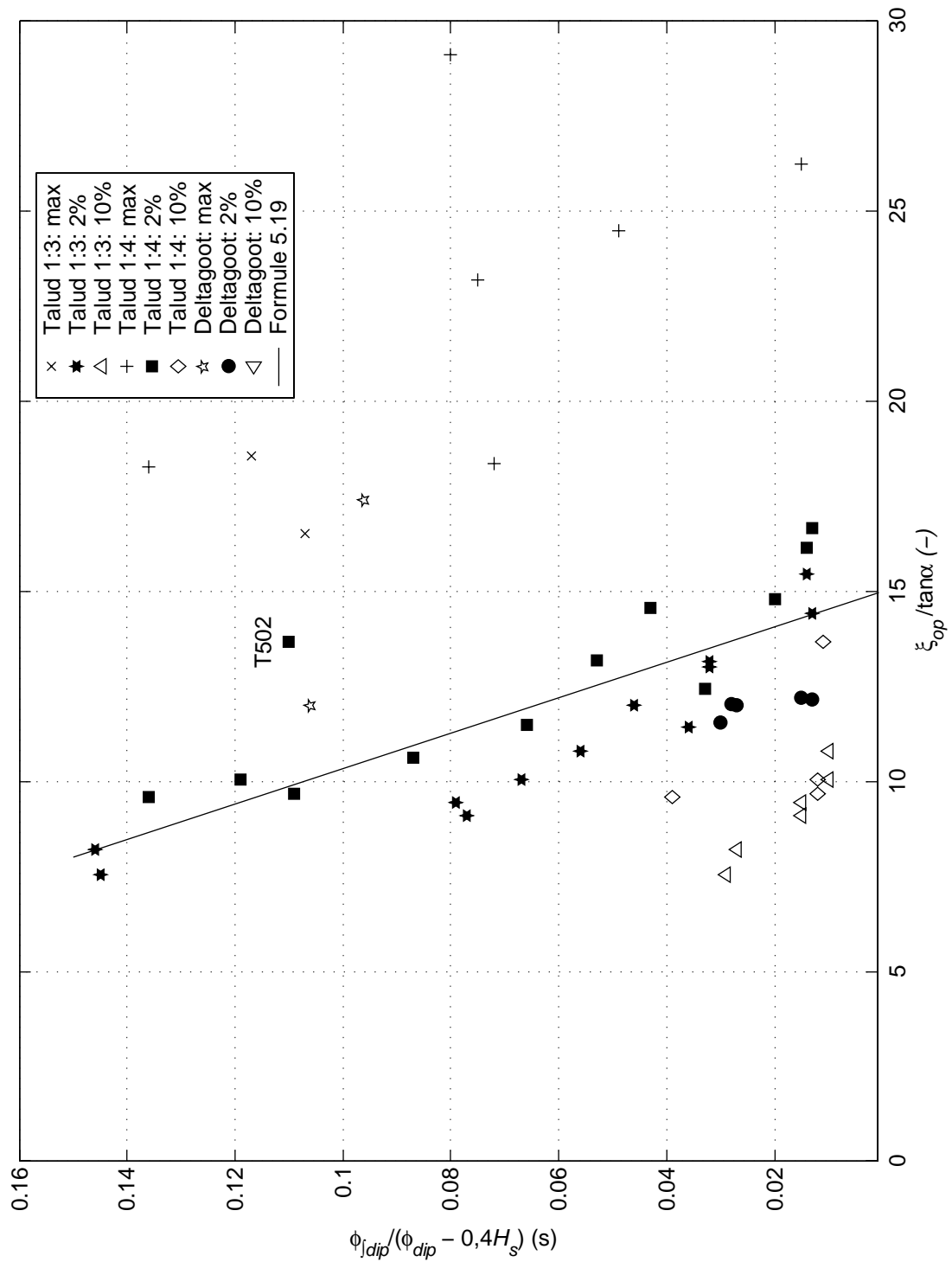


Geïntegreerde gediptheid tijdens golfklap ($\phi_{|dip}$). Froude-schaling



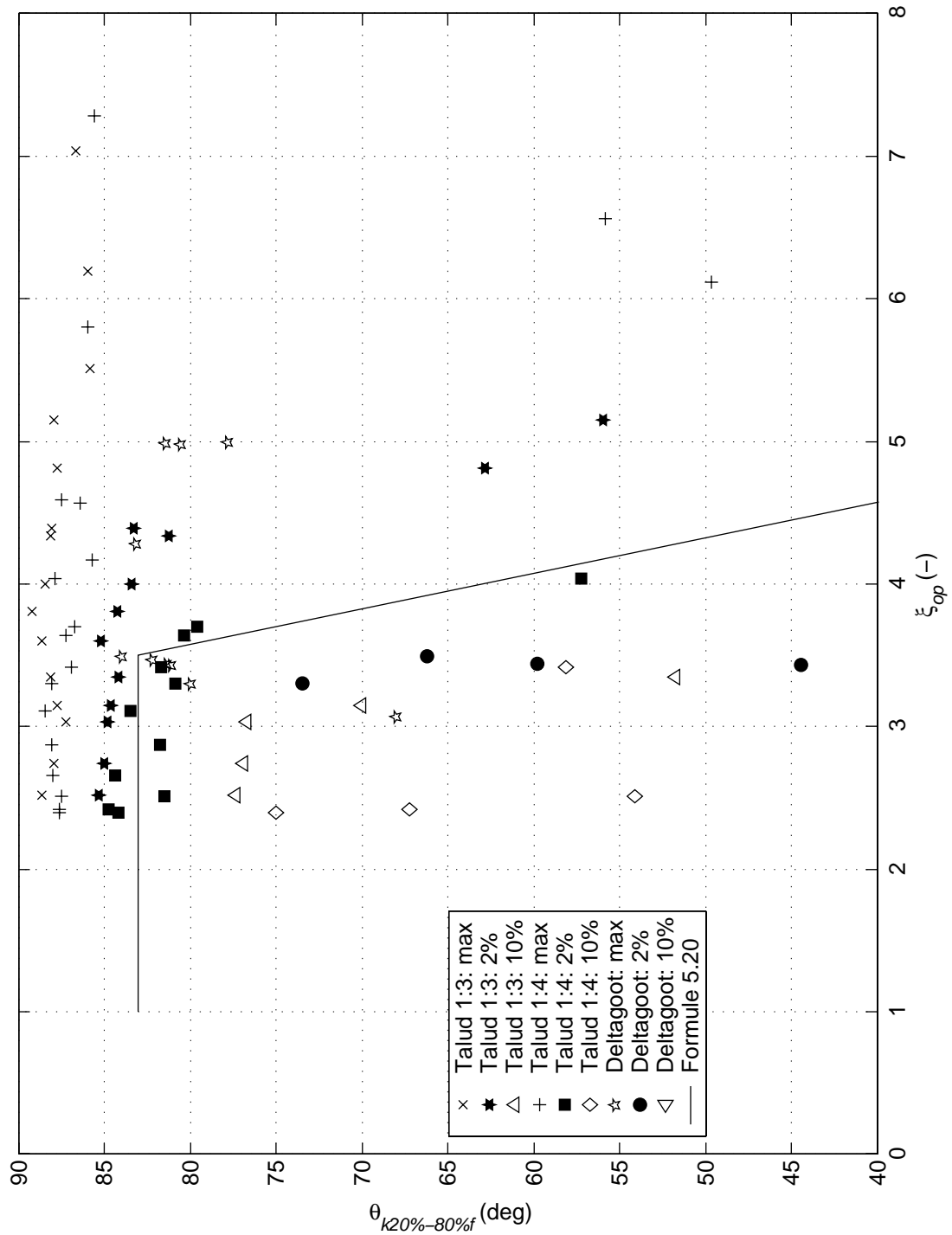
Belastingsduur ($\phi_{jdip} / (\phi_{dip} - 0,4H_s)$) tijdens golfklap

Grootste 33 % van ϕ_k



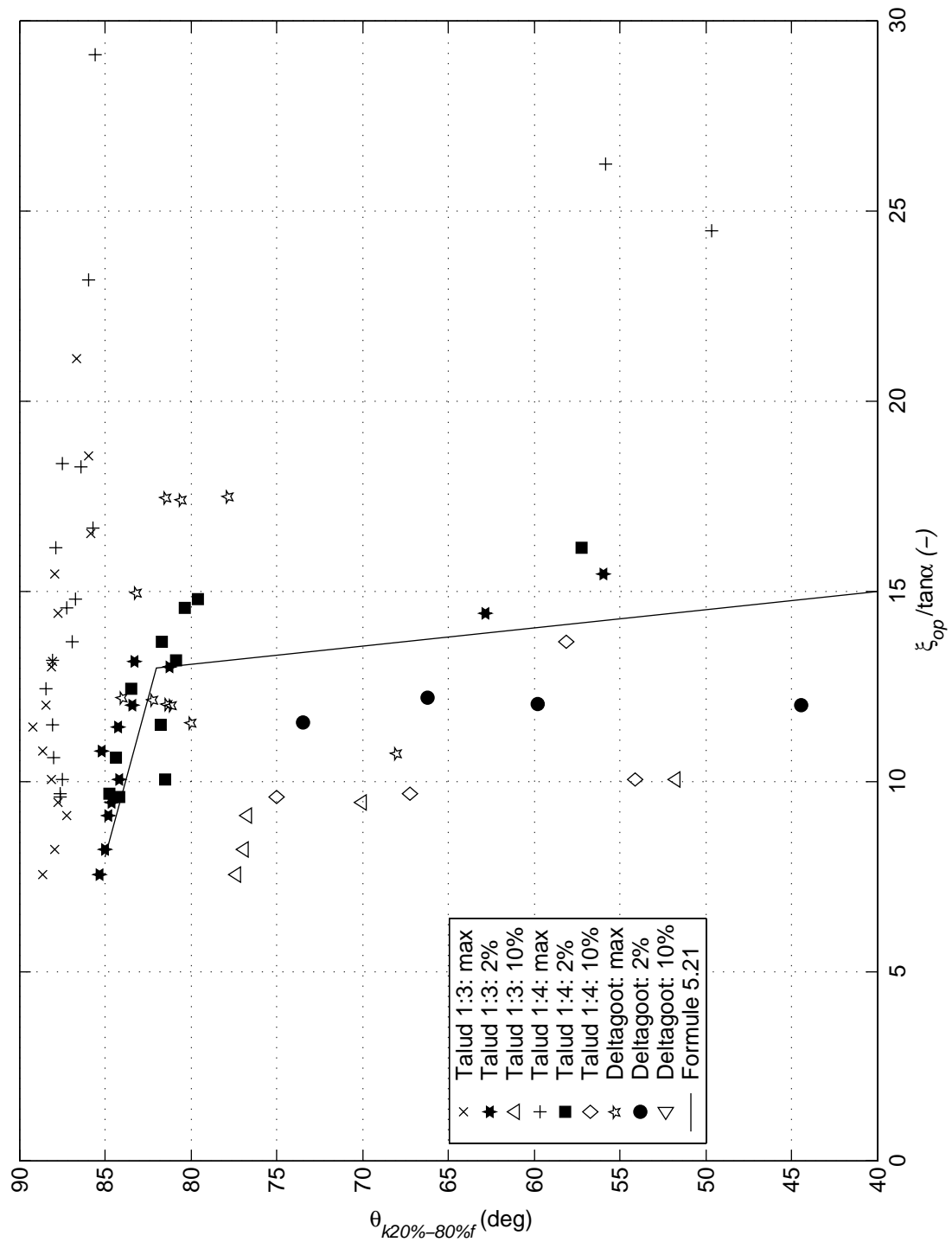
Belastingsduur ($\phi_{djdp} / (\phi_{djdp} - 0,4H_s)$) tijdens golfklap tegen golfsteilheid

Grootste 33 % van ϕ_k



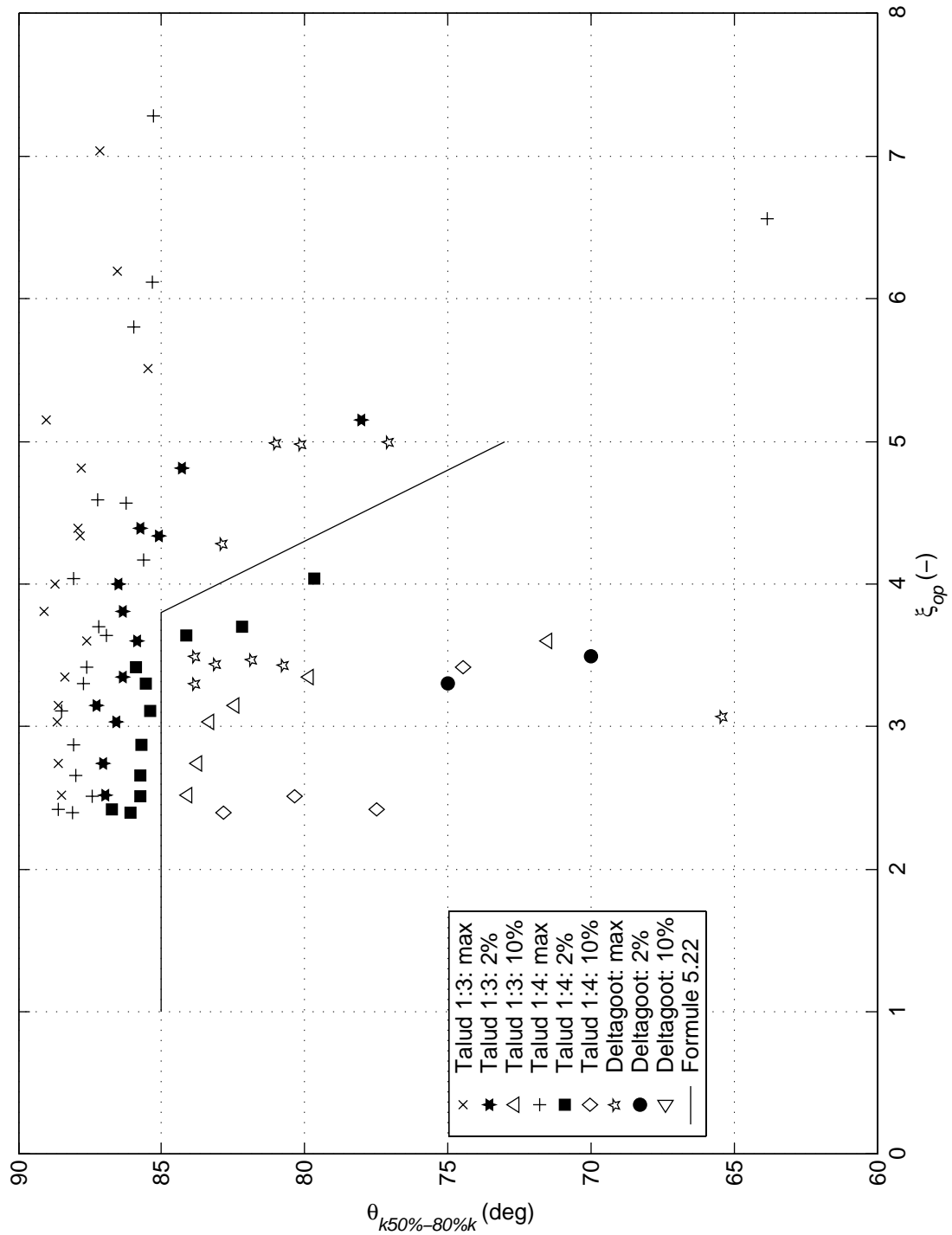
Gradient aan zeezijde van golfklap ($\theta_{k20\%-80\%fl}$)

Grootste 33 % van ϕ_k

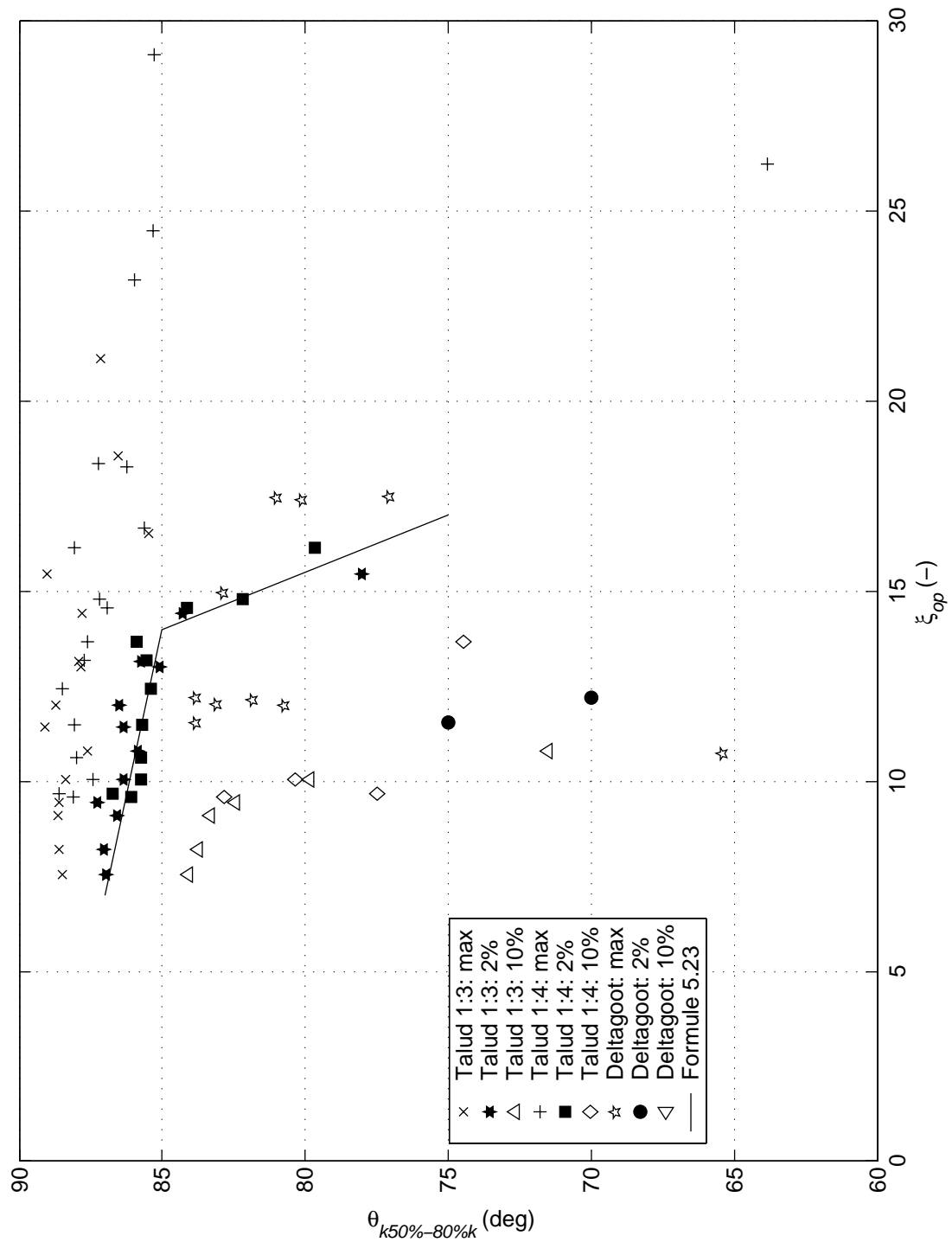


Gradient aan zeezijde van golfklap ($\theta_{k20\%-80\%f}$) tegen golfsteilheid

Grootste 33 % van ϕ_k

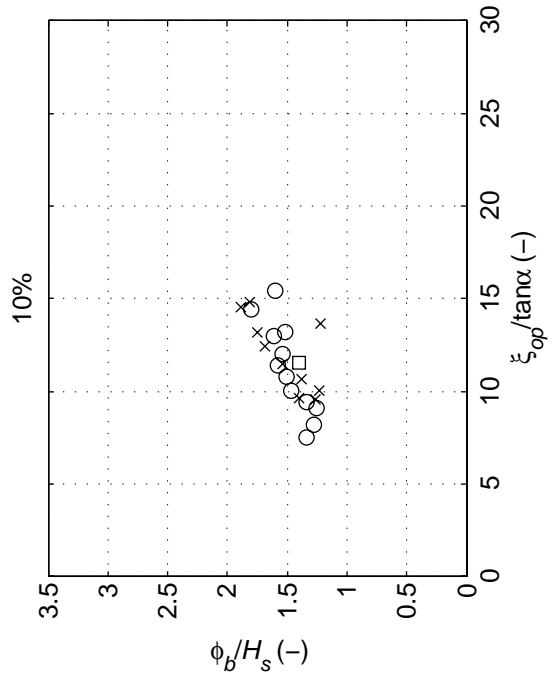
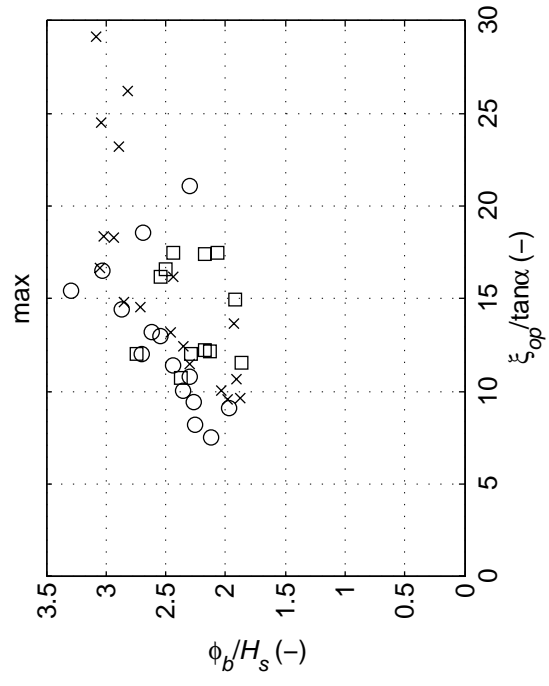
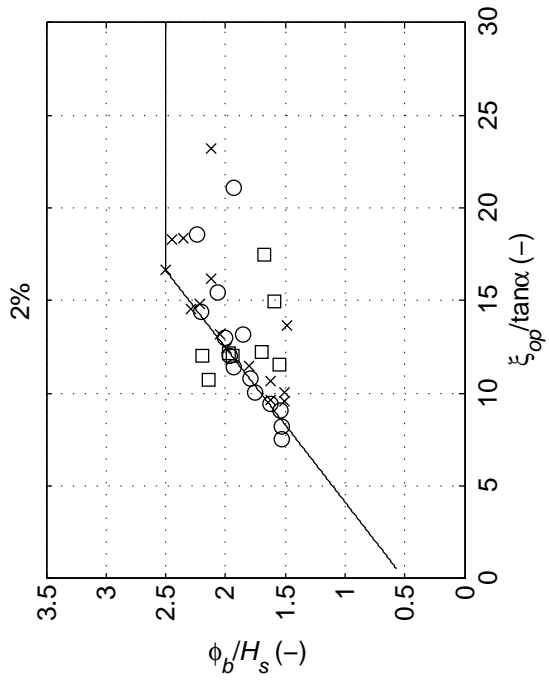


Gradient aan zeezijde van golfklap ($\theta_{k50\%-80\%k}$)		
	Grootste 33 % van ϕ_k	
WL DELFT HYDRAULICS	H4421	Fig. C.56

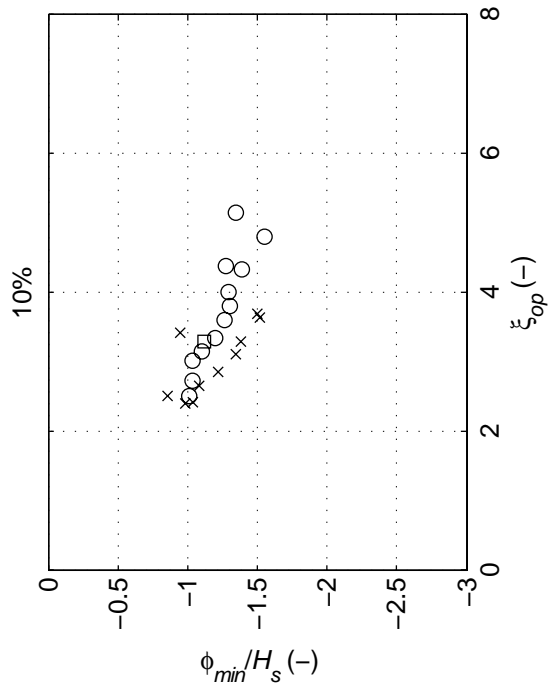
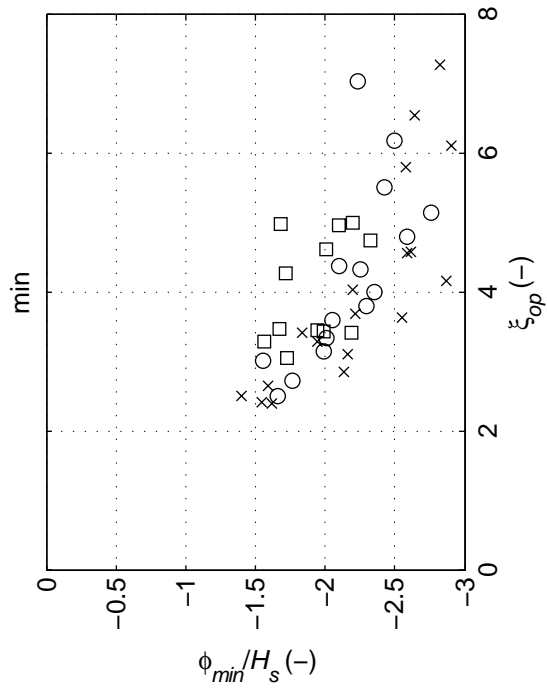
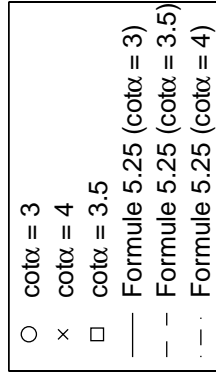
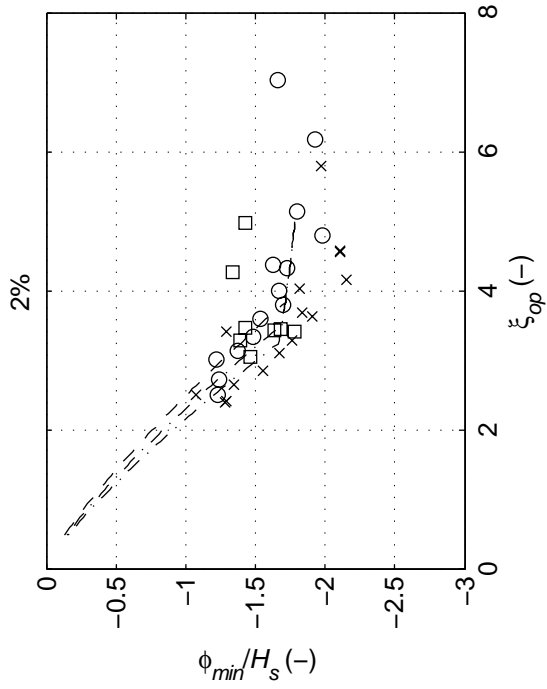


Gradient aan zeezijde van golfklap ($\theta_{k50\%-80\%k}$) tegen golfsteilheid

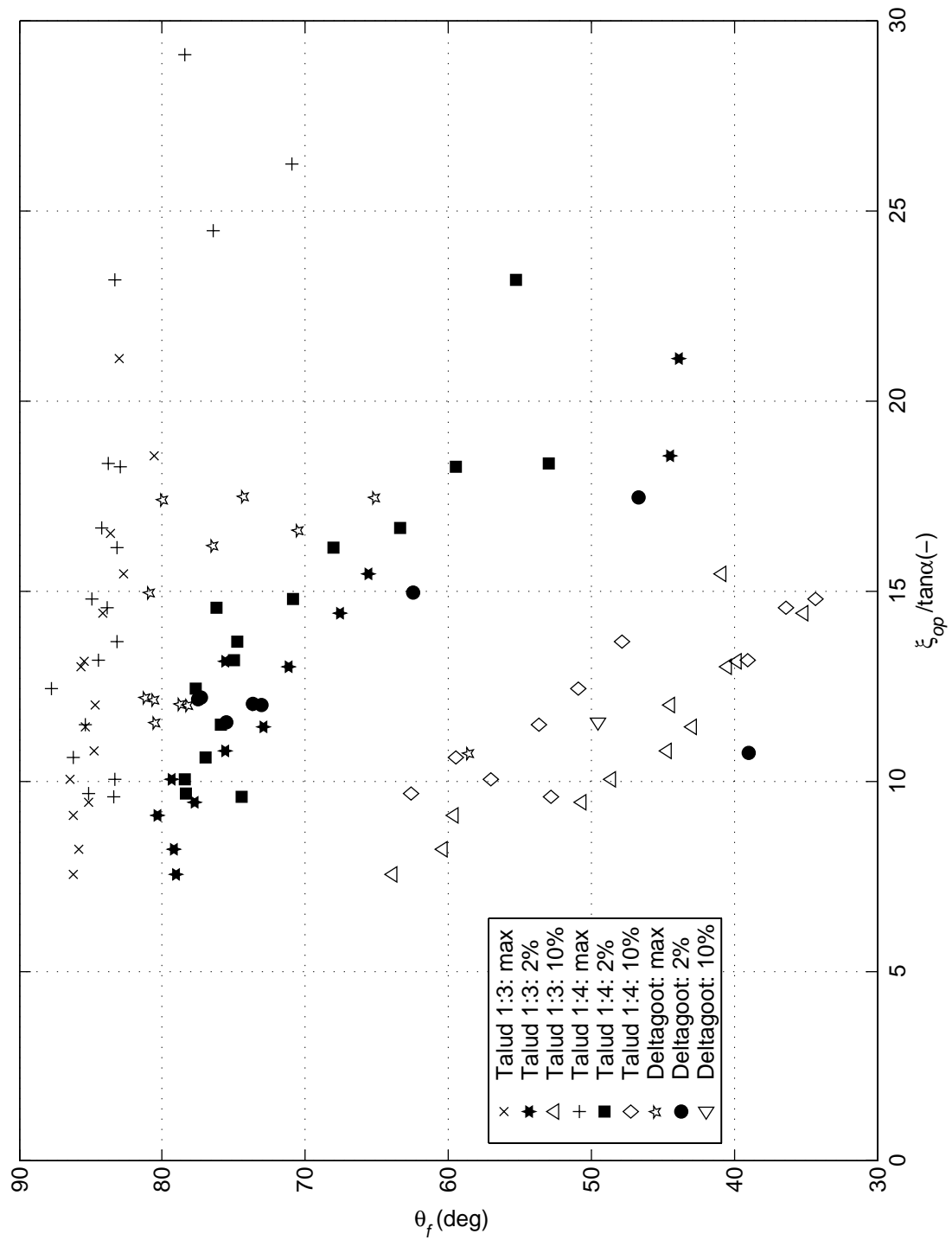
Grootste 33 % van ϕ_k



Hoogte van het golffront (ϕ_b) tegen golfsteilheid

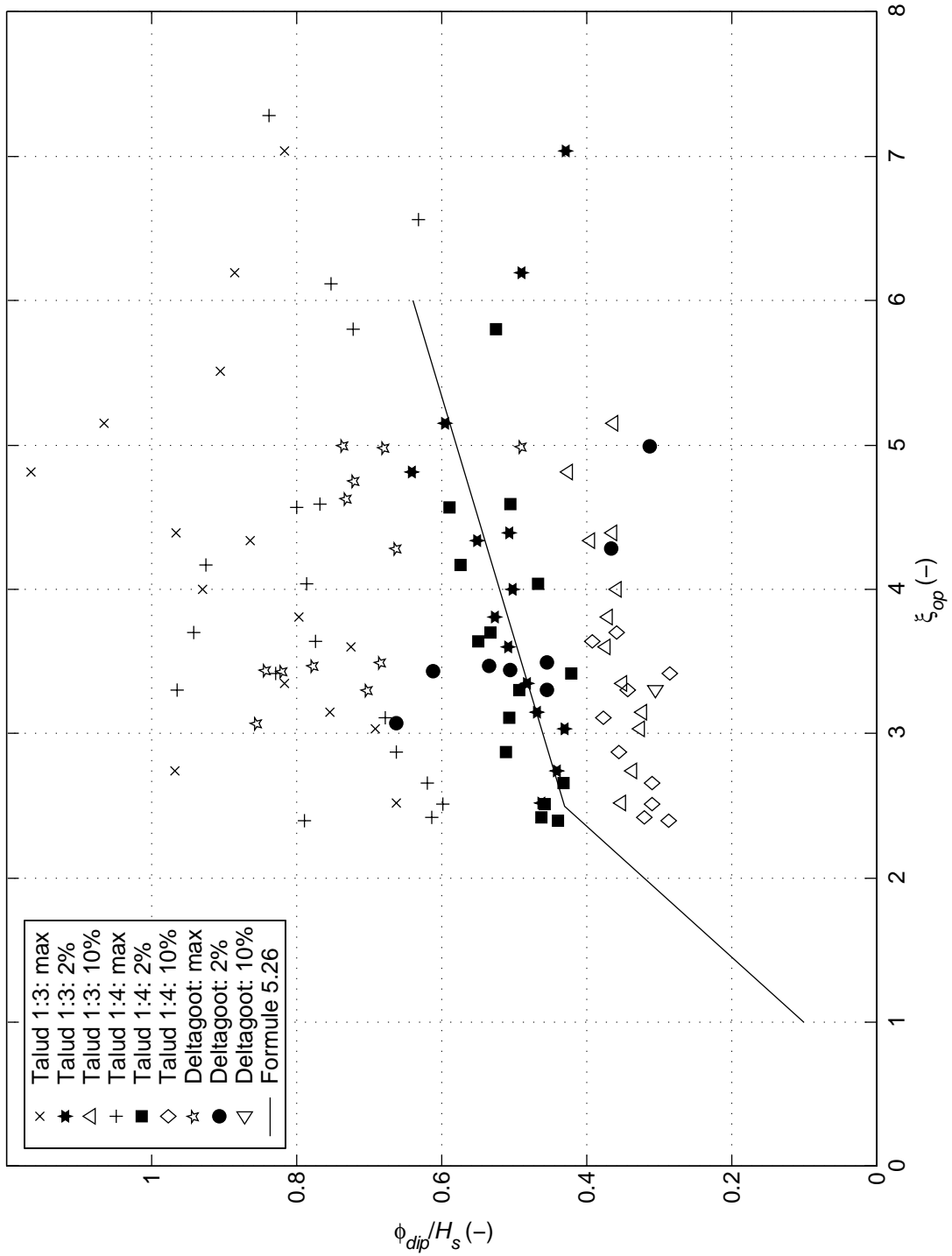


Diepte van het golffront (ϕ_{min})



Helling van het golffront (θ_f) tegen golfsteilheid

Grootste 33 % van ϕ_b



Gediptheid tijdens golffront (ϕ_{dip})