

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat Zeeland,
Projectbureau Zeeweringen

Stabiliteit van steenzettingen op steile taluds

Rapport

februari 2007

Opdrachtgever:

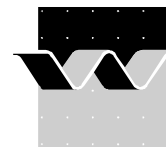
Rijkswaterstaat Zeeland,
Projectbureau Zeeweringen

Stabiliteit van steenzettingen op steile taluds

M. Klein Breteler en I. van der Werf

Rapport

februari 2007



OPDRACHTGEVER: Rijkswaterstaat Zeeland, Projectbureau Zeeweringen					
TITEL: Stabiliteit van steenzettingen op steile taluds					
SAMENVATTING: <p>Ingevolge de Wet op de Waterkering moeten steenzettingen op waterkeringen vijfjaarlijks getoetst worden. In de praktijk blijken sommige steenzettingen zo steil te zijn dat ze niet met de gebruikelijke rekenmodellen beoordeeld kunnen worden. Een steil talud is hier gedefinieerd als een talud met helling van 1:1 tot ca. 1:2,5.</p> <p>Het huidige onderzoek richt zich op het analyseren van oude modelonderzoeken met talud van 1:2, 1:3 en 1:4 en informatie uit de praktijk om daarmee conclusies te kunnen trekken over de te verwachten stabiliteit van steenzettingen op steile taluds.</p> <p>Voorlopig kan geconcludeerd worden dat de stabiliteit van de toplaag van steenzettingen op een steil talud getoetst kan worden met de normale rekenmodellen.</p>					
REFERENTIES: Overeenkomstnummer ZLDO35060396 Projectleider PBZ: Y. Provoost					
VER	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
0	M. Klein Breteler	18 aug. 2006		B. Hofland	M.R.A. van Gent
1	M. Klein Breteler	1 febr. 2006		B. Hofland	M.R.A. van Gent
PROJECTNUMMER:		H4699			
TREFWOORDEN:		golfklappen, golffronten, steenzettingen, modelonderzoek			
AANTAL BLADZIJDEN:		30			
VERTROUWELIJK:		<input type="checkbox"/> JA		<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 symbolen

1	Inleiding	1
2	Modelonderzoek met steile taluds	2
3	Analyse van de belasting	4
4	Ervaring uit de praktijk	8
5	Sterkte	9
6	Conclusies en aanbevelingen	11
	6.1 Conclusies	11
	6.2 Aanbevelingen	11
	Referenties	13

Figurenlijst

1. Modelopstelling Scheldegoot talud 1:2
2. Modelopstelling Scheldegoot talud 1:3
3. Modelopstelling Scheldegoot talud 1:4
4. Belasting tijdens golfklap, gediptheid en maximale stijghoogte t.o.v. trog
5. Belasting tijdens golfklap, maximale stijghoogte op talud en golfklapbreedte
6. Belasting tijdens golffront, fronthoogte
7. Belasting tijdens golffront, fronthelling en minimale stijghoogte aan voet van front
8. Belasting tijdens golffront, gediptheid

Symbolenlijst

$B_{\text{klap}50\%2\%}$	=	breedte van de golfklap halverwege de golfklaphoogte met 2% overschrijdingsfrequentie (m)
D	=	dikte van de toplaag (m)
F	=	$H_s/(\Delta D) \cdot \xi_{\text{op}}^{2/3}$ = stabiliteitsparameter (-)
g	=	versnelling van de zwaartekracht (m/s^2)
H_s	=	significante golfhoogte (op basis van energie) (m)
$H_{\text{m}0}$	=	significante golfhoogte, berekend op basis van energie inhoud (m)
N	=	aantal golven ($= t/T_m \approx 1,1 \cdot t/T_p$) (-)
$p_{\text{max}2\%}$	=	maximale stijghoogte ten opzichte van het talud tijdens de golfklap met 2% overschrijdingsfrequentie (-)
s_{op}	=	golfsteilheid = $H_s/(1,56T_p^2)$ (-)
t	=	belastingduur (s)
T_p	=	golfperiode bij de piek van het spectrum (s)
T_m	=	gemiddelde golfperiode (s)
z	=	niveau t.o.v. de gootbodem (m)
α	=	taludhelling ($^\circ$)
Δ	=	$(\rho_s - \rho)/\rho$ = relatieve soortelijke massa van de stenen (-)
σ_w	=	oppervlaktespanning van het water = 0,073 N/m
$\phi_{\text{b}2\%}$	=	hoogte van het stijghoogtefront met 2% overschrijdingsfrequentie (m)
$\phi_{\text{dip}2\%}$	=	gediptheid tijdens de golfklap met 2% overschrijdingsfrequentie (m)
$\phi_{\text{dip}f2\%}$	=	gediptheid tijdens het golfhoogtefront met 2% overschrijdingsfrequentie (m)
$\phi_{\text{k}2\%}$	=	maximale stijghoogte ten opzichte van de trog tijdens de golfklap met 2% overschrijdingsfrequentie (-)
$\phi_{\text{min}2\%}$	=	minimale stijghoogte op het talud tijdens het optreden van het golfhoogtefront met 2% overschrijdingsfrequentie (m)
ρ_s	=	soortelijke massa van de stenen (kg/m^3)
ρ	=	soortelijke massa van water (kg/m^3)
$\theta_{f2\%}$	=	helling van het stijghoogtefront met 2% overschrijdingsfrequentie ($^\circ$)
ξ_{op}	=	$\tan\alpha/\sqrt{(H_s/(1,56T_p^2))}$ = brekerparameter (-)

I Inleiding

Ingevolge de Wet op de Waterkering moeten steenzettingen op waterkeringen vijfjaarlijks getoetst worden. In de praktijk blijken sommige steenzettingen zo steil te zijn dat ze niet met de gebruikelijke rekenmodellen beoordeeld kunnen worden. Een steil talud is hier gedefinieerd als een talud met helling van 1:1 tot ca. 1:2,5.

Steenzettingen op steile taluds komen in heel Nederland voor. Het betreft dan meestal slechts een smalle strook relatief laag op het talud. De meeste steile steenzettingen komen in Friesland voor, namelijk langs het IJsselmeer (ongeveer bij 50 kilometer dijk) en orde 5 kilometer langs de Waddenzeekust en orde 5 kilometer op Ameland. In Friesland gaat het om totaal 91 dijkvakken met een totaal oppervlak van bijna 200.000 m². Het overgrote deel bestaat uit basalt, en een paar vakken zijn bekleed met Basalton. De zuilen variëren in hoogte van 20 tot 45 cm. De onderkant van de bekleding ligt meestal vrij laag, namelijk aan de teen van de dijk. De taludhelling is gemiddeld 1:1,8.

Dit onderzoek richt zich op het analyseren van oude modelonderzoeken en informatie uit de praktijk om daarmee conclusies te kunnen trekken over de te verwachten stabiliteit van steenzettingen op steile taluds. De invloed op de belasting en die op de sterkte zijn apart behandeld.

Het onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het Projectbureau Zeeweringen van Rijkswaterstaat Zeeland, en inhoudelijk begeleid door de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat.

2 Modelonderzoek met steile taluds

Het enige ons bekende modelonderzoek met steile taluds, dat bruikbaar is voor het beoordelen van de belasting op steenzettingen, is het onderzoek in de Scheldegoot van 1987. De rapportage van dit onderzoek is opgenomen in het verzamelverslag van Klein Breteler (1990; sectie 3).

Het onderzoek is destijds grotendeels uitgevoerd met regelmatige golven ten behoeve van de schematisatie van het stijghoogteverloop op de toplaag in ANAMOS (de zogenaamde Banach-proeven). Daarnaast zijn ook een aantal proeven uitgevoerd met onregelmatige golven die in het huidige onderzoek interessanter zijn.

Het onderzoek is uitgevoerd met een glad recht talud met een helling van respectievelijk 1:2, 1:3 en 1:4. In het talud waren 14 tot 18 drukopnemers aangebracht. De signalen van deze drukopnemers zijn bemonsterd met 25 Hz. Tekeningen van de modelopstelling zijn gegeven in figuur 1 t/m 3.

Het proevenprogramma met onregelmatige golven is weergegeven in tabel 2.1. Al deze proeven zijn uitgevoerd met een Jonswap spectrum.

proef	H_s (m)	T_p (s)	$\tan\alpha$ (-)	S_{op} (-)	ξ_{op} (-)
sp231	0,11	1,33	0,50	0,040	2,51
sp232	0,13	1,29	0,50	0,050	2,24
sp233	0,12	1,79	0,50	0,025	3,18
sp234	0,21	1,80	0,50	0,042	2,44
sp235	0,17	2,92	0,50	0,013	4,47
sp236	0,22	2,91	0,50	0,017	3,84
sp237	0,11	4,80	0,50	0,003	9,12
sp238	0,14	4,73	0,50	0,004	7,82
sp331	0,11	1,32	0,33	0,039	1,68
sp332	0,13	1,29	0,33	0,050	1,49
sp333	0,12	1,79	0,33	0,024	2,16
sp334	0,21	1,77	0,33	0,042	1,62
sp335	0,18	2,95	0,33	0,013	2,88
sp336	0,22	2,97	0,33	0,016	2,66
sp337	0,10	2,44	0,33	0,011	6,19
sp338	0,14	4,71	0,33	0,004	5,26
sp431	0,10	1,32	0,25	0,037	1,30
sp432	0,13	1,29	0,25	0,050	1,12
sp433	0,12	1,78	0,25	0,025	1,60
sp434	0,21	1,77	0,25	0,042	1,22
sp435	0,18	2,93	0,25	0,013	2,17
sp436	0,22	2,93	0,25	0,016	1,97
sp437	0,10	4,67	0,25	0,003	4,68
sp438	0,13	4,67	0,25	0,004	4,01

Tabel 2.1, uitgevoerde proeven met onregelmatige golven

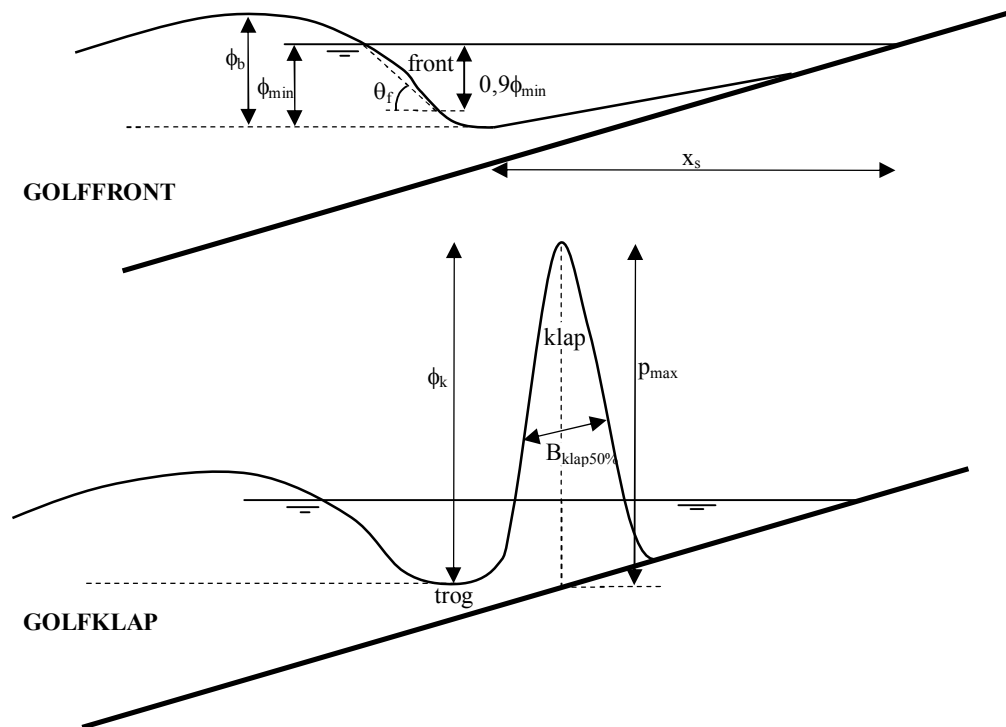
De instrumentatie en de bemonsteringsfrequentie van deze proeven is helaas vrij beperkt, waardoor de nauwkeurigheid van de metingen niet zo groot is. Desondanks zijn ze geschikt om de tendenzen vast te stellen, zoals de eventuele verandering van de grootte van de golfklap met het steiler worden van het talud.

De bestanden met gemeten stijghoogteverloop op het talud zijn geanalyseerd met het Matlab-programma ANALYSEWAVE, dat beschreven is door Klein Breteler e.a. (2006). Dit programma identificeert per golf het moment van het optreden van het golffront en de golfklap en bepaalt de relevante eigenschappen van het front en de klap, zoals de helling en hoogte van het stijghoogtefront, de maximale stijghoogte in de golfklap, de duur van de golfklap, de breedte ervan, etc..

Vervolgens zijn voor elke proef de waarden van de eigenschappen met 2%-overschrijdingsfrequentie bepaald. De uitkomsten van deze analyse zijn gepresenteerd in hoofdstuk 3.

3 Analyse van de belasting

De resultaten van het modelonderzoek in de Scheldegoot dat beschreven is in hoofdstuk 2, zijn geanalyseerd met het Matlab-programma ANALYSEWAVE. Dit heeft de statistische eigenschappen van de belasting (golfklappen en golffronten) opgeleverd waarmee de invloed van de taludhelling kan worden onderzocht. De aandacht is uitsluitend gericht op de waarden met een overschrijdingsfrequentie van 2%. De wijze van analyseren is sterk vergelijkbaar met die van Klein Breteler e.a. (2006). De geanalyseerde eigenschappen van het golffront en de golfklap zijn in onderstaande figuur weergegeven (behalve de gediptheid).



Figuur 3.1, Stijghoogteverloop op de toplaag tijdens het golffront en tijdens de golfklap

De proefresultaten zijn weergegeven in figuur 4 t/m 8 (achterin dit verslag). In figuur 4 zijn de gediptheid tijdens de golfklap ($\phi_{dip2\%}$) en de maximale stijghoogte tijdens de golfklap ($\phi_{k2\%}$, ten opzichte van de stijghoogte in de trog, zeewaarts van de golfklap) gegeven. De gediptheid is het grootste verschil op een bepaald moment tussen de stijghoogte op het talud en het met een voortschrijdend gemiddelde afgevlakte verloop van de stijghoogte op het talud. Het is daardoor een goede maat voor het te verwachten stijghoogteverschil over de toplaag. De gediptheid en de maximale stijghoogte zijn weergegeven met een gecombineerde Froude/Weber schaling. In navolging van Klein Breteler e.a. (2006) zijn de metingen uitgezet als functie van $\xi_{op}/\tan\alpha$. Dit is gelijk aan $1/\sqrt{s_{op}}$, met:

$$s_{op} = \frac{H_s}{L_{op}} = \frac{H_s}{\frac{g}{2\pi} T_p^2} \approx \frac{H_s}{1,56 T_p^2} \quad (3.1)$$

$$\xi_{op} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_{op}}} \quad (3.2)$$

met:

H_s = significante golfhoogte (op basis van energie) (m)

ξ_{op} = brekerparameter (-)

s_{op} = golfsteilheid op basis van diepwater golfenlengte (-)

L_{op} = diepwater golfenlengte op basis van T_p (-)

T_p = golfperiode bij de piek van het spectrum (s)

α = taludhelling ($^\circ$)

g = versnelling van de zwaartekracht (m/s^2)

In figuur 4 is ook het empirische verband gegeven van Klein Breteler e.a. (2006), namelijk:

$$\left(\frac{\phi_{dip2\%}}{H_s} \right) \left(\frac{\rho g H_s^2}{\sigma_w} \right)^{0,14} = \left(3 + 0,05 \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} \right) \quad \text{voor } 4,8 < \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} \leq 10,5 \quad (3.3)$$

$$\left(\frac{\phi_{k2\%}}{H_s} \right) \left(\frac{\rho g H_s^2}{\sigma_w} \right)^{0,2} = \left(23,3 - 0,79 \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} \right) \quad \text{voor } 4,5 \leq \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} \leq 25 \quad (3.4)$$

Met:

$\phi_{k2\%}$ = maximale stijghoogte ten opzichte van de trog tijdens de golfklap met 2% overschrijdingsfrequentie (-)

σ_w = oppervlaktespanning van het water = 0,073 N/m

$\phi_{dip2\%}$ = gediptheid tijdens de golfklap met 2% overschrijdingsfrequentie (m)

Het blijkt dat de huidige meetpunten veel lager liggen. Dit is een gevolg van het feit dat de onderlinge afstand tussen de drukopnemers in de modelopstelling vrij groot was en bovendien de bemonsteringsfrequentie vrij laag was. Daardoor is de nauwkeurigheid van de metingen niet zo groot met een onderschatting van de belasting als consequentie.

Uit de resultaten van Klein Breteler e.a. (2006) blijkt dat de invloed van de bemonsteringsfrequentie en de relatieve drukopnemerafstand op de resultaten vrijwel gelijk is voor de twee onderzochte taludhellingen. Daarom wordt aangenomen dat de beperkte nauwkeurigheid door de bemonsteringsfrequentie en relatieve drukopnemerafstand een ongeveer gelijke invloed heeft op zowel de metingen met steile als met normale taluds, waardoor toch de invloed van de taludhelling in deze figuur beoordeeld kan worden.

Hoewel de spreiding in de metingen vrij groot is, blijkt dat de gediptheid en maximale stijghoogte in de golfklap op een talud van 1:2 niet wezenlijk groter of kleiner is dan op een talud van 1:3 en 1:4.

In figuur 5 zijn de gemeten waarden met overschrijdingsfrequentie van 2% gegeven van de en maximale stijghoogte tijdens de golfklap ten opzichte van het taludoppervlak, $p_{max2\%}$, en de breedte van golfklap halverwege de golfklaphoogte ($B_{klap50\%2\%}$). Deze metingen zijn uitgezet tegen respectievelijk $\xi_{op}/\tan \alpha$ en ξ_{op} . De maximale stijghoogte in de golfklap is weer weergegeven met een gecombineerde Froude/Weber schaling (Klein Breteler e.a. 2006) en de breedte van de golfklap met een gewone Froude-schaling. De empirische relaties zijn:

$$\left(\frac{p_{\max 2\%}}{H_s}\right) \left(\frac{\rho g H_s^2}{\sigma_w}\right)^{0,1} = 12 - 0,28 \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha}; \text{ voor } 3 \leq \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} \leq 24 \quad (3.5)$$

$$\frac{B_{\text{klap } 50\%2\%}}{H_s} = 0,96 - 0,11 \xi_{op} \quad \text{voor } 1 \leq \xi_{op} < 5,5 \quad (3.6)$$

Met:

$p_{\max 2\%}$ = maximale stijghoogte ten opzichte van het talud tijdens de golfklap met 2% overschrijdingsfrequentie (-)

$B_{\text{klap } 50\%2\%}$ = breedte van de golfklap halverwege de golfklaphoogte met 2% overschrijdingsfrequentie (m)

De maximale stijghoogte in de golfklap is weer veel lager dan volgens de empirische relatie van Klein Breteler e.a. (2006) vanwege de beperkte instrumentatiedichtheid en bemonsteringsfrequentie. Om dezelfde reden is de breedte van golfklappen juist wat groter.

In de figuur is verder te zien dat de maximale stijghoogte ten opzichte van het talud, $p_{\max 2\%}$, op een talud van 1:2 iets groter is dan op een talud van 1:3 en die is weer iets groter dan op een talud van 1:4. Hier blijkt dus een invloed van de taludhelling zichtbaar te zijn.

In de metingen van de breedte van golfklappen blijkt geen bijzondere invloed van de taludhelling te zien te zijn.

In figuur 6 is de gemeten hoogte van het front, $\phi_{b2\%}$, gegeven als functie van respectievelijk $\xi_{op}/\tan \alpha$ en $\xi_{op}/(\tan \alpha)^{0,75}$. In de bovenste figuur is ook de empirische relatie van Klein Breteler e.a. (2006) gegeven, waarin in feite de taludhelling ontbreekt omdat $\xi_{op}/\tan \alpha = 1/\sqrt{s_{op}}$:

$$\frac{\phi_{b2\%}}{H_s} = \min \left\{ 0,5 + 0,12 \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} ; 2,3 \right\} \quad (3.7)$$

Met:

$\phi_{b2\%}$ = hoogte van het stijghoogtefront met 2% overschrijdingsfrequentie (m)

Het valt op dat de punten met grote waarde van $\xi_{op}/\tan \alpha$ veel lager liggen dan de empirische relatie. Dit komt waarschijnlijk doordat de drukopnemers niet diep genoeg op het talud zaten, zodat een deel van het front niet gemeten is. Deze metingen zijn uitgevoerd met relatief lange golven, waarbij de top van het front vrij ver van de waterlijn ligt. Hierdoor ontstaat een onderschatting van de hoogte van het stijghoogtefront.

In de onderste figuur is de relatie van De Waal e.a. (1995) gegeven. In die relatie is de hoogte van het front weinig afhankelijk van de taludhelling, namelijk evenredig met $\tan \alpha^{0,25}$:

$$\frac{\phi_{b2\%}}{H_s} = \min \left\{ 0,27 \frac{\xi_{op}}{(\tan \alpha)^{0,75}} ; 2,5 \right\} \quad (3.8)$$

Doordat in de onderste grafiek in figuur 6 de invloed van de taludhelling op de horizontale as wat anders verwerkt is, geeft deze figuur een beduidend kleinere spreiding dan de bovenste figuur en vallen de punten met steil talud mooi tussen de punten met een normaal talud. De relatie van Klein Breteler sluit wat beter aan op de wat meer nauwkeurige

metingen van de afgelopen jaren, terwijl die van De Waal beter aansluit op de oude metingen uit de 80-er jaren.

Uit de figuur blijkt dat er geen andere invloed van de taludhelling te zijn op de hoogte van het stijghoogtefront, dan de invloed die al verwerkt is in de formule.

In de bovenste grafiek van figuur 7 is de helling van het stijghoogtefront gegeven. Door de vrij grote onderlinge afstand tussen de drukopnemers blijkt deze helling niet goed gemeten te kunnen worden. De punten liggen verspreid over de hele figuur. Voor de empirische relatie van Klein Breteler e.a. (2006) geldt:

$$\tan \theta_{f2\%} = \max \left\{ 1; \min \left\{ 8,8 - 0,41 \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha}; 5 \right\} \right\} \quad (3.9)$$

Met:

$\theta_{f2\%}$ = helling van het stijghoogtefront met 2% overschrijdingsfrequentie ($^{\circ}$)

In de onderste grafiek is de minimale stijghoogte aan de voet van het front gegeven als functie van $\xi_{op}/\sqrt{\tan \alpha}$, in navolging van De Waal e.a. (1995) en Klein Breteler e.a. (2006), met de volgende empirische relatie van de laatstgenoemde:

$$\frac{\phi_{min2\%}}{H_s} = \max \left\{ -0,16 \left(\frac{\xi_{op}}{\sqrt{\tan \alpha}} \right)^{1,25}; \frac{-2,5}{1 + 0,9/\sqrt{\xi_{op}}} \right\} \quad (3.10)$$

Met:

$\phi_{min2\%}$ = minimale stijghoogte op het talud tijdens het optreden van het golffront met 2% overschrijdingsfrequentie (m)

Voor $\xi_{op}/\sqrt{\tan \alpha} < 7$ sluit de empirische relatie mooi aan op de metingen en liggen de punten met een steil talud tussen de punten van de normale taluds. Voor $\xi_{op}/\sqrt{\tan \alpha} > 7$ is de spreiding erg groot.

De gemeten gediptheid tijdens het golffront is gegeven in figuur 8. Ook in deze figuur is te zien dat het steile talud geen wezenlijk ander resultaat geeft dan de normale taluds. Voor de in deze figuur getekende empirische relatie van Klein Breteler e.a. (2006) geldt:

$$\begin{cases} \frac{\phi_{dip2\%}}{H_s} = 0,15\xi_{op} + 0,055; & \text{voor } 1 \leq \xi_{op} < 2,5 \\ \frac{\phi_{dip2\%}}{H_s} = 0,06\xi_{op} + 0,28; & \text{voor } 2,5 \leq \xi_{op} < 6 \end{cases} \quad (3.11)$$

Met:

$\phi_{dip2\%}$ = gediptheid tijdens de golffront met 2% overschrijdingsfrequentie (m)

4 Ervaring uit de praktijk

Er zijn over het algemeen nauwelijks problemen met steenzettingen op steile taluds, mede omdat ze vrij laag op het talud zitten. Daar treedt geregeld een hoge belasting op en zullen te dunne steenzettingen in het verleden al lang verbeterd zijn.

Dit opent de mogelijkheid om gebruik te maken van ‘bewezen sterkte’. Als op een bepaald dijkvak een bekleding op een steil talud een zware storm al weerstaan heeft, levert dat informatie over de kennelijke stabiliteit van de bekleding. Als elders een bekleding aanwezig is waar dezelfde golfcondities onder toetsomstandigheden optreden en de bekleding is verder gelijk of sterker, dan zou die bekleding goedgekeurd kunnen worden op basis van het principe van bewezen sterkte.

Vanuit het Projectbureau Zeeweringen kon helaas geen concrete informatie aangeleverd worden op basis waarvan het principe van bewezen sterkte toegepast kan worden. Het actief zoeken naar informatie valt buiten de scope van dit onderzoek.

5 Sterkte

In het vorige hoofdstuk is uitsluitend gekeken naar het verschil in belasting tussen een steil talud en een normaal talud. Daarnaast is het denkbaar dat er een verschil in sterkte zou kunnen zijn.

Het is denkbaar dat het inwasmateriaal uit een bekleding op een steil talud gemakkelijker uitspoelt dan op een normaal talud. Dit zou een negatieve invloed kunnen hebben op de langeduursterkte.

Anderzijds zou de sterkte groter kunnen zijn omdat op een steil talud alle stenen een relatief grote gewichtcomponent parallel aan het talud hebben waardoor ze met grote kracht tegen elkaar gedrukt worden. Deze kracht evenwijdig aan het talud is evenredig met $\sin\alpha$. Dit kan leiden tot een erg grote klemming waardoor de stabiliteit relatief groot is. Deze invloed is waarschijnlijk groter dan de geringere gewichtcomponent haaks op het talud, die evenredig is met $\cos\alpha$.

Een aanwijzing daarvoor komt van een relatief zwakke steenzetting direct op zand, die toegepast is tijdens het modelonderzoek in de Deltagoot naar duinafslag (Coeveld et al, 2006). Het was de bedoeling dat deze steenzetting snel zou bezwijken en daarom was de toplaag dun en is er geen moeite gedaan om met een granulaair filter of geotextiel het uitspoelen van het zand door de spleten tegen te gaan. De toplaag bestond uit stenen van $10 \times 10 \text{ cm}^2$ en 8 cm dik (sierbestrating) met een soortelijke massa van ongeveer 2300 kg/m^3 . De taludhelling was 1:1,5 met een lang en flauw voorland voor de constructie. Door dit voorland waren de golven bij de teen niet zo groot, namelijk naar schatting: $H_s \approx 0,6$ à $0,7 \text{ m}$ en $T_p \approx 6 \text{ s}$ ($s_{op} \approx 0,012$). De golfcondities aan de teen van de constructie zijn niet precies bekend omdat de golven aan het breken waren op het voorland en de golfcondities alleen op enige afstand van de constructie zijn gemeten.

Hoewel de steenzetting voornamelijk boven de stilwaterlijn is aangebracht, was er door golfopzet en de aanwezigheid van lange golven toch een directe belasting van de steenzetting. Dit is te zien in figuur 5.1.



Figuur 5.1, Dunne steenzetting in de Deltagoot, voor de proef en tijdens de golfbelasting

Ondanks dat de belasting voor deze steenzetting zeer groot was ($\xi_{op} \approx 6$; $F = \xi_{op}^{2/3} \cdot H_s / (\Delta D) \approx 20$) heeft de steenzetting nog ongeveer een half uur standgehouden: na 23 minuten golven is de eerste steen uit de bekleding geslagen, en na 40 minuten was de steenzetting geheel verdwenen. Tijdens deze proef was de indruk ontstaan dat dit een gevolg was van het feit dat alle stenen zwaar op elkaar leunden en er daardoor een zeer goede interactie tussen de stenen aanwezig was.

Mocht de inwassing van een steenzetting op een steil talud vrij snel uitspoelen, dan nog is het gezien het bovenstaande de verwachting dat de klemming toch vrij groot zal blijven. Op basis van dit gegeven kan geconcludeerd worden dat de sterkte van een steenzetting op een steil talud waarschijnlijk niet kleiner is dan die op een normaal talud.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

In dit verslag is eerst op basis van modelonderzoek met een taludhelling van 1:2, 1:3 en 1:4 uit 1987 beoordeeld of de belasting op een steenzetting op een steil talud anders is dan op een normaal talud. Een talud is steil als de helling 1:1 à 1:2,5 is. De metingen waren helaas uitgevoerd met betrekkelijk weinig drukopnemers die redelijk ver uit elkaar zaten en met een vrij lage bemonsteringsfrequentie zijn bemeten. Daardoor is de nauwkeurigheid van de metingen niet zo groot, maar er is aannemelijk gemaakt dat de trends in de metingen toch bruikbaar zijn om conclusies over steile taluds op te baseren.

Uit de analyse van de metingen blijkt dat de belasting op steile taluds (stijghoogteverloop tijdens het golfvront en tijdens de golfklap) waarschijnlijk niet wezenlijk anders is dan op normale taluds. Alleen de waarde van p_{\max} lijkt iets groter te worden op steile taluds, maar deze parameter is veel minder belangrijk voor de stabiliteit dan bijvoorbeeld ϕ_k , die niet wezenlijk anders is op steile taluds.

De invloed van de taludhelling die reeds vastgesteld was op basis van de analyse van metingen op normale taluds (Klein Breteler e.a. 2006), blijkt zich op een vergelijkbare wijze voort te zetten tot op steile taluds van 1:2.

De ervaringen uit de praktijk zijn helaas niet voldoende om op basis van het principe van 'bewezen sterkte' conclusies te trekken.

De sterkte van de steenzetting zou enerzijds kleiner kunnen zijn omdat mogelijk het inwasmateriaal sneller zal uitspoelen, maar zou anderzijds ook groter kunnen zijn vanwege de te verwachten grotere klemming. De grotere klemming was waarschijnlijk de oorzaak van het lang stabiel blijven van een relatief dunne steenzetting op een talud van 1:1,5 in de Deltagoot.

Waarschijnlijk is de sterkte van een steenzetting op een steil talud niet kleiner dan op een normaal talud.

Voorlopig kan geconcludeerd worden dat de stabiliteit van de toplaaq van steenzettingen op een steil talud getoetst kan worden met de normale rekenmodellen.

6.2 Aanbevelingen

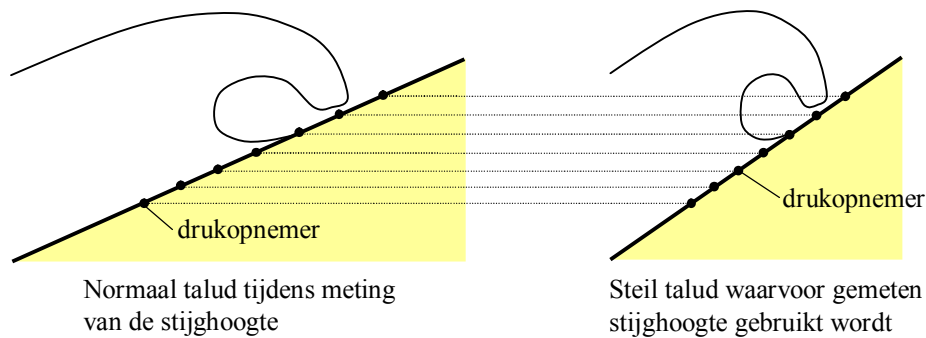
Doordat de geformuleerde voorlopige conclusies voornamelijk gebaseerd zijn op oude metingen met een vrij lage nauwkeurigheid, met een niet steilere taludhelling dan 1:2, loont het de moeite om te zoeken naar mogelijkheden om deze conclusies verder te onderbouwen.

De beste methode om de conclusies te verifiëren is door middel van (kleinschalig) modelonderzoek met steile taluds. Net als gebruikt is in het modelonderzoek van Klein

Breteler e.a. 2006 moet het talud uitgevoerd worden met een groot aantal drukopnemers die met een hoge bemonsteringsfrequentie bemeten worden. Door proeven te doen met taluds van 1:1, 1:1,5, 1:2 en 1:2,5 kan de invloed van de taludhelling op de belastingparameters vastgesteld worden. Ten opzichte van het huidige onderzoek wordt het bereik van de taludhellingen dan ook uitgebreid tot 1:1.

Daarnaast kan de invloed van de sterkte onderzocht worden door middel van grootschalig modelonderzoek met een steenzetting op een steil talud.

Het is echter denkbaar dat ook met een serie berekeningen met Zsteen al een aanvullende onderbouwing van de conclusies bereikt kan worden. Daarvoor moeten er berekeningen gemaakt worden met de gemeten drukken op normale taluds, die aangepast zijn om de belasting op steile talud te simuleren. Daartoe kan net gedaan worden alsof de stijghoogten op een steil talud zijn gemeten, waarbij de locatie ten opzichte van de waterlijn van de betreffende drukopnemer op het fictieve (steile) talud gelijk wordt genomen aan die op het talud tijdens de metingen. Hierbij kan de verticale afstand ten opzichte van de waterlijn, de horizontale afstand of de afstand langs het talud worden aangehouden. In onderstaande figuur is dit toegelicht, waarbij de verticale afstand gelijk gehouden is.



Figuur 6.1 Gebruik van de gemeten drukken op normaal talud ten behoeve van berekeningen met steil talud.

De berekeningen moeten uitwijzen of het op deze wijze versteilen van het talud tot gevolg heeft dat alle eigenschappen van de belasting op dezelfde wijze veranderen, en bovendien conform de empirische relaties van Klein Breteler e.a. 2006. Daarbij moet ook rekening gehouden worden met het feit dat het steiler worden van het talud de wijze van breken van de golven beïnvloedt: de brekerparameter verandert.

Mogelijk is deze methodiek slechts bruikbaar voor kleine veranderingen van de taludhelling.

Referenties

Coeveld, M. et al (2006)

Dune erosion; Dune revetments.

WL | Delft Hydraulics, conceptrapport H4731 (verwacht in najaar van 2006).

Klein Breteler, M. (1990)

Taludbekledingen van gezette steen, deel XVII

Waterbeweging en golfbelasting op een glad talud, band 1

WL | Delft Hydraulics, verslag M1795, maart 1990

Klein Breteler, M., I. v.d. Werf en I. Wenneker (2006)

Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen

Kwantificering golfbelasting en de invloed lange golven

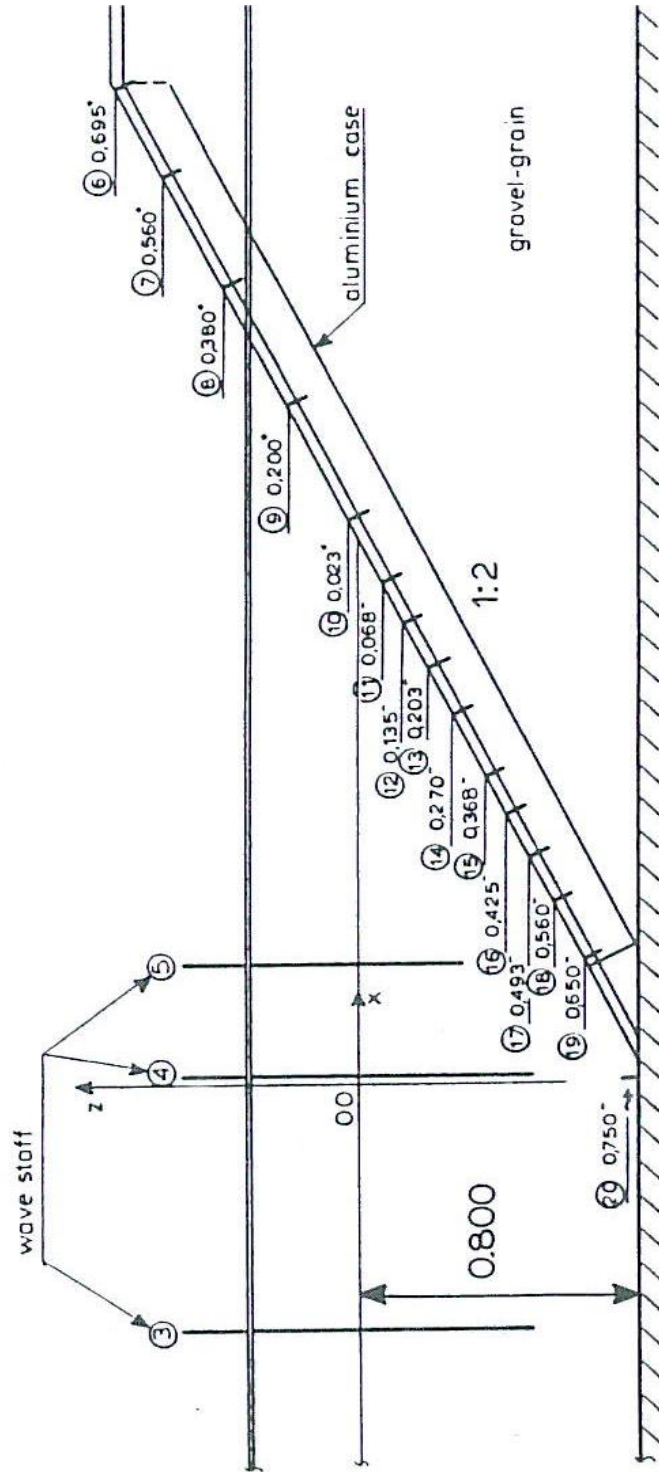
WL | Delft Hydraulics, conceptverslag H4421, juni 2006

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

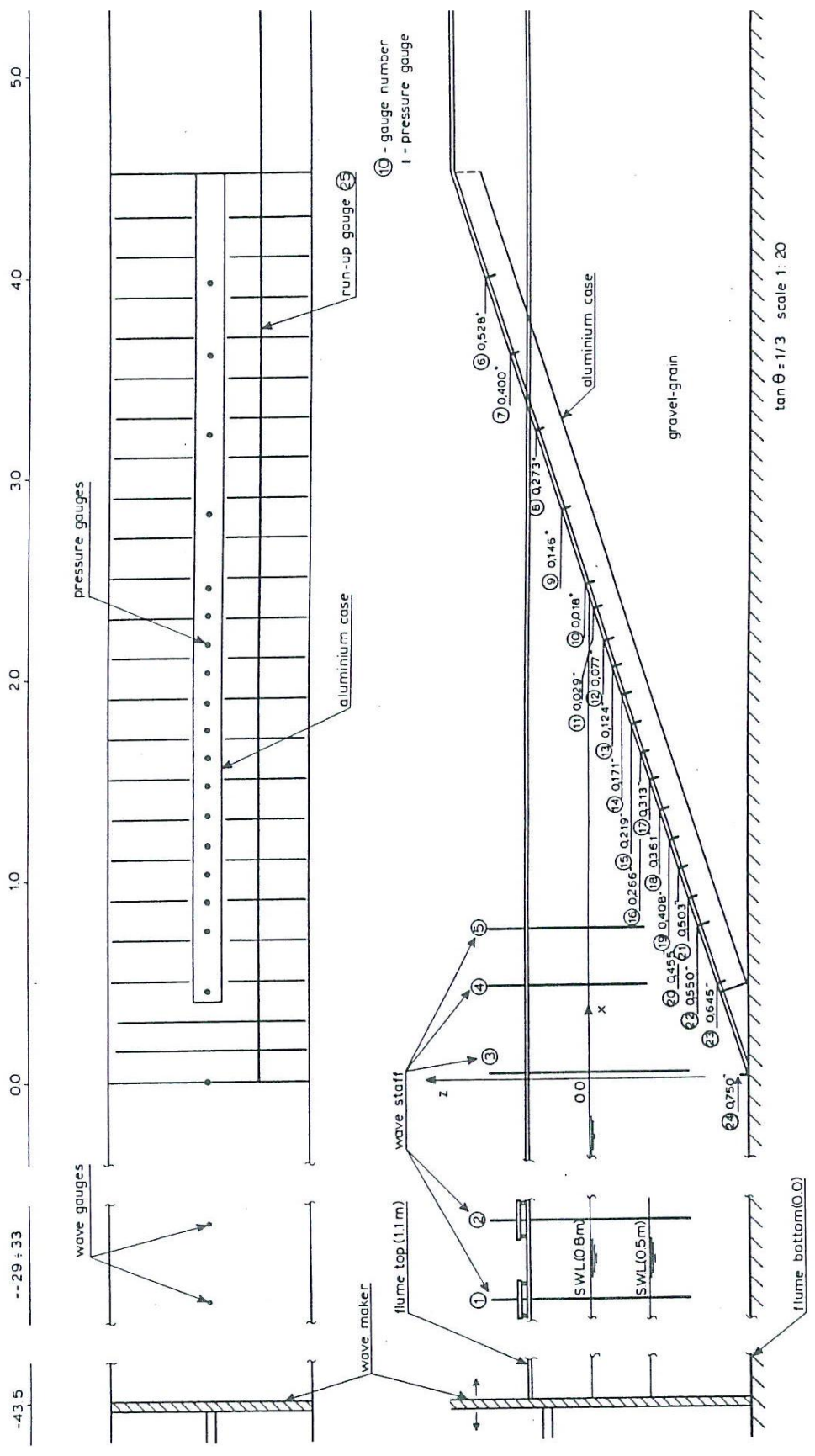
Taludbekledingen van gezette steen

Golfdruk op het talud, deel B

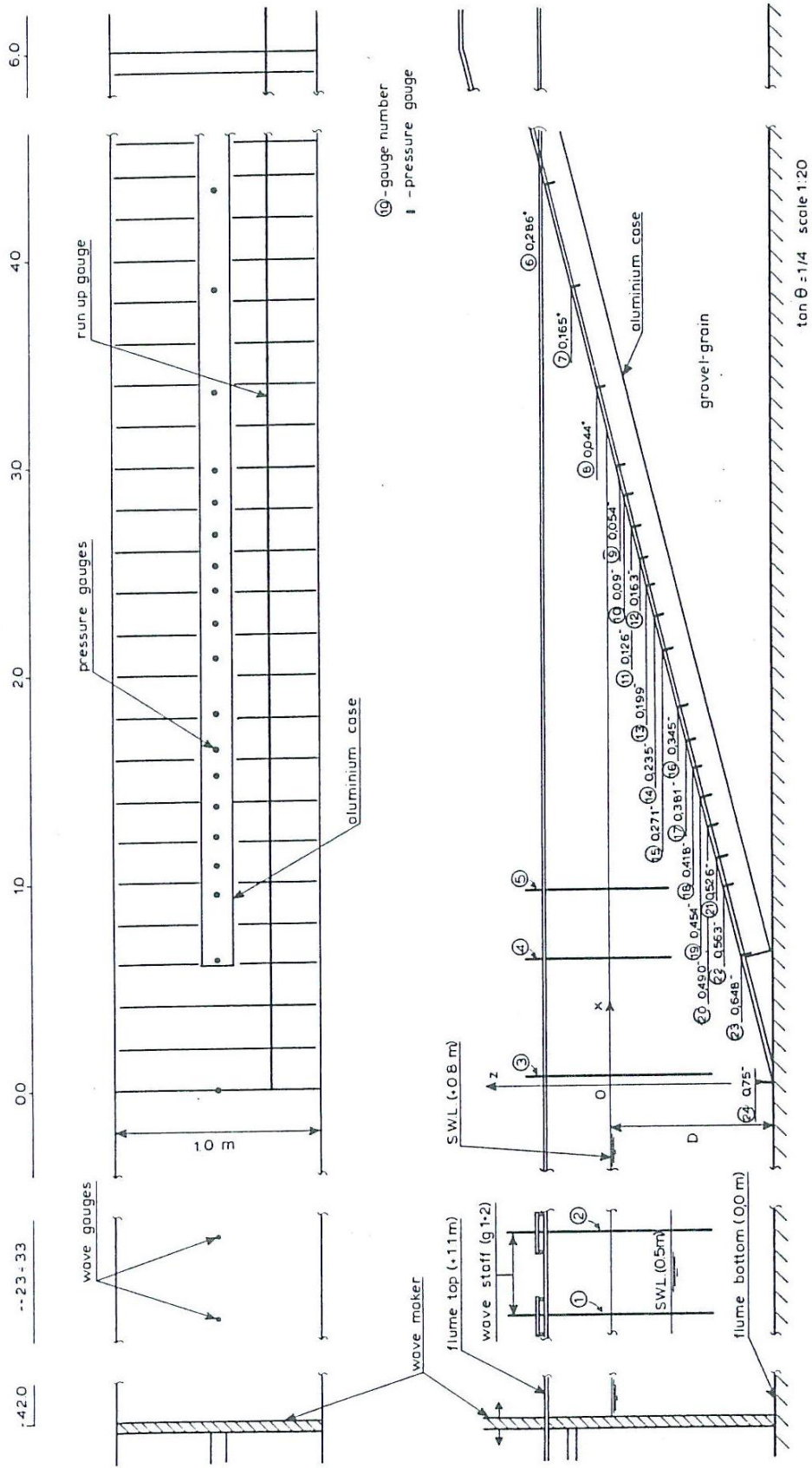
WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H195, december 1995



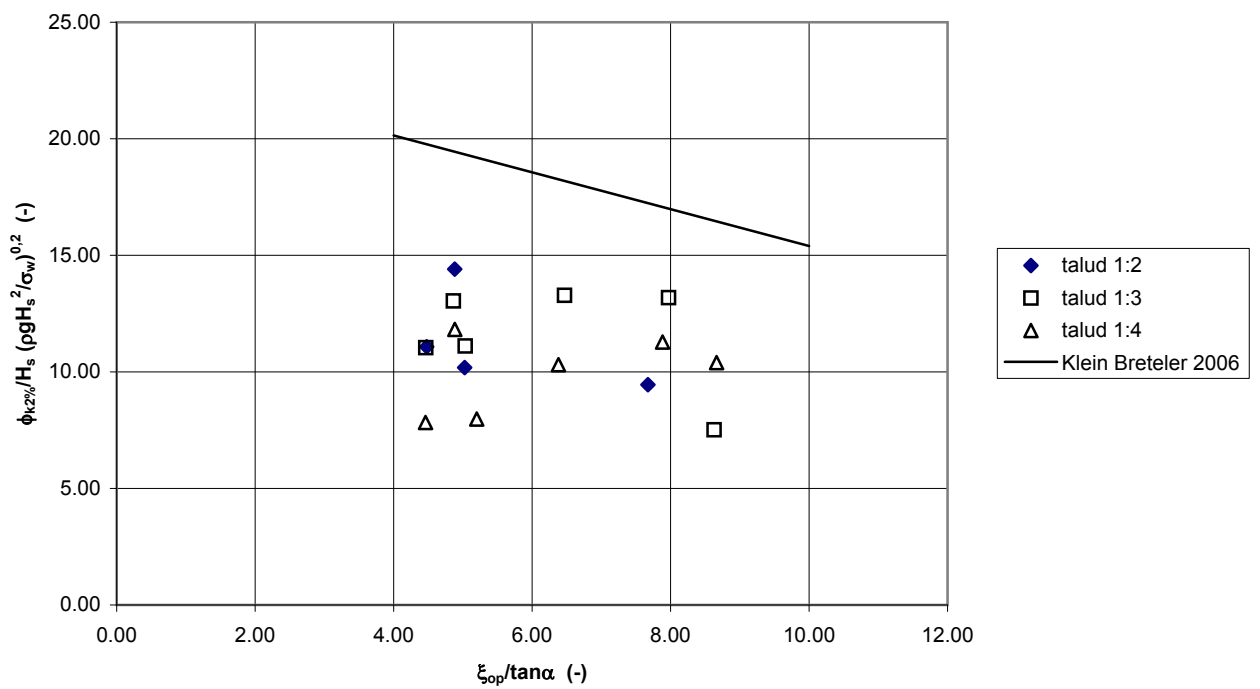
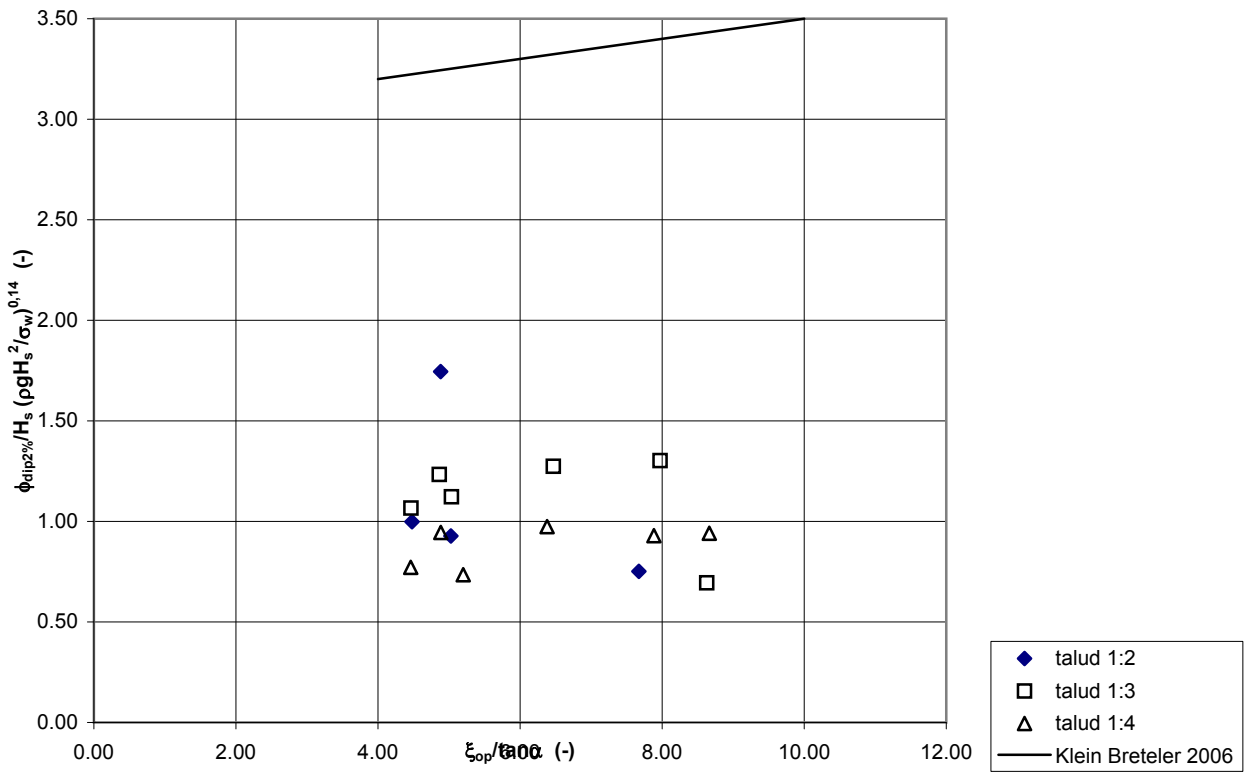
Modelopstelling Scheldegoot
talud 1:2



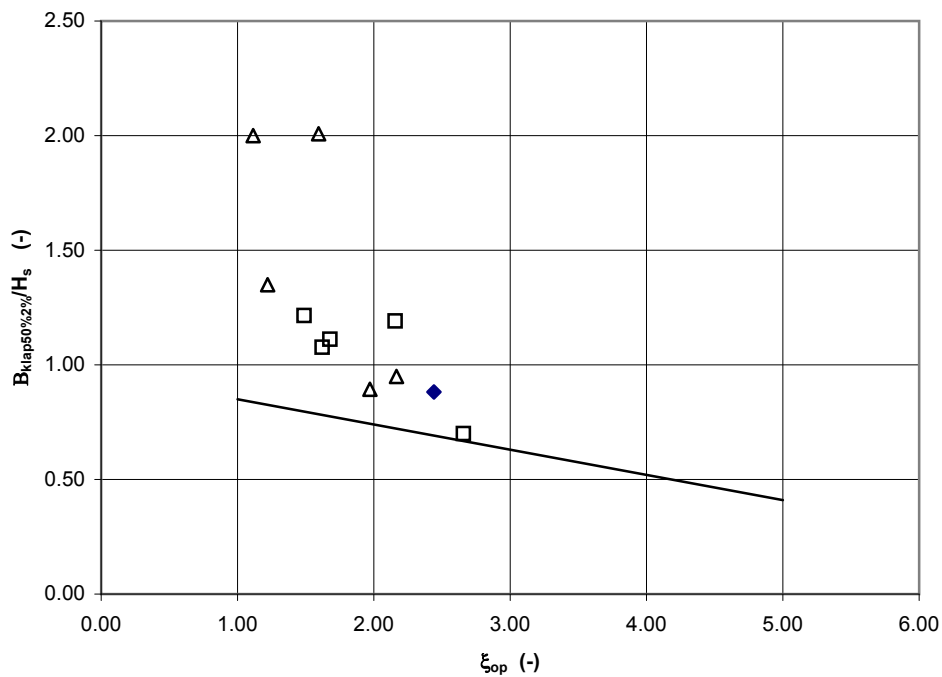
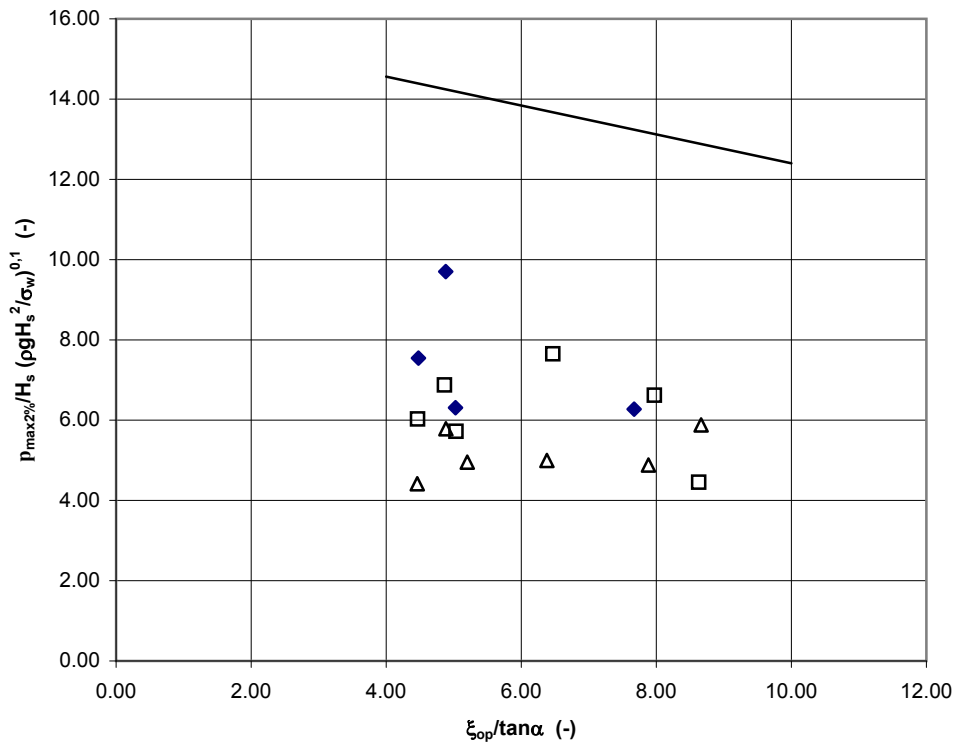
Modelopstelling Scheldegoet
talud 1:3



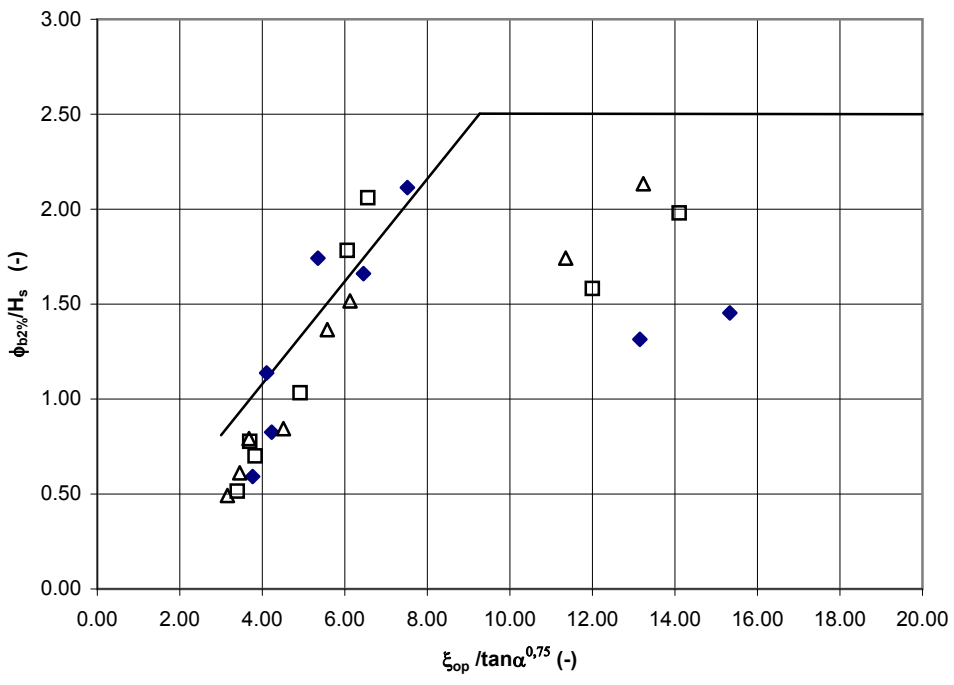
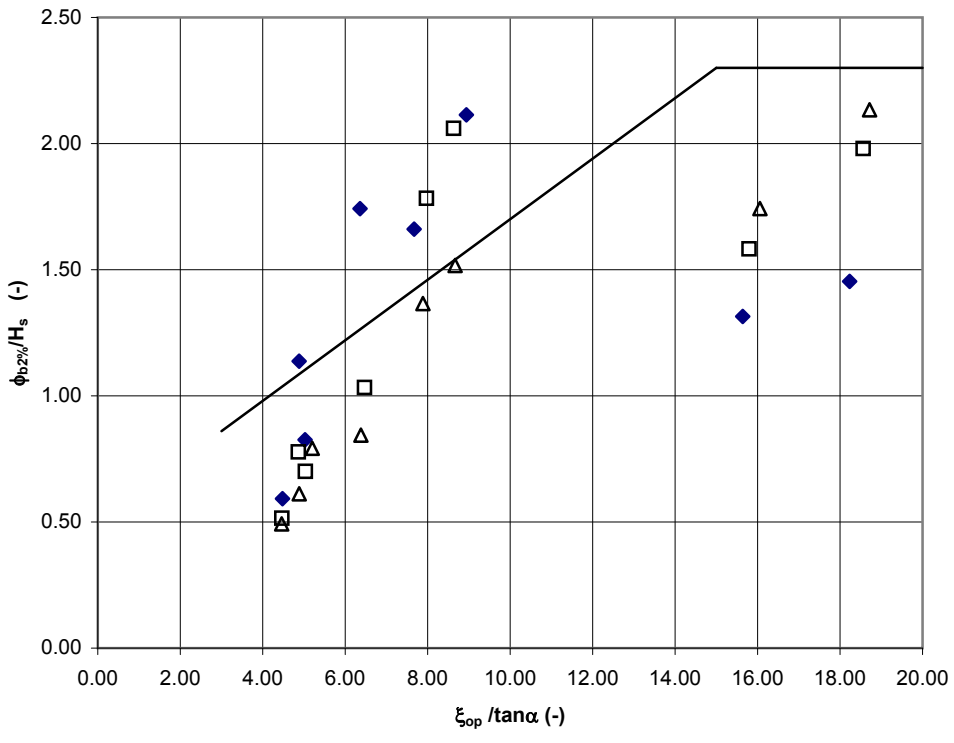
Modelopstelling Scheldegoet
talud 1:4



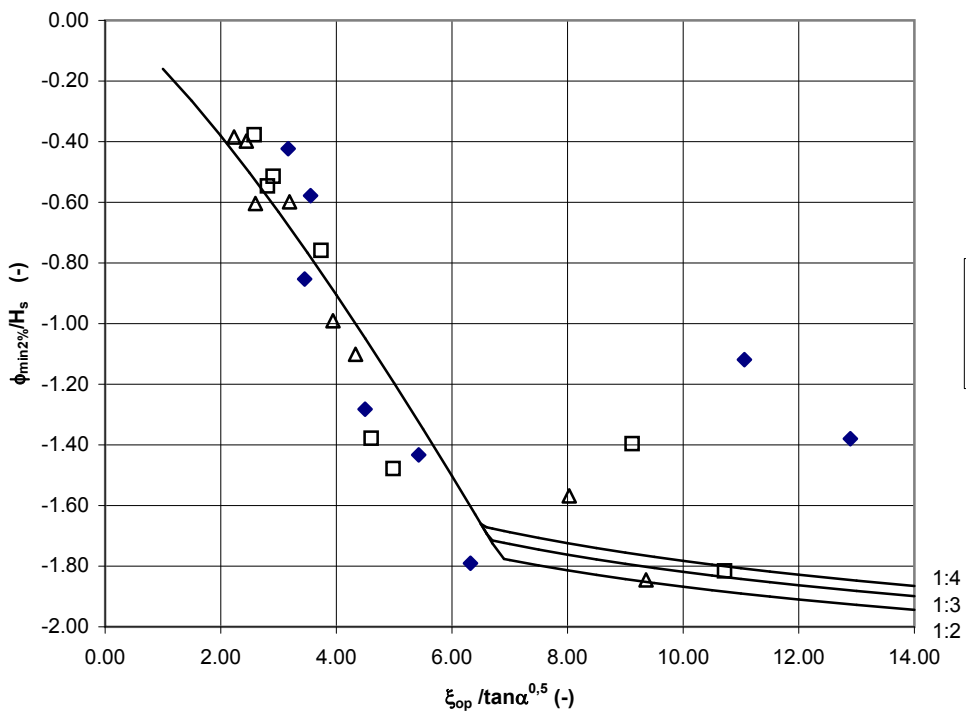
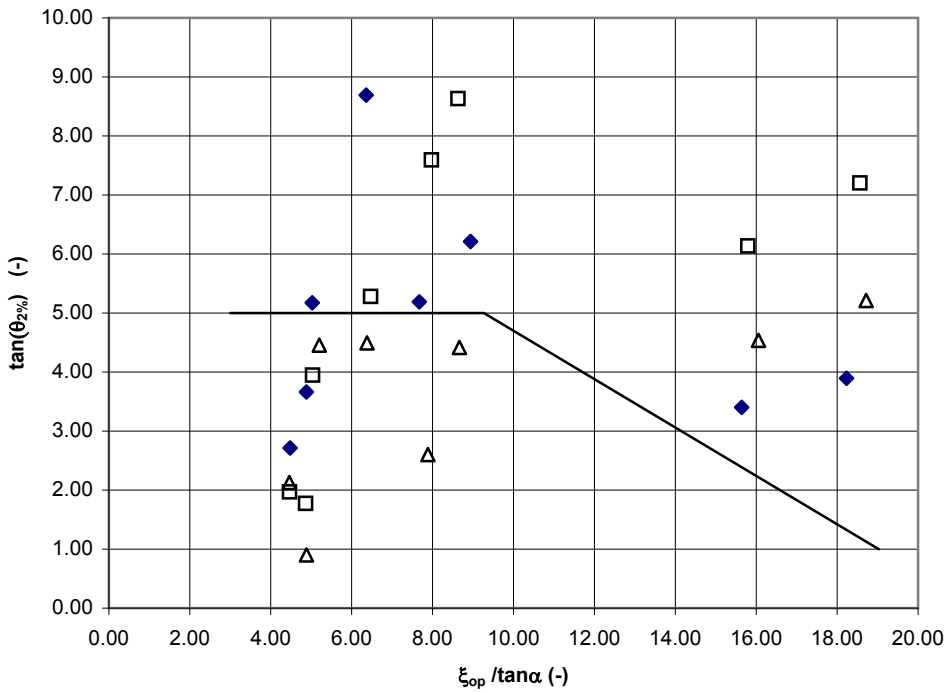
Belasting tijdens golfklap
gediptheid en maximale stijghoogte t.o.v. trog



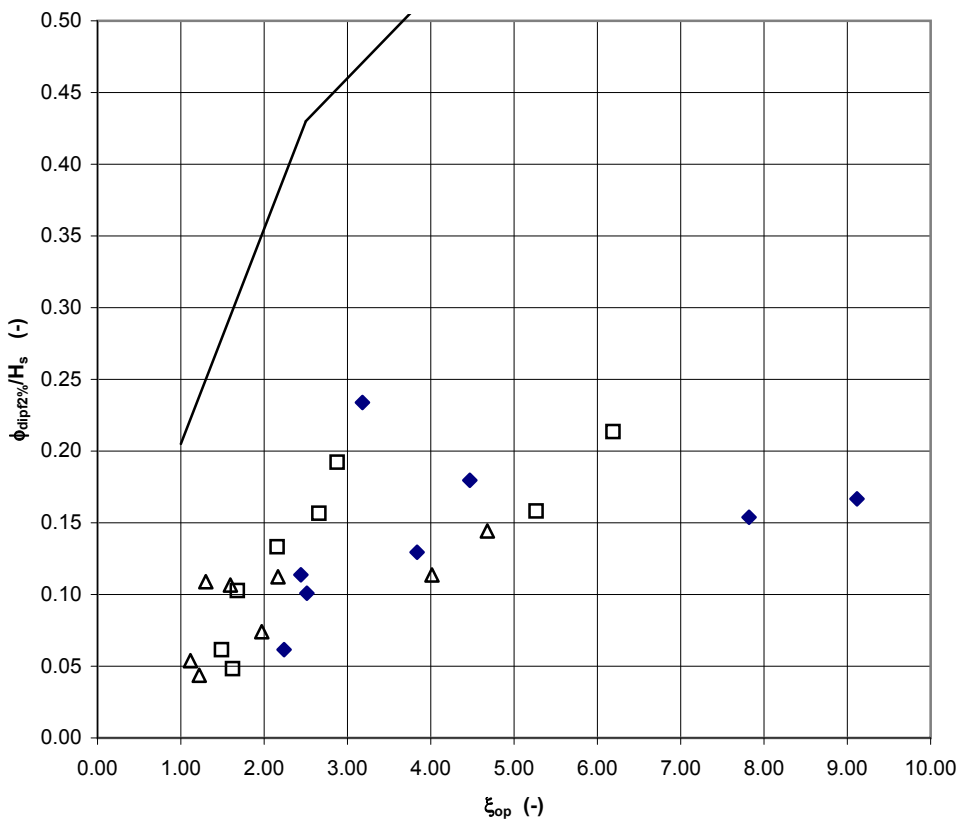
Belasting tijdens golfklap
maximale stijghoogte op talud en golfklapbreedte



Belasting tijdens golffront
fronthoogte



Belasting tijdens golffront
 fronthelling en minimale stijghoogte aan voet van front



Belasting tijdens golffront
gediptheid