

**Stabiliteit van steenzettingen
boven de stilwaterlijn en
invloed van een berm**



Stabiliteit van steenzettingen boven de stilwaterlijn en invloed van een berm

G.C. Mourik
M. Klein Breteler

1202551-009

Titel

Stabiliteit van steenzettingen boven de stilwaterlijn en invloed van een berm

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Waterdienst	1202551-009	1202551-009-HYE-0006	55

Trefwoorden

Steenzetting, belasting, belastinglocatie, stilwaterlijn, onvlakheid, Steentoets

Samenvatting

Steenzettingen boven de stilwaterlijn (bijvoorbeeld toetspeil) ondervinden een veel kleinere belasting dan steenzettingen onder de waterlijn. Hiervoor zijn globale invloedsfactoren opgenomen in Steentoets op basis van enkele Deltagootproeven, maar deze houden nog geen rekening met de invloed van een berm in het talud. Om een breder toepasbaar rekenmodel voor steenzettingen boven de waterlijn te verkrijgen, was het nodig een nieuw stabiliteitsmodel op te zetten.

In dit rapport is een stabiliteitsmodel opgezet, dat gebaseerd is op de gemeten stijghoogte op de toplaag, en de berekening van stijghoogteverschillen op basis van de lek lengtetheorie. De maatgevende stijghoogte op de toplaag is ontleend aan modelproeven uit 1992, die uitgevoerd zijn in de Scheldegoot (De Waal, 1992). Tijdens de proeven van 1992 waren er drukopnemers op het talud geplaatst, zowel boven als onder de stilwaterlijn.

Zowel constructies met als zonder berm zijn geanalyseerd, om ook de invloed van een berm op de belasting te bepalen. Het is gebleken dat de invloed van de berm op de stabiliteit van de steenzettingen boven de berm eenvoudig verdisconteerd kan worden als het niveau van de te toetsen locatie wordt beschouwd ten opzichte van de stilwaterlijn, en relatief ten opzichte van de golfoploop: $z/z_{2\%}$. De belasting neemt boven de waterlijn relatief snel af, sneller dan volgens de huidige Steentoets2010 (versie 1.04).

De ontwikkelde formules zijn vergeleken met enkele Deltagootproeven (Van Steeg & Klein Breteler, 2009). Uit de resultaten van de Deltagootproeven volgde dat de stabiliteit van steenzettingen boven de stilwaterlijn gevoelig is voor water dat tijdens de golfoploop met hoge snelheid over het talud, tegen uitstekende stenen stroomt. Bij het controleren van steenzettingen is het belangrijk om met dat aspect rekening te houden. Hiervoor kunnen dezelfde formules gebruikt worden als bij havendammen

Uit de analyse volgt dat steenzettingen op het boventalud dus gecontroleerd moeten worden op 2 aspecten: 1) het stijghoogteverschil als gevolg van oplopende stijghoogtefronten, en 2) de stabiliteit van uitstekende stenen.

Het onderhavige onderzoek is uitgevoerd in het kader van het meerjarige project 'Advisering steenbekledingen Zeeland' voor het Projectbureau Zeeweringen (PBZ). Dit projectbureau is opgericht ten behoeve van de renovatie van de steenzettingen in Zeeland en is een samenwerking van Rijkswaterstaat Zeeland en het Waterschap Scheldestromen. Contractueel is de Waterdienst van Rijkswaterstaat de opdrachtgever namens PBZ voor het onderhavige onderzoek. Het deel van het project dat gericht is op kennisontwikkeling sluit aan op het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen dat uitgevoerd is in de periode van 2003-2009 in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat namens PBZ.

Titel




Stabiliteit van steenzettingen boven de stilwaterlijn
en invloed van een berm

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Waterdienst	1202551-009	1202551-009-HYE-0006	55

Referenties

Contract 31037864 van 26-04-2010 (Contactpersoon RWS: ir. A. Bizzarri)

Contract 31054958 / 4500180616 van 7-06-2011 (Contactpersoon RWS: dhr. K. Saathof)

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.1	apr. 2011	G.C. Mourik M. Klein Breteler		R. 't Hart		M.R.A. van Gent	
1.2	mei 2011	G.C. Mourik M. Klein Breteler		R. 't Hart		M.R.A. van Gent	
2.0	jan. 2012	G.C. Mourik M. Klein Breteler		R. 't Hart		M.R.A. van Gent	

Status

definitief

Inhoud

Lijst van Tabellen	iii
Lijst van Figuren	v
Lijst van Symbolen	vii
1 Inleiding	1
2 Theoretische beschouwing van de stabiliteit en ervaring in Deltagoot	3
2.1 Stijghoogte op de toplaag	3
2.2 Freatische lijn	3
2.3 Stabiliteit van de steenzetting	6
3 Modelopstelling en proevenprogramma in Scheldegoot	7
3.1 Geometrie modelopstelling	7
3.2 Proevenprogramma	7
3.3 Metingen	8
3.3.1 Drukken	8
3.3.2 Golfcondities	9
4 Voorbewerking van drukmetingen in Scheldegoot	11
5 Analyse meetdata Scheldegootproeven	13
5.1 Opzet analyse	13
5.2 Gediptheid	13
5.3 Begin- en eindtijdstippen van golven	15
5.4 Selectieproces maximale gediptheid	16
5.5 Bepaling fronthoogte en helling	17
5.6 Verloop van fronthoogte over het talud	21
5.6.1 Dimensieloze fronthoogte en invloed golfsteilheid	22
5.6.2 Dimensieloze afstand tot de stilwaterlijn	22
5.6.3 Samenhang per geometrie	23
6 Vergelijking formules met meetdata Deltagootproeven	27
6.1 Analyse stijghoogteverlagingen in meetdata Deltagootproeven	27
6.1.1 Kwalitatieve analyse stijghoogteverlagingen	28
6.1.2 Kwantitatieve analyse stijghoogteverlagingen	31
6.1.3 Beoordeling stijghoogteverlagingen	39
6.2 Vergelijking formules (5.3) en (5.4) met meetdata Deltagootproeven	39
6.2.1 Stijghoogteverschil op basis van meetdata van Deltagootproeven	39
6.2.2 Stijghoogteverschil op basis van ontwikkelde formules	41
6.2.3 Vergelijking berekende resultaten met metingen	42
6.3 Vergelijking nieuwe formules (5.3) en (5.4) met huidige formules	43
7 Conclusies en aanbevelingen	47
8 Referenties	51

Bijlage(n)

A Tabellen	A-1
B Figuren	B-1
C Foto's	C-1

Lijst van Tabellen

Tabel 2.1	Waterstanden en drukopnemerlocaties tijdens Deltagootproeven (2009)	4
Tabel 3.1	Overzicht geometrie modelopstelling per proevenserie	7
Tabel 5.1	Gediptheid $\phi_{dip2\%}$ op locatie x [m] t.o.v. stilwaterlijn.	17
Tabel 5.2	Gediptheid berekend met $L = 0,37$ m.	18
Tabel 5.3	Gediptheid berekend met $L = 0,20$ m.	19
Tabel 5.4	Ideale combinatie van θ_f en ϕ_b	19
Tabel 6.1	Stijghoogteverlaging $\phi_{op2\%}$ op basis van meetdata (proef L2)	32
Tabel 6.2	Stijghoogteverlaging $\phi_{op2\%}$ op basis van theorie (proef L2).	34
Tabel 6.3	Resultaten kwantitatieve analyse van stijghoogteverlagingen.	35
Tabel 6.4	Stijghoogteverschil $\phi_{w2\%}$ op basis van ontwikkelde formules (proef L1)	42
Tabel 6.5	Resultaten van verificatie	42

Lijst van Figuren

Figuur 2.1	Stijghoogteverloop tijdens golfoploop (schematisch weergegeven)	3
Figuur 2.2	Modelopstelling proeven Deltagoot (2009), testsectie betonzuilen.	4
Figuur 2.3	Modelopstelling proeven Deltagoot (2009), testsectie betonblokken.	4
Figuur 2.4	Vermoedelijk verloop freatische lijn in filterlaag .	5
Figuur 2.5	Geschematiseerd stijghoogteverloop op de toplaag	6
Figuur 5.1	Wegingsfactor voor het bepalen van het voortschrijdend gemiddelde ten behoeve van het berekenen van de gediptheid.	15
Figuur 5.2	Verloop van gediptheid $\phi_{dip2\%}$ over talud boven stilwaterlijn (proef 3003) .	17
Figuur 5.3	Vereenvoudigd stijghoogteverloop met dezelfde gediptheid (schematisch weergegeven)	18
Figuur 5.4	Invloedsgebied voor stijghoogteverschil op locatie A, waarbij top van stijghoogtefront buiten dit gebied ligt.	20
Figuur 5.5	Stijghoogteverschil als functie van ϕ_b en θ_f (teta) bij een leklengte van 0,3 m en een talud van 1:3,5.	21
Figuur 5.6	Schematische weergave z en $z_{2\%}$ (situatie waarbij SWL onder de berm ligt).	23
Figuur 6.1	Gekromde stroomlijnen over een uitstekende steen	28
Figuur 6.2	Geschematiseerde stijghoogteverhoging en -verlaging volgens bijlage H van Klein Breteler e.a. (2009).	29
Figuur 6.3	Schematische weergave van stijghoogteverlaging op toplaag en stijghoogteverhoging in het filter.	29
Figuur 6.4	Schematische weergave van uitstekende steen en verloop stijghoogteverlaging.	33
Figuur 6.5	Schematische weergave van stijghoogteverlaging op toplaag en stijghoogteverhoging in het filter	35
Figuur 6.6	Stabiliteit van uitstekende steen als functie van d_f volgens formules (6.9) en (6.10).	38
Figuur 6.7	Stijghoogteverschil $\phi_{w2\%}$ op basis van meetdata Deltagootproeven (proef L1)	41
Figuur 6.8	Vergelijking nieuwe formules (5.3) en (5.4) en huidige formules (Van Steeg & Klein Breteler, 2009) voor belasting boven SWL (recht talud).	43
Figuur 6.9	Vergelijking nieuwe formules (5.3) en (5.4) en huidige formule voor bermen.	44

Lijst van Symbolen

Symbol	Eenheid	Betekenis
α	-	Taludhelling
γ	-	Piekfactor voor het JONSWAP-spectrum
γ_f	-	Invloedsfactor voor ruwheid op het talud
Δ	-	Relatieve soortelijke massa van stenen = $(\rho_s - \rho_w) / \rho_w$
θ_f	°	Helling van het stijhoogtefront
Λ	m	Leklengte
ξ_{op}	-	Brekerparameter
ρ_s	kg/m ³	Soortelijke massa van de stenen
ρ_w	kg/m ³	Soortelijke massa van water
ϕ	m	Stijhoogte
ϕ_a	m	Maximale stijhoogteverhoging aan bovenstroomse zijde van uitstekende steen
ϕ_b	m	Hoogte van het stijhoogtefront
ϕ_{dip}	m	Gediptheid
$\phi_{dip2\%}$	m	Maat voor de gediptheid met een overschrijdingsfrequentie van 2% (gemiddelde van alle waarden met overschrijdingsfrequentie van 5%)
ϕ_{filter}	m	Denkbeeldige stijhoogte in de filterlaag
ϕ_{onder}	m	Maximale stijhoogteverhoging onder uitstekende steen
ϕ_{op}	m	Maximale stijhoogteverlaging boven uitstekende steen
$\phi_{op2\%}$	m	Stijhoogteverlaging boven uitstekende steen met overschrijdingsfrequentie van 2%
$\phi_{onder,DRO}$	m	Stijhoogteverhoging in filter, ter plaatse van drukopnemer
$\phi_{op,DRO}$	m	Stijhoogteverlaging op toplaag, ter plaatse van drukopnemer
$\phi_{op2\%,DRO}$	m	Stijhoogteverlaging met overschrijdingsfrequentie van 2%, ter plaatse van drukopnemer
ϕ_{ruw}	m	Ruwe, onbewerkte stijhoogte
ϕ_{top}	m	Stijhoogte op de toplaag
ϕ_w	m	Maximale stijhoogteverschil over de toplaag
B	-	Breedte van de stenen in de stroom-/golfrichting van het water
$B_{\phi_{onder}}$	-	Afstand waarover stijhoogteverhoging in filter aanwezig is
$B_{\phi_{op}}$	-	Afstand waarover stijhoogteverlaging op toplaag aanwezig is
B_{berm}	m	Bermbreedte
c	-	Coëfficiënt
C_L	-	Liftcoëfficiënt
D	m	Dikte van de toplaag
d_B	m	Waterdiepte t.p.v. zeewaartse zijde van de berm
d_f	m	Mate waarin uitstekende steen uitsteekt boven het taludoppervlak
d_t	s	Extra tijdsduur
f	-	Wrijvingscoëfficiënt
$f_{bovenbeloop}$	-	Correctiefactor voor steenzettingen boven de stilwaterlijn
f_m	-	Weegfactor
f_{t+n}	-	Weegfactor

g	m/s ²	Versnelling van de zwaartekracht
h	m	Waterdiepte
h _c	m	Hoogte van de kruin t.o.v. de stilwaterlijn
H _s	m	Significante golfhoogte
L	m	Middelingslengte
N	-	Aantal golven gedurende een proef
N _{5%}	-	5% van totaal aantal golven gedurende een proef
S _{op}	-	Golfsteilheid
T _m	s	Gemiddelde golfperiode
T _{m-1,0}	s	Spectrale golfperiode
T _p	s	Golfperiode bij piek van spectrum
u	m/s	Snelheid van het water over het talud
u _{2%}	m/s	Snelheid van het water over het talud met overschrijdingsfrequentie van 2%
u _{2%,kruin}	m/s	Snelheid van water op kruin met overschrijdingsfrequentie van 2%
x	m	Horizontale afstand vanaf snijlijn van de stilwaterlijn en talud (landwaarts is positief).
z	m	Verticale afstand vanaf de stilwaterlijn tot de beschouwde locatie op het talud (boven stilwaterlijn is positief).
Z _{2%}	m	Golfploophoogte met een overschrijdingsfrequentie van 2%
Z _f	m	Niveau van de freatische lijn ten opzichte van de locatie waar het stijghoogteverschil maximaal is

1 Inleiding

Steenzettingen boven de stilwaterlijn (bijvoorbeeld toetspeil) ondervinden een veel kleinere belasting dan steenzettingen onder de waterlijn. Hiervoor zijn globale invloedsfactoren opgenomen in Steentoets op basis van enkele Deltagootproeven (Van Steeg & Klein Breteler, 2009), maar deze houden nog geen rekening met de invloed van een berm in het talud. Die invloedsfactoren hebben ook een zwakke theoretische basis, waardoor het moeilijk is de resultaten te gebruiken voor steenzettingen met een sterk afwijkende leklengte of taludhelling.

Om een breder toepasbaar rekenmodel voor steenzettingen boven de waterlijn te verkrijgen, was het nodig een nieuw stabiliteitsmodel op te zetten.

Het onderhavige onderzoek is uitgevoerd in het kader van het meerjarige project 'Advisering steenbekledingen Zeeland' voor het Projectbureau Zeeweringen (PBZ). Dit projectbureau is opgericht ten behoeve van de renovatie van de steenzettingen in Zeeland en is een samenwerking van Rijkswaterstaat Zeeland en het Waterschap Scheldestromen. Contractueel is de Waterdienst van Rijkswaterstaat de opdrachtgever namens PBZ voor het onderhavige onderzoek. Het deel van het project dat gericht is op kennisontwikkeling sluit aan op het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen dat uitgevoerd is in de periode van 2003-2009 in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat namens PBZ.

In dit rapport is een stabiliteitsmodel opgezet, dat gebaseerd is op de gemeten stijghoogte op de topklaag, en de berekening van stijghoogteverschillen op basis van de leklengtetheorie. De maatgevende stijghoogte op de topklaag is ontleend aan modelproeven uit 1992, die uitgevoerd zijn in de Scheldegoot (De Waal, 1992). Tijdens de proeven van 1992 waren er drukopnemers op het talud geplaatst, zowel boven als onder de stilwaterlijn. Zowel constructies met als zonder berm zijn geanalyseerd, om ook de invloed van een berm op de belasting te bepalen.

Het grootste gedeelte van dit rapport is gewijd aan de analyse van de gemeten stijghoogte op de topklaag. De resulterende formules kunnen namelijk eenvoudig gecombineerd worden met de beschikbare formules voor de sterkte van steenzettingen uit het verleden, om te komen tot een nieuw stabiliteitsmodel.

Het laatste gedeelte van dit rapport is gewijd aan het vergelijken van de ontwikkelde formules met enkele Deltagootproeven (Van Steeg & Klein Breteler, 2009). Daarin wordt onderzocht hoe de ontwikkelde formules zich verhouden tot de meetdata van de Deltagootproeven.

De formules die uit deze analyse volgen, kunnen gebruikt worden in een geavanceerde analyse van de stabiliteit van steenzettingen boven de waterlijn.

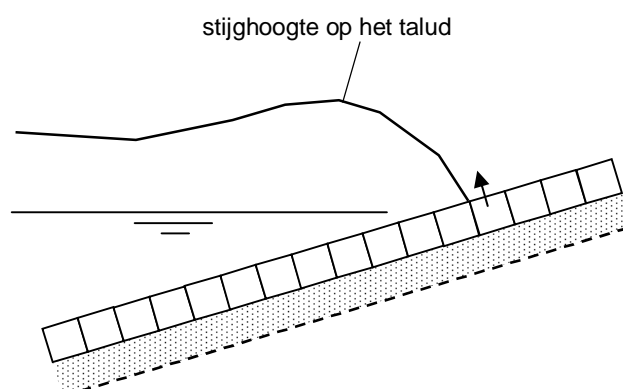
2 Theoretische beschouwing van de stabiliteit en ervaring in Deltagoot

2.1 Stijghoogte op de toplaag

Uit het onderzoek van de afgelopen jaren is naar voren gekomen dat de stabiliteit van steenzettingen vooral bedreigd wordt door stijghoogtegradiënten op de toplaag (Klein Breteler 2000). Dergelijke stijghoogtegradiënten komen voor tijdens het stijghoogtefront dat optreedt vlak vóór de golfklap, en tijdens golfklappen.

Voor steenzettingen boven de waterlijn is het niet te verwachten dat golfklappen een erg grote bijdrage zullen geven. De meeste golfklappen treden immers op vlak onder de waterlijn.

Aan de hand van de proeven van Van Steeg (Van Steeg & Klein Breteler, 2009) is duidelijk geworden dat het boventalud belast wordt door een waterfront dat als een translatiegolf het talud opgaat tijdens de golfoploop. Voor een bepaald moment leidt dit tot een stijghoogtefront zoals getekend in Figuur 2.1.



Figuur 2.1 Stijghoogteverloop tijdens golfoploop (schematisch weergegeven)

De steen aan de voet van het stijghoogtefront ondervindt het grootste stijghoogteverschil, en dreigt uit de bekleding gelicht te worden. Het voorgestelde stabiliteitsmodel voor steenzettingen boven de waterlijn is gebaseerd op het bovenstaande.

2.2 Freatische lijn

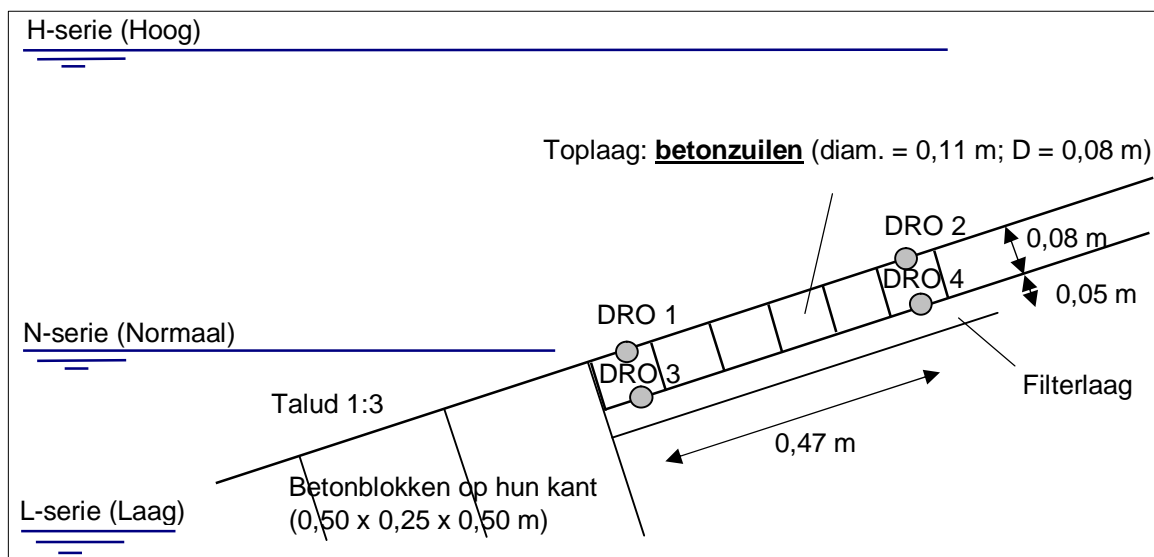
Een belangrijk aspect van het rekenmodel is de ligging van de freatische lijn in het filter. Boven de freatische lijn zullen er immers geen stijghoogteverschillen kunnen optreden. Informatie hierover kan ontleend worden aan de proeven in de Deltagoot die in 2009 zijn uitgevoerd met een steenzetting boven de waterlijn (Van Steeg & Klein Breteler, 2009).

De modelopstelling van die Deltagootproeven bestond uit een lang recht talud met een helling van 1:3. Het taluddeel tussen +4,80m en +5,49m boven de gootbodem vormde de testsectie. De ene helft van de testsectie bestond uit een steenzetting van betonzuilen (diameter = 11 cm) en een toplaagdikte van 8 cm. De andere helft bestond uit een steenzetting van betonblokken (lengte x breedte x dikte = 0,20 x 0,20 x 0,10 m). Het talud lager dan +4,80m boven de gootbodem viel buiten de testsectie en bestond uit blokken op hun kant (lengte x breedte x dikte = 0,50 x 0,25 x 0,50 m). Het talud hoger dan +5,49m was een betontalud.

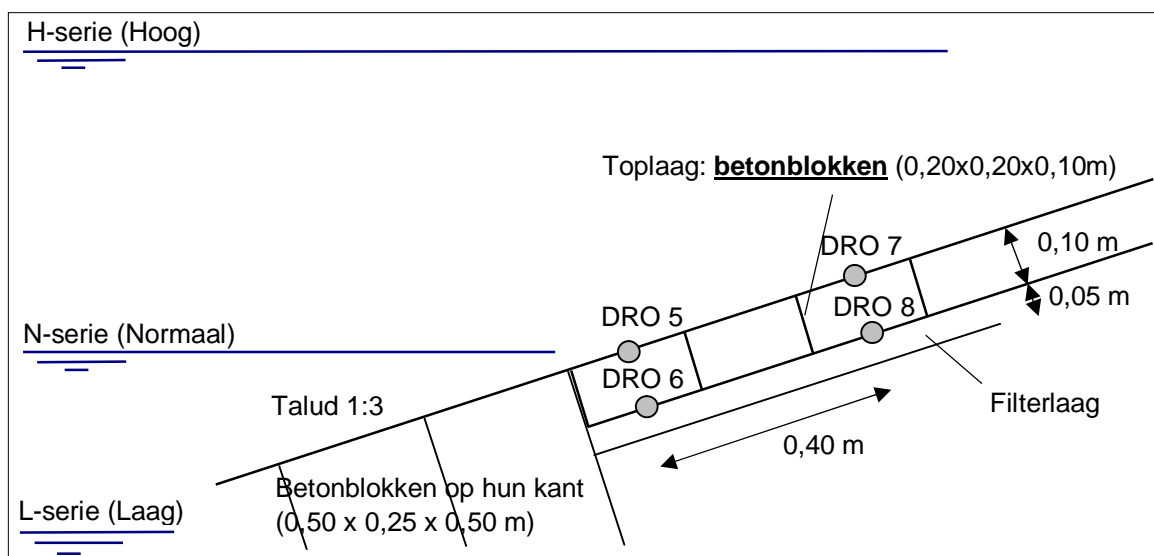
Per testsectie waren 4 drukopnemers in de bekleding aanwezig, namelijk op twee verschillende afstanden vanaf de waterlijn, een drukopnemer op en onder de toplaag (zie Figuur 2.3). Tijdens de proeven werd gevarieerd in de waterstand. Op basis van de waterstandniveaus werden 3 proevenseries uitgevoerd (Tabel 2.1, Figuur 2.2 en Figuur 2.3):

Serie	Proef	h (m)	Niveau drukopnemer t.o.v. SWL, z (m)							
			DRO1	DRO2	DRO3	DRO4	DRO5	DRO6	DRO7	DRO8
H-serie (Hoog)	alle	5,34	-0,524	-0,376	-0,600	-0,452	-0,508	-0,603	-0,382	-0,477
N-serie (Normaal)	N1	4,80	0,016	0,164	-0,060	0,088	0,032	-0,063	0,158	0,063
	overige	4,84	-0,024	0,124	-0,100	0,048	-0,008	-0,103	0,118	0,023
L-serie (Laag)	L1	4,50	0,316	0,464	0,240	0,388	0,332	0,237	0,458	0,363
	overige	4,54	0,276	0,424	0,200	0,348	0,292	0,197	0,418	0,323

Tabel 2.1 Waterstanden en drukopnemerlocaties tijdens Deltagootproeven (2009)



Figuur 2.2 Modelopstelling proeven Deltagoot (2009), testsectie betonzuilen.



Figuur 2.3 Modelopstelling proeven Deltagoot (2009), testsectie betonblokken.

De overgang tussen de betonblokken op hun kant en de testsectie betreft een overgangsconstructie die vrijwel waterondoorlatend was. De aanwezigheid van de gekantelde betonblokken is hydraulisch vergelijkbaar met de aanwezigheid van een betonnen schot. Dat heeft mogelijk enige invloed op de meetdata van de drukopnemers laag op het talud.

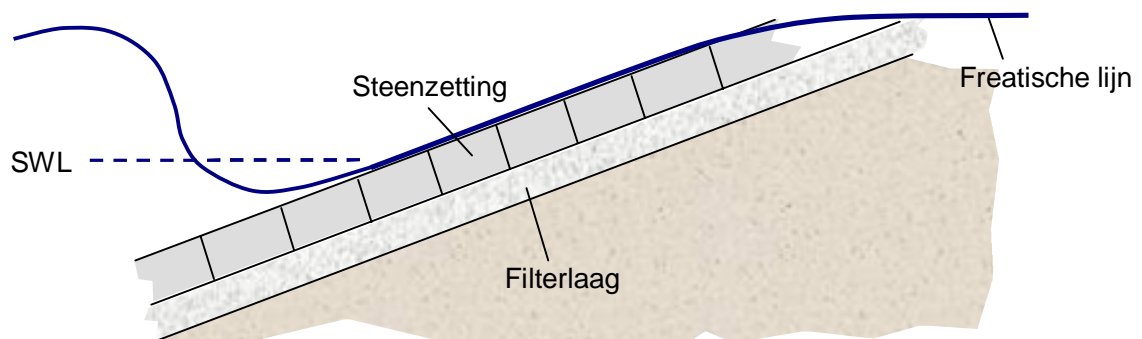
Aangezien dit onderzoek zich uitsluitend toespitst op belastingen boven de stilwaterlijn, worden alleen de series 'Normaal' en 'Laag' beschouwd. In bijlage B.6 wordt van een willekeurige proef uit de N-serie (proef N1) en een proef uit de L-serie (proef L1) een deel van het gemeten druksignaal van de drukopnemers 5 t/m 8 getoond (testsectie betonblokken). Merk op dat de drukopnemers 6 en 8 structureel een hoger signaal geven dan de drukopnemers 5 en 7, wegens het aanwezige plaatshoogteverschil tussen de boven- en onderzijde van de toplaag.

Vlak voor het moment dat een golfklap of -front optreedt, is de waterstand voor de constructie relatief laag, als gevolg van neerloop. De waterlaagdikte op de toplaag neemt af en het water in de filterlaag lekt weg, waardoor de freatische lijn in het filter daalt. De waterdruk op en onder de toplaag nemen daardoor af.

Tijdens een golfklap of -front loopt de druk in het nog volledig verzadigde filter snel op als gevolg van de drukverhoging op het talud. Het filter loopt als gevolg van de druktoename vol tot grotere hoogte, de freatische lijn in het filter stijgt. Dat vollopen kost echter tijd, afhankelijk van de doorlatendheid van het filter en de toplaag.

Voorafgaand aan het onderzoeken van de meetgegevens van de Deltagootproeven werd verwacht dat het filter ter plaatse van de drukopnemers niet meer volledig zou zijn gevuld, waardoor de druk in het filter op een later tijdstip zou toenemen dan de druk op de toplaag. In dat geval zou op basis van dat tijdsverschil en de doorlatendheid van het filter het niveau van de freatische lijn berekend kunnen worden, ervan uitgaande dat het freatische vlak in het filter horizontaal zou liggen.

Uit de metingen blijkt echter dat de drukken boven en onder de toplaag vrijwel op hetzelfde moment stijgen. Dit verschijnsel wordt geconstateerd bij zowel de blokkentestsectie (zie bijlage B.6) als de zuilentestsectie. Het filter ter plaatse van de drukopnemers blijft dus gedurende de golfneerloop geheel gevuld. De druklijn in de filterlaag tijdens de neerloop loopt vrijwel parallel aan de taludhelling net op of boven de toplaag (zie Figuur 2.4).



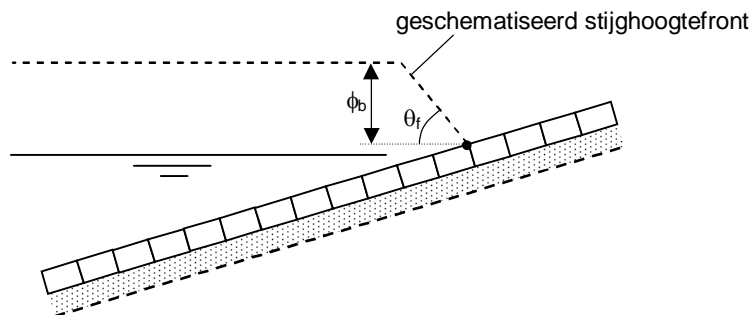
Figuur 2.4 Vermoedelijk verloop freatische lijn in filterlaag.

Daarom kan als uitgangspunt voor het rekenmodel worden aangenomen dat de freatische lijn op het moment van een golfklap of -front betrekkelijk hoog ligt.

2.3 Stabiliteit van de steenzetting

De stabiliteit van de steenzetting wordt enerzijds bepaald door de belasting (stijghoogteverschil) en anderzijds door de sterkte (eigengewicht, wrijving, klemming, etc.).

Voor het berekenen van het stijghoogteverschil wordt gebruikgemaakt van een schematisatie van het stijghoogteverloop op de toplaag. Gekozen wordt voor een stijghoogtefront, omdat dit aansluit op de visueel vastgestelde belasting (zie paragraaf 2.1). Het front wordt gekarakteriseerd door een hoogte ϕ_b en een steilheid θ_f zie Figuur 2.5.



Figuur 2.5 Geschematiseerd stijghoogteverloop op de toplaag

Er is gekozen voor een betrekkelijk eenvoudig stijghoogtefront, omdat met het beperkte aantal drukopnemers tijdens de proeven het niet mogelijk is om een meer verfijnd stijghoogtefront te hanteren.

Het is gebleken dat er ook enkele verdwaalde golfklappen boven de waterlijn optreden. Ook die worden geschematiseerd tot een front, waardoor het stijghoogteverschil wat overschat wordt (conservatief, veilig) bij dergelijke belastingen.

Uiteindelijk is het de bedoeling om met het tot een front geschematiseerde stijghoogteverloop een stijghoogteverschil over een steenzetting boven de stilwaterlijn te berekenen. Gezien het gekozen verloop kan gebruikgemaakt worden van de volgende formule (Klein Breteler e.a. 1991):

$$\phi_w = \frac{\Lambda}{2} \left(\cos \alpha \tan \theta_f \left(1 - \exp \left(\frac{-\phi_b}{\Lambda \cos \alpha \tan \theta_f} \right) \right) + \sin \alpha \right) \cdot \left(1 - \exp \left(\frac{-2z_f}{\Lambda \sin \alpha} \right) \right) \quad (2.1)$$

Met:

- ϕ_w = maximale stijghoogteverschil over de toplaag (m)
- Λ = leklengte (m)
- α = taludhelling ($^\circ$)
- ϕ_b = hoogte van het stijghoogtefront (m)
- θ_f = helling van het stijghoogtefront ($^\circ$)
- z_f = niveau van de freatische lijn ten opzichte van de locatie waar het stijghoogteverschil maximaal is (m)

Het maximale stijghoogteverschil over de toplaag ϕ_w is de belasting die vergeleken kan worden met de sterkte.

De sterkte van de steenzetting boven de waterlijn is niet wezenlijk anders dan onder de waterlijn. Er kan daarom gebruikgemaakt worden van dezelfde formules als in Steentoets2010. Met die formules wordt rekening gehouden met het eigengewicht van de stenen, de wrijving tussen naast elkaar gelegen stenen, de klemming, de invloed van traagheid en de invloed van toestroming.

3 Modelopstelling en proevenprogramma in Scheldegoot

In het modelonderzoek van 1992 is voor diverse geometrieën onderzoek gedaan naar onder andere het drukverloop op het talud, golfloop en golfoverslag. Wat betreft de geometrie van de constructies werd gevarieerd in de taludhelling (1:3 of 1:4), de bermbreedte (0,40 m, 1,00 m of geen berm) en het voorland (wel of niet aanwezig).

In dit onderzoek worden uitsluitend de proevenseries zonder verhoogd voorland beschouwd. Tevens blijven de golfloop- en golfoverslagmetingen buiten beschouwing.

Het modelonderzoek van De Waal (1992) is uitgevoerd in de Scheldegoot van het voormalige Waterloopkundig Laboratorium (tegenwoordig Deltares). Deze golfgoot voor 2-dimensionaal onderzoek heeft een lengte van 55 m, een breedte van 1,00 m en een hoogte van 1,20 m. Alle in dit rapport vermelde afmetingen zijn modelwaarden, tenzij uitdrukkelijk anders vermeld wordt.

3.1 Geometrie modelopstelling

In het kader van dit onderzoek zijn 6 proevenseries uit het modelonderzoek van De Waal relevant. Tabel 3.1 geeft een overzicht van de uitgevoerde proevenseries met de bijbehorende bermbreedte en taludhelling.

Proevenserie	Bermbreedte	Talud
3000-serie	0,00 m	1:3
3100-serie	0,40 m	
3200-serie	1,00 m	
4000-serie	0,00 m	1:4
4100-serie	0,40 m	
4200-serie	1,00 m	

Tabel 3.1 Overzicht geometrie modelopstelling per proevenserie

Indien een berm aanwezig was, had die een helling van 1:15. De zeewaartse zijde van de berm had in alle gevallen een hoogte van 0,60 m ten opzichte van de gootbodem. Een overzicht van de modelopstellingen van de proevenseries is gegeven in bijlage B.1 en B.2. Afwijkingen in de geometrie bedragen minder dan 1 mm.

3.2 Proevenprogramma

Naast de variaties in de geometrieën van de constructies, werd tijdens de proevenseries gevarieerd in de hydraulische parameters h (waterdiepte), H_s (significante golfhoogte) en T_p (spectrale golfpiekperiode). Een overzicht van het totale proevenprogramma is gegeven in de bijlagen A.1 en A.2 in de kolommen onder 'Randvoorwaarden'.

In die bijlagen zijn de randvoorwaarden van diverse proeven rood gemarkeerd. De meetdata van die proeven zijn helaas niet volledig beschikbaar. De meetdata van de in 1992 uitgevoerde proeven zijn in de loop der tijd opgeslagen en gearhiveerd op enkele cd-rom's. De data van proeven uit de gehele 4000-serie en een deel van de 3100- en 4100-series bleken beschadigd en niet meer volledig inleesbaar. Diverse pogingen om de data toch weer

zichtbaar te maken, leverden uiteindelijk niet het gewenste resultaat op. Daarom is besloten deze proeven in het vervolg van de analyse buiten beschouwing te laten. Van de overige proeven zijn de meetdata wel volledig beschikbaar.

Binnen de beschikbare proeven werd de waterdiepte gevarieerd tussen 0,52 en 0,76 m ten opzichte van de gootbodern. De golfhoogte werd gevarieerd tussen 0,099 en 0,196 m. En de golfperiode werd gevarieerd tussen 1,38 en 2,82 s. De gekozen golfhoogten en golfsteilheden hadden als resultaat dat de golfsteilheid tijdens de proevenseries verspreid lag tussen 0,010 en 0,041.

3.3 Metingen

In het onderzoek van De Waal (1992) werden zowel drukken, golfeigenschappen, golfploop en golfoverslag gemeten. In het kader van het onderhavige onderzoek worden uitsluitend de drukmetingen en de metingen van de golfparameters beschouwd.

3.3.1 Drukken

Het verloop van de stijghoogte over het talud werd gemeten met drukopnemers (DRO's). De drukopnemers bevonden zich in kokers, die verzonken in het talud geplaatst waren: één in het ondertalud, één in het boventalud en, indien van toepassing, één in de berm.

De kokers waren zodanig geplaatst dat ze in elkaars verlengde in de hartlijn van de goot lagen. Ze vormden tezamen de leiding voor de kabels tussen de drukopnemers en de registratieapparatuur. De kokers werden afgedekt met afdekplaten, die exact in het vlak van het talud en de berm lagen. In deze afdekplaten waren de drukopnemers exact vlak met het taludoppervlak gemonteerd. Er werden diverse voorgeboorde meetplaten gebruikt, met gaten h.o.h. 40 mm. De gaten hadden een diameter van 16 mm. Vanwege het beperkte aantal meetversterkers kon van hoogstens 35 drukopnemers het signaal geregistreerd worden. In de gaten waarin geen drukopnemers werden gemonteerd, werden zogenaamde dummy's geplaatst, zodat alle gaten nauwkeurig waren opgevuld.

Gedurende de proevenseries werd gevarieerd in de locaties van de drukopnemers. In de bijlagen B.3 en B.4 wordt voor de beschikbare proevenseries (zie paragraaf 3.2) een overzicht gegeven van de drukopnemerlocaties (rode stippen) op het talud (zwarte lijn).

Daarin wordt tevens per situatie aangegeven bij welke waterstanden werd getest.

Opgemerkt wordt dat de proeven 4111 – 4114 en 4117 niet in de bijlagen B.3 en B.4 worden getoond. Bij die proeven lag de waterstand hoger dan de hoogstgelegen drukopnemer. Die proeven vallen buiten het doel van dit onderzoek en worden daarom gedurende de verdere analyse niet meer beschouwd.

Voorafgaand aan de proeven werden de drukopnemers bij stil water op nul gezet. Hierdoor wordt door de drukopnemers onder water in principe de relatieve stijghoogte ten opzichte van de stilwaterlijn (SWL) gegeven. Voor de drukopnemers boven water geldt dat ze de stijghoogte ten opzichte van de plaatshoogte van de betreffende drukopnemer weergeven. De combinaties drukopnemer-meetversterker werden zodanig gekozen dat bij verschillende waterstanden de verschillen in de meetsignalen voor alle kanalen even groot waren. In alle proeven werd bemonsterd met een frequentie van 50 Hz.

3.3.2 Golfcondities

Er is gebruik gemaakt van 2 golfhoogtemeters (GHM's) om de inkomende en gereflecteerde golfcondities tijdens de proevenseries te meten. De GHM's waren halverwege het golfschot en de constructie geplaatst. Alle proeven werden uitgevoerd met een standaard JONSWAP-spectrum ($\gamma = 3,3$).

Afwijkingen in de gemeten golfhoogte ten opzichte van de gewenste golfhoogte zijn kleiner dan 5 mm. Afwijkingen in de golfperiode bedragen minder dan 0,1 sec. Bij grotere afwijkingen werd de proef herhaald met verbeterde instellingen van de golfschotsturing.

4 Voorbewerking van drukmetingen in Scheldegoot

Voorafgaand aan de analyse van de meetdata waren enkele voorbewerkingen van de ruwe meetdata noodzakelijk. Ondanks de nauwkeurige ijking van de drukopnemers en de zorgvuldige kwaliteitsbewaking tijdens de uitvoering van de proeven was het noodzakelijk de ruwe meetdata te controleren en waar nodig te corrigeren.

Omdat in de analyse wordt gezocht naar steile stijghoogtefronten is het belangrijk dat de drukopnemers ten opzichte van elkaar geen afwijkingen vertonen. Eventuele afwijkingen zijn met visualiserende software opgespoord, waarna de ruwe data werden gecorrigeerd.

Enkele belangrijke aanpassingen zijn:

- In de ruwe meetdata van de drukopnemers zijn als gevolg van kortdurende storingen op het meetsignaal in enkele gevallen grote pieken zichtbaar, gedurende één meetsample. Dat kan zowel mechanische als elektronische oorzaken hebben. De betreffende pieken geven onterechte waarden en zijn verwijderd door de piek te vervangen door het gemiddelde van de gemeten drukken direct voor en na de piek.
- In enkele gevallen vertoonde een drukopnemer tijdens de proef een constant signaal. De meetdata van de betreffende drukopnemers zijn uit de ruwe meetdata verwijderd.
- Ondanks nauwkeurige ijking van de drukopnemers komt het soms voor dat een drukopnemer gedurende een proef structureel iets te hoge of te lage waarde geeft. Bij dergelijke drukopnemers werden de gemeten waarden structureel verhoogd of verlaagd met het vastgestelde verschil.

Per proef is voor elke drukopnemer (DRO) een serie ruwe drukmeetdata beschikbaar. Na het controleren en eventueel corrigeren van die ruwe meetdata, zoals hierboven beschreven, was een verdere bewerking van de ruwe meetdata noodzakelijk. Om ruis uit de ruwe meetdata te verwijderen, werden de meetdata gecorrigeerd door een voortschrijdend gemiddelde over de tijd uit te voeren.

Het voortschrijdend gemiddelde van de stijghoogte op tijdstip t is berekend volgens de volgende formule:

$$\phi_{top} = (\phi_{t-2,ruw} \cdot f_{t-2}) + (\phi_{t-1,ruw} \cdot f_{t-1}) + (\phi_{t,ruw} \cdot f_t) + (\phi_{t+1,ruw} \cdot f_{t+1}) + (\phi_{t+2,ruw} \cdot f_{t+2}) \quad (4.1)$$

Met:

ϕ_{top} = voortschrijdend gemiddelde van de stijghoogte op de toplaag op tijdstip t (m).

$\phi_{t+n,ruw}$ = stijghoogte op de toplaag in de ruwe meetdata, n meetsamples na tijdstip t (m).
(de tijd tussen 2 meetsamples bedraagt 0,02 s, i.v.m. meetfrequentie = 50 Hz).

f_{t+n} = weegfactor, n meetsamples na tijdstip t (-).

Er is gebruikgemaakt van de volgende waarden van de weegfactoren:

- $f_{t-2} = 0,125$
- $f_{t-1} = 0,25$
- $f_t = 0,25$
- $f_{t+1} = 0,25$
- $f_{t+2} = 0,125$

Aan de stijghoogten op en rondom tijdstip t worden relatief grote weegfactoren toegekend. Naast het uitvlakken van 'ruis' heeft dit als resultaat dat kortdurende golfklappen in verhouding sterker uitgevlakt worden dan golffronten en langer durende golfklappen. Daardoor wordt voorkomen dat de analyse teveel wordt gebaseerd op korte golfklappen, die te kort duren om een zwaar steenzettingselement uit het talud te lichten.

In het verleden is voor dit doel de belasting gefilterd met een laagdoorlaatfilter van 4 Hz (Deltagoetschaal) (Klein Breteler 2000). Vertalen we dit naar de kleine schaal van deze proeven in de Scheldegoot, dan komt dit overeen met ongeveer 10 à 15 Hz. Door het oorspronkelijke 50 Hz signaal te bewerken met bovenstaande formule, leidt dit tot een filtering die ongeveer hiermee overeenkomt.

Het stijghoogteverloop ϕ_{top} is berekend voor alle drukopnemers uit de modelopstelling, zowel boven als onder water.

5 Analyse meetdata Scheldegootproeven

5.1 Opzet analyse

In deze analyse wordt toegewerkt naar een formule waarmee de belasting op het talud boven de stilwaterlijn geschematiseerd kan worden. Belasting op het talud is gerelateerd aan het stijghoogteverschil over de toplaag. Wanneer de stijghoogte in de filterlaag groter is dan op de toplaag, is er sprake van een opwaarts gerichte druk tegen de steenzetting, waardoor afzonderlijke stenen uit het talud gedrukt kunnen worden. De belasting is maximaal als het stijghoogteverschil maximaal is.

Het stijghoogteverschil is gedefinieerd als het verschil tussen de stijghoogte in de filterlaag en de stijghoogte op de toplaag. Bij de metingen van 1992 werd echter alleen de stijghoogte op de toplaag gemeten. De stijghoogte in de filterlaag kon niet worden gemeten, wegens de afwezigheid van een steenzetting en filterlaag. Het stijghoogteverloop in de filterlaag wordt daarom theoretisch benaderd op basis van het stijghoogteverloop op de toplaag (zie paragraaf 5.2). Het denkbeeldige stijghoogteverschil dat daaruit volgt, wordt aangeduid als 'gediptheid'. Deze methode is ontwikkeld door Klein Breteler e.a. (2006).

Volgens een uitgebreid selectieproces is daarna de grote hoeveelheid data met gediptheden teruggebracht tot slechts enkele getallen per proef: het verloop over het talud van de gediptheid met een overschrijdingsfrequentie van 2% (zie paragraaf 5.4).

Om de resultaten praktisch bruikbaar en geschikt te maken voor inpassing in de gebruikelijke formules voor steenzettingen (zoals geprogrammeerd in Steentoets), zijn die gediptheden vervolgens omgerekend naar een fronthoogte bij een bepaald geschematiseerd front (zie paragraaf 5.5). Op basis van de fronthoogteverlopen over het talud, die daaruit volgen, is tenslotte een praktisch bruikbare formule voor het fronthoogteverloop ontwikkeld (zie paragraaf 5.6).

Met de grootte van de fronthoogte als functie van de locatie op het talud kan uiteindelijk de stabiliteit van de steenzetting bepaald worden. Daarvoor wordt gebruikgemaakt van formules voor het stijghoogteverschil over de toplaag (Klein Breteler e.a 1991) en de formules voor het eigengewicht van de stenen en de invloed van wrijving, klemming, traagheid en toestroming, zoals die opgenomen zijn in Steentoets.

5.2 Gediptheid

Voor het bepalen van het maatgevende moment in het verloop van de stijghoogte op de toplaag wordt gebruikgemaakt van de 'gediptheid'. De gediptheid is een maat voor het stijghoogteverschil dat zou optreden als er een steenzetting met filterlaag zou zijn geweest. Gezien het feit dat de proeven zijn uitgevoerd met een glad betontalud, zonder steenzetting en filter, zijn er geen drukken gemeten in de filterlaag. Daarom wordt hier de toevlucht gezocht in de gediptheid.

Voor elk tijdstip wordt een voortschrijdend gemiddelde langs het talud bepaald van de stijghoogte op de toplaag. Dit voortschrijdende gemiddelde is een sterk afgevlakte weergave van de stijghoogteverloop op de toplaag, en lijkt daardoor op de stijghoogte in het filter.

Vervolgens wordt het verschil berekend tussen dit voortschrijdende gemiddelde en de oorspronkelijke stijghoogte. Het grootste positieve verschil per golf is de gediptheid in die golf. Door op deze wijze alle golven te analyseren, kunnen de momenten waarop de gediptheid relatief groot is geselecteerd worden, en dat zijn precies de momenten waarop een steenzetting zwaar belast wordt. Op die momenten kan dan vervolgens de analyse geconcentreerd worden.

Deze methode om de maatgevende momenten te selecteren is ontwikkeld door Klein Breteler e.a. (2006). Het is opgenomen in de golfanalysesoftware 'AnalyseWave'.

Het voortschrijdend gemiddelde van het stijghoogteverloop op de toplaag wordt bepaald met een wegingsformule. Deze wegingsformule heeft de vorm van een gelijkbenige driehoek met basis L en hoogte 1, zie Figuur 5.1. De bewerking gaat als volgt:

- De driehoek wordt met de top bij een bepaalde drukopnemer (DRO) gelegd.
- Het stijghoogteverloop op de toplaag wordt verdeeld in kleine stapjes (in de analyse zijn stapjes van 1 cm gebruikt), symmetrisch ten opzichte van de beschouwde DRO. Tussen elk stapje wordt zogenaamd een 'fictieve' DRO geplaatst. De stijghoogte in die fictieve DRO's wordt berekend door middel van lineaire interpolatie tussen de werkelijke DRO's.
- Voor elke fictieve DRO wordt de bijbehorende wegingsfactor berekend, door die in de driehoek 'af te lezen'. Bij de beschouwde DRO in het midden van de driehoek hoort een wegingsfactor 1. Bij de fictieve DRO's aan de uiteinden van de driehoek horen wegingsfactoren die naar 0 naderen.
- De denkbeeldige stijghoogte in de filterlaag, ϕ_{filter} , bij de beschouwde DRO wordt berekend volgens de onderstaande formule.

$$\phi_{filter} = \frac{(f_{-m} \cdot \phi_{top,-m}) + \dots + (f_{-1} \cdot \phi_{top,-1}) + (f_0 \cdot \phi_{top}) + (f_1 \cdot \phi_{top,1}) + \dots + (f_m \cdot \phi_{top,m})}{f_{-m} + \dots + f_{-1} + f_0 + f_1 + \dots + f_m} \quad (5.1)$$

Met:

ϕ_{filter} = theoretisch benaderd stijghoogteverloop in filterlaag (m).

f_m = wegingsfactor t.p.v. m stapjes na beschouwde DRO (-).

$\phi_{top,m}$ = stijghoogte op toplaag t.p.v. m stapjes na beschouwde DRO (m).

- Tenslotte is de gediptheid bepaald: $\phi_{dip} = \phi_{filter} - \phi_{top}$

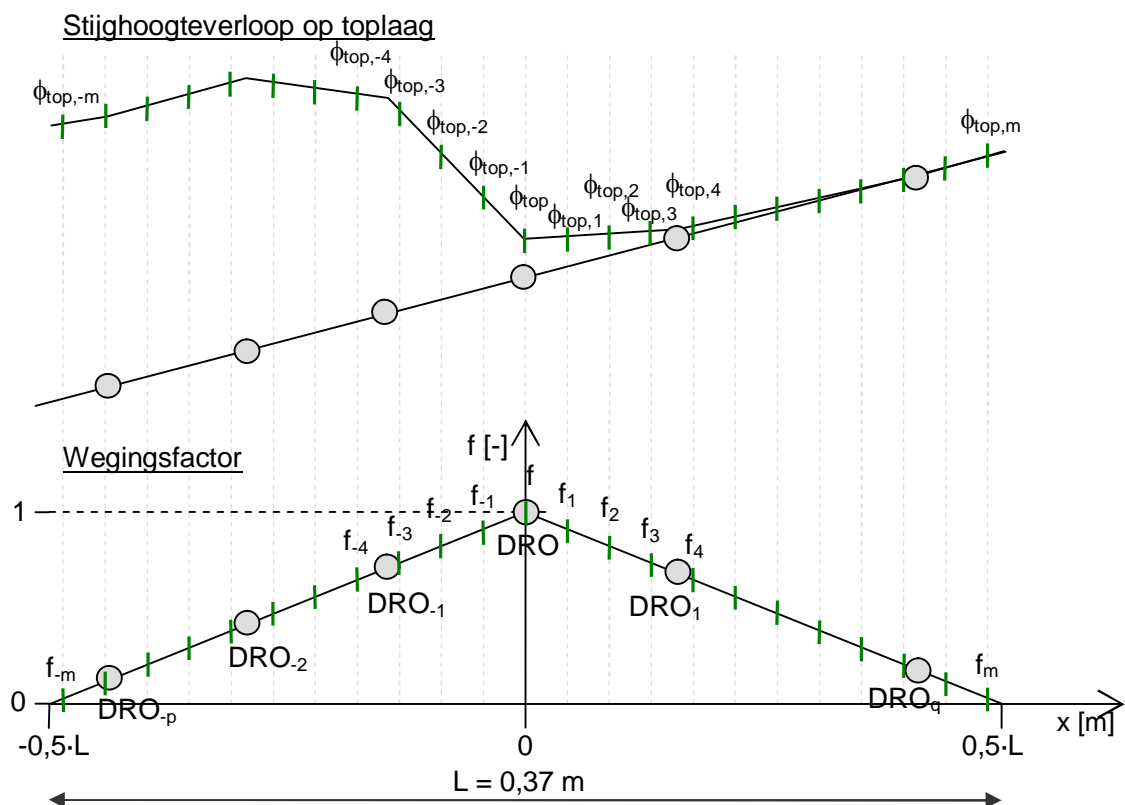
Met: ϕ_{dip} = gediptheid (= theoretisch benaderd stijghoogteverschil over de toplaag) (m).

Op deze wijze is voor elk tijdstip bij elke relevante drukopnemer de gediptheid berekend. Het is bepaald voor de drukopnemer direct onder de stilwaterlijn en de drukopnemers boven de stilwaterlijn, met uitzondering van de drukopnemer die het hoogst op het talud ligt. Ter plaatse van de hoogstgelegen drukopnemer kan de gediptheid niet bepaald worden, wegens gebrek aan meetdata van hoger gelegen locaties.

In het verleden is voor het analyseren van Scheldegootproeven een middelingslengte $L = 0,37$ m aangehouden (Klein Breteler e.a., 2006, en Mourik, 2011). Om deze waarde te kunnen vergelijken met een leklengte in het prototype, moet men bedenken dat de proeven in de Scheldegoot zijn uitgevoerd op een schaal van circa 7 à 15. De overeenkomstige leklengte in het prototype is berekend aan de hand van een stijghoogteverloop op de toplaag dat overeenkomt met die van een golfklap en die van een golf front. Eerst is de gediptheid berekend van dit stijghoogteverloop met de methode zoals weergegeven in Figuur 5.1,

waarbij L is vermenigvuldigd met de schaalfactor. Daarna is het stijghoogteverschil berekend met de formules zoals die opgenomen zijn in Steentoets (Klein Breteler 2009). In deze berekening is de leklengte gevarieerd om te zoeken naar de waarde waarbij het stijghoogteverschil gelijk is aan de gediptheid.

Een middelingslengte $L = 0,37$ m op de schaal van de Scheldegoot blijkt in het prototype overeen te komen met een leklengte $\Lambda = 0,6$ à $0,9$ m, en voor $L = 0,20$ m is dit $\Lambda = 0,25$ à $0,4$ m. Deze twee waarden van de middelingslengte L zijn gebruikt in het vervolg van de analyse.



Figuur 5.1 Wegingsfactor voor het bepalen van het voortschrijdend gemiddelde ten behoeve van het berekenen van de gediptheid.

5.3 Begin- en eindtijdstippen van golven

Voor het bepalen van de begin- en eindtijdstippen van de inkomende golven, is gebruik gemaakt van de door Deltares ontwikkelde golfanalysesoftware 'AnalyseWave'. Zie bijlage G uit Klein Breteler e.a. (2006) voor de documentatie van deze software.

Omdat AnalyseWave is ontwikkeld voor het analyseren van data van onder water gelegen drukopnemers, zijn in het programma alleen de meetdata (stijghoogteverloop ϕ_{top}) ingevoerd van de drukopnemers onder de stilwaterlijn.

In AnalyseWave wordt bij de meest zeewaarts gelegen drukopnemer steeds gezocht naar tijdstippen waarop het stijghoogtesignaal in opwaartse richting het niveau van de stilwaterlijn passeert (ofwel, het tijdstip waarop een opwaartse nuldoorgang plaatsvindt). Het begintijdstip van een golf is vervolgens vastgesteld op $0,1 \cdot T_m$ voor een opwaartse nuldoorgang. Het

eindtijdstip is gelijk aan het begintijdstip van de volgende golf. De software corrigeert voor deze specifieke analyse automatisch voor ruis in het meetsignaal.

Doordat AnalyseWave de begin- en eindtijdstippen baseert op de meetdata van de meest zeewaartse drukopnemer, zal de grootste belasting op het talud boven de stilwaterlijn veelal enige tijd later optreden dan het moment waarop de golf volgens AnalyseWave de constructie bereikt. Voorafgaand aan het analyseren van de stijghoogten boven de stilwaterlijn wordt daarom bij de door AnalyseWave berekende begin- en eindtijdstippen steeds een extra tijdsduur opgeteld. Deze benodigde extra tijdsduur varieert per proef als gevolg van de variërende geometrie en golfparameters. De extra tijdsduur d_t wordt daarom voor elke proef afzonderlijk bepaald.

Binnen elke afzonderlijke golf wordt gezocht naar het moment waarop de maximale gediptheid optreedt. Door de begin- en eindtijdstippen van de golven steeds een tijdstapje van 0,1 s op te schuiven, komen de momenten met de maximale belastingen steeds beter in het midden van de golf te liggen.

Dit principe wordt voor een willekeurige proef (proef 3112) weergegeven in bijlage B.5. In de bijlage wordt ter illustratie zowel voor een extra tijdsduur $d_t = 0,3$ s (bovenste figuur) en $d_t = 0,9$ s (onderste figuur) per golf weergegeven op welke moment de belasting maximaal is ten opzichte van de duur van de golf. De horizontale as geeft de begintijdstippen van de golven. De verticale as geeft relatieve tijdstippen ten opzichte van de golfduur.

Om de golven onderling met elkaar te vergelijken, is elke golfduur teruggebracht tot 1. De gekleurde rondjes geven per golf het relatieve tijdstip ten opzichte van de golfduur, waarop de gediptheid maximaal is. De groene rondjes hebben betrekking op de drukopnemer direct onder de stilwaterlijn, de rode rondjes op de op een na hoogste drukopnemer, en de blauwe rondjes op de drukopnemer daar tussenin.

Er wordt uitgegaan van de veronderstelling dat een front het talud op schuift. Vanuit die veronderstelling zal binnen een golf de maximale gediptheid later optreden naarmate de drukopnemer hoger op het talud ligt. Daarom wordt per proef gezocht naar een 'extra tijdsduur' waarbij voor alle beschouwde drukopnemers geldt dat de tijdstippen van de maximale gediptheden zo goed mogelijk tussen de begin- en eindtijdstippen van de golven vallen. Uit bijlage B.5 volgt voor proef 3112 dat daar niet aan wordt voldaan bij korte extra tijdsduren. Bij een extra tijdsduur van $d_t = 0,9$ s wel.

Met AnalyseWave werd per test het aantal golven bepaald. Het aantal golven (N) is weergegeven in de bijlagen A.1 en A.2 in de kolommen onder 'Analyse meetgegevens'.

5.4 Selectieproces maximale gediptheid

Een volgende stap in de analyse is het bewerken van de grote meetdatabestanden tot een overzichtelijke en bruikbare set gegevens.

Voor elke afzonderlijke golf wordt voor de beschouwde drukopnemers de maximale gediptheid bepaald (onder de 'beschouwde drukopnemers' wordt verstaan: de drukopnemer direct onder de stilwaterlijn tot de op één na hoogste drukopnemer). Op basis van de bepaalde gediptheden worden per drukopnemer de 5% golven geselecteerd met de grootste gediptheid ($N_{5\%}$). Daarbij geldt dat $N_{5\%} = 0,05 \cdot N$. Zowel N als $N_{5\%}$ worden gegeven in de bijlagen A.1 en A.2 in de kolommen onder 'Analyse meetgegevens'.

Per drukopnemer wordt van de zo verkregen 5% grootste gediptheden het gemiddelde berekend. De gediptheid die daaruit volgt, is een maat voor de gediptheid met een

overschrijdingsfrequentie van ongeveer 2% en wordt aangeduid als $\phi_{dip2\%}$. Deze waarden worden opgeslagen. Tevens worden van de beschouwde drukopnemers de locaties ten opzichte van de teen van de constructie omgerekend naar locaties ten opzichte van het snijpunt van het talud met de stilwaterlijn.

Uiteindelijk geeft dat per test het verloop van $\phi_{dip2\%}$ over het beschouwde taluddeel, ten opzichte van het snijpunt van het talud met de stilwaterlijn.

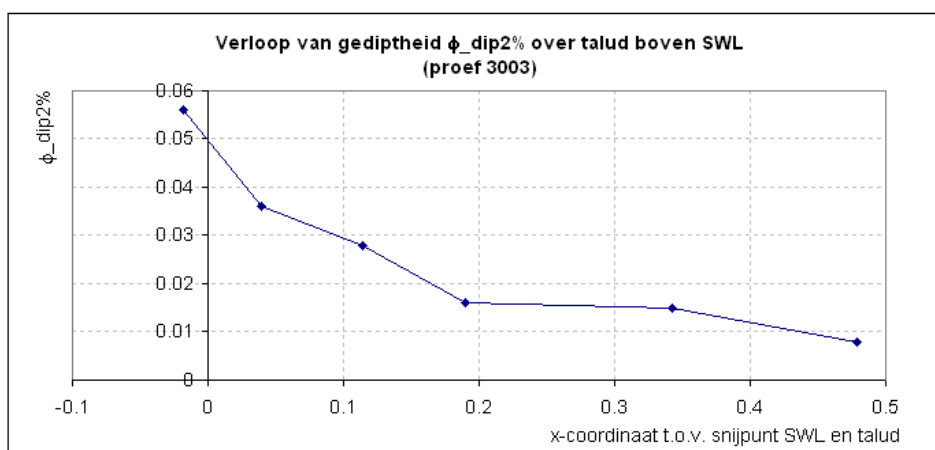
Voorbeeld:

Het beschreven selectieproces wordt verduidelijkt aan de hand van de willekeurig gekozen proef 3003. In proef 3003 zijn door AnalyseWave 841 golven onderscheiden. Dus $N = 841$. Daarvan is 5 procent gelijk aan $N_{5\%} = 0,05 \cdot 841 = 42$ golven.

Voor elke afzonderlijke beschouwde drukopnemer is vervolgens het volgende selectieproces gevolgd: voor alle 841 golven wordt de maximale gediptheid bepaald. De 841 golven worden op basis van de berekende gediptheid gerangschikt op volgorde van de gediptheid. De 42 golven met de grootste gediptheid worden daaruit geselecteerd. Uit die zwaarste 42 golven wordt vervolgens de gediptheid $\phi_{dip2\%}$ berekend. Per test levert dat per drukopnemer uiteindelijk één waarde op voor $\phi_{dip2\%}$. Zie Tabel 5.1 en Figuur 5.2.

	$\phi_{dip2\%}$ op locatie x [m] t.o.v. waterlijn					
proef	X=-0.018	X=0.039	X=0.114	X=0.190	X=0.342	X=0.479
3003	0.056	0.036	0.028	0.016	0.015	0.008

Tabel 5.1 Gediptheid $\phi_{dip2\%}$ op locatie x [m] t.o.v. stilwaterlijn.



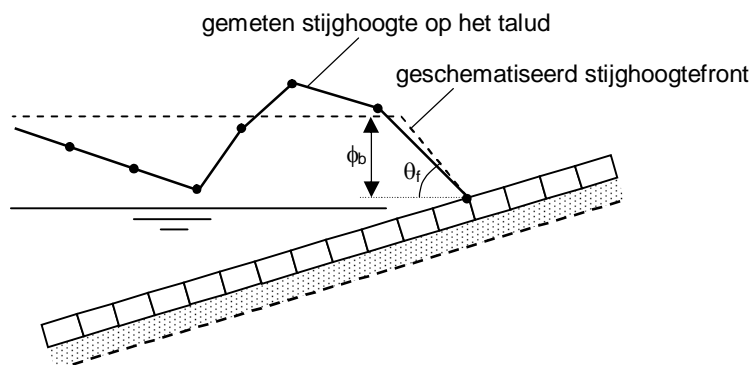
Figuur 5.2 Verloop van gediptheid $\phi_{dip2\%}$ over talud boven stilwaterlijn (proef 3003).

5.5 Bepaling fronthoogte en helling

De analyse van de proeven heeft per proef en per locatie op het talud de gediptheid opgeleverd met een overschrijdingsfrequentie van 2%: $\phi_{dip2\%}$. De gediptheid kan gezien worden als een maat voor het stijghoogteverschil wat daar ter plaatse zou zijn opgetreden als het talud bekleed was met een steenzetting.

De belasting op het talud wordt nu geschematiseerd tot een eenvoudig stijghoogtefront dat dezelfde gediptheid oplevert. Zo'n vereenvoudigd stijghoogteverloop is eenvoudiger in een rekenmodel op te nemen, dan het gecompliceerde verloop van de stijghoogte op het talud zoals het is gemeten tijdens de proeven.

Als vereenvoudigd stijghoogteverloop is gekozen voor een front met hoogte ϕ_b en helling θ_f , zoals weergegeven in Figuur 5.3.



Figuur 5.3 Vereenvoudigd stijghoogteverloop met dezelfde gediptheid (schematisch weergegeven)

Voor de hoek θ_f is een vaste waarde gekozen, zodat er eenduidig een waarde voor de fronthoogte ϕ_b kan worden bepaald, afhankelijk van de grootte van de gediptheid.

De grootte van de gediptheid $\phi_{dip2\%}$ is afhankelijk van de gekozen middelingslengte L tijdens het doorrekenen van de proeven. Uiteraard moet nu voor het berekenen van ϕ_b dezelfde waarde van L gebruikt worden als die gebruikt is voor het berekenen van de gediptheid. Bovendien moet de waarde van de fronthelling θ_f zo gekozen worden dat wanneer een andere waarde van L gebruikt zou worden voor het doorrekenen van de proeven en het bepalen van ϕ_b , er toch ongeveer dezelfde waarde van ϕ_b resulteert. Doordat het stijghoogteverloop in de proef wat afwijkt van het vereenvoudigde stijghoogteverloop zal dit echter nooit precies lukken. Onderstaand wordt aan de hand van een analyse van drie proeven en twee waarden van L een goede schatting gegeven van de ideale θ_f .

Allereerst is voor de proeven 3003, 3004 en 3010 de grootte van de gediptheid berekend voor een waarde van $L = 0,37$ m en $L = 0,20$ m, zie Tabel 5.2 en Tabel 5.3. Deze zijn berekend met het werkelijk gemeten stijghoogteverloop. De waarde $L = 0,37$ m sluit aan op de in het verleden gebruikte waarde voor het berekenen van de gediptheid. De andere waarde is wat kleiner gekozen, omdat de overeenkomstige leklengte bij een middelingslengte van $0,37$ m nog vrij groot is, namelijk ca. $0,6$ à $0,9$ m (afhankelijk van de schaal, zie paragraaf 5.2).

	Gediptheid berekend met $L = 0,37$ m op locatie $x = \dots$ m (t.o.v. waterlijn)					
proef	$X=-0.018$	$X=0.039$	$X=0.114$	$X=0.190$	$X=0.342$	$X=0.479$
3003	0.056	0.036	0.028	0.016	0.015	0.008
3004	0.059	0.042	0.031	0.018	0.015	0.009
3010	0.046	0.025	0.016	0.011	0.009	0.006

Tabel 5.2 Gediptheid berekend met $L = 0,37$ m.

Hiermee is met een iteratief proces de ideale combinatie van θ_f en ϕ_b berekend bij het vereenvoudigde stijghoogtefront, die dezelfde gediptheid geeft als Tabel 5.2 en Tabel 5.3. Daartoe is eerst een waarde van θ_f gekozen, en is de bijbehorende waarde van $\phi_{b,L=0,37}$ berekend met $L = 0,37$ m. Die waarde van $\phi_{b,L=0,37}$ is zo bepaald dat de gediptheid volgens de formules uit paragraaf 5.2 met het vereenvoudigde stijghoogtefront dezelfde is als in Tabel 5.2.

	Gediptheid berekend met L = 0,20 m op locatie x = ... m (t.o.v. waterlijn)					
proef	X=-0.018	X=0.039	X=0.114	X=0.190	X=0.342	X=0.479
3003	0.037	0.024	0.018	0.010	0.008	0.005
3004	0.040	0.027	0.021	0.013	0.008	0.005
3010	0.030	0.015	0.010	0.007	0.005	0.003

Tabel 5.3 Gediptheid berekend met L = 0,20 m.

proef	X = -0.018 m		X = 0.039 m		X = 0.114 m		X ≥ 0.190 m	
	θ _f (°)	φ _b (m)	θ _f (°)	φ _b (m)	θ _f (°)	φ _b (m)	θ _f (°)	φ _b (m)
3003	63	0,140	50	0,075	40	0,050	?	≤ 0,010
3004	65	0,140	54	0,090	45	0,055	?	≤ 0,015
3010	58	0,100	30	0,045	?	0,010	?	≤ 0,010

Tabel 5.4 Ideale combinatie van θ_f en φ_b

Vervolgens is met dezelfde θ_f en de gediptheid uit Tabel 5.3 met L = 0,2 m de waarde van φ_{b,L=0,2} berekend. Als φ_{b,L=0,37} ongelijk is aan φ_{b,L=0,2}, dan was kennelijk de gekozen waarde van θ_f verkeerd, en is de berekening opnieuw gedaan met een aangepaste waarde. Na enige tijd proberen is zo de combinatie gevonden van θ_f en φ_b waarbij kennelijk het resultaat onafhankelijk is van de grootte van L. Deze waarden zijn gegeven in Tabel 5.4.

Wat hoger op het talud, als x > 0,114 à 0,190 m, is de berekende waarde van φ_b zo klein dat het niet meer mogelijk is om een waarde van θ_f te bepalen. In feite is dan elke waarde bruikbaar, omdat het resultaat nauwelijks meer afhankelijk is ervan. Dit is in de tabel aangegeven met een vraagteken.

De resultaten in Tabel 5.4 geven een indicatie van de grootte van θ_f. Dit is echter niet het enige waar op gelet moet worden bij het bepalen van de waarde.

Een ander aspect is dat de waarde van θ_f zo groot mogelijk moet zijn om het vereenvoudigde stijghoogtefront praktisch bruikbaar te laten zijn. Deze problematiek houdt verband met de formules waarmee uiteindelijk het stijghoogteverschil wordt berekend.

Uiteindelijk is het de bedoeling om met het tot een front geschematiseerde stijghoogte verloop een stijghoogteverschil over een steenzetting boven de stilwaterlijn te berekenen. Gezien het gekozen verloop kan gebruikgemaakt worden van de volgende formule (Klein Breteler e.a. 1991):

$$\phi_w = \frac{\Lambda}{2} \left(\cos \alpha \tan \theta_f \left(1 - \exp \left(\frac{-\phi_b}{\Lambda \cos \alpha \tan \theta_f} \right) \right) + \sin \alpha \right) \cdot \left(1 - \exp \left(\frac{-2z_f}{\Lambda \sin \alpha} \right) \right) \quad (5.2)$$

Met:

φ_w = maximale stijghoogteverschil over de toplaag (m)

Λ = leklengte (m)

α = taludhelling (°)

φ_b = hoogte van het stijghoogtefront (m)

θ_f = helling van het stijghoogtefront (°)

z_f = niveau van de freatische lijn ten opzichte van de locatie waar het stijghoogteverschil maximaal is (m)

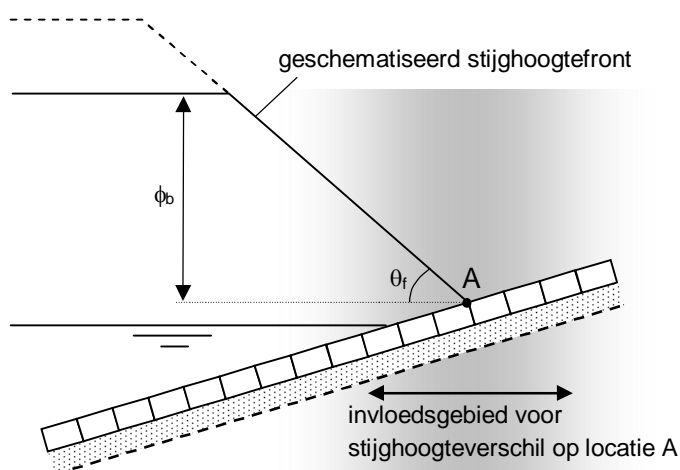
In deze formule is ook het niveau van de freatische lijn, z_f , een relevante variabele. In paragraaf 2.2 is uitgelegd dat aan de hand van de Deltagootproeven geconcludeerd is dat de freatische lijn betrekkelijk hoog ligt. Ter vereenvoudiging van de berekeningen wordt aangenomen dat de freatische lijn zeer hoog ligt, waardoor de term $\exp(-2z_f/(\Lambda \sin \alpha))$ verwaarloosbaar wordt. Met deze aanname wordt het stijghoogteverschil over de toplaag iets overschat, waardoor dit een conservatief (veilig) resultaat geeft.

Met deze vereenvoudiging wordt de formule:

$$\phi_w = \frac{\Lambda}{2} \left(\cos \alpha \tan \theta_f \left(1 - \exp \left(\frac{-\phi_b}{\Lambda \cos \alpha \tan \theta_f} \right) \right) + \sin \alpha \right) \quad (5.3)$$

In de praktijk blijkt dat met deze formule het stijghoogteverschil steeds minder afhankelijk is van ϕ_b naarmate de hoogte van het stijghoogtefront ϕ_b groter wordt, zie Figuur 5.5. Dit geeft een beperking van de praktische bruikbaarheid van het vereenvoudigde stijghoogtefront. Normaal zou men verwachten dat de belasting (stijghoogteverschil) toeneemt naarmate de golfhoogte toeneemt. Maar als het stijghoogteverschil niet meer afhankelijk is van ϕ_b , dan neemt de belasting niet meer toe met toenemende golfhoogte, zelfs niet als de golfhoogte oneindig groot wordt.

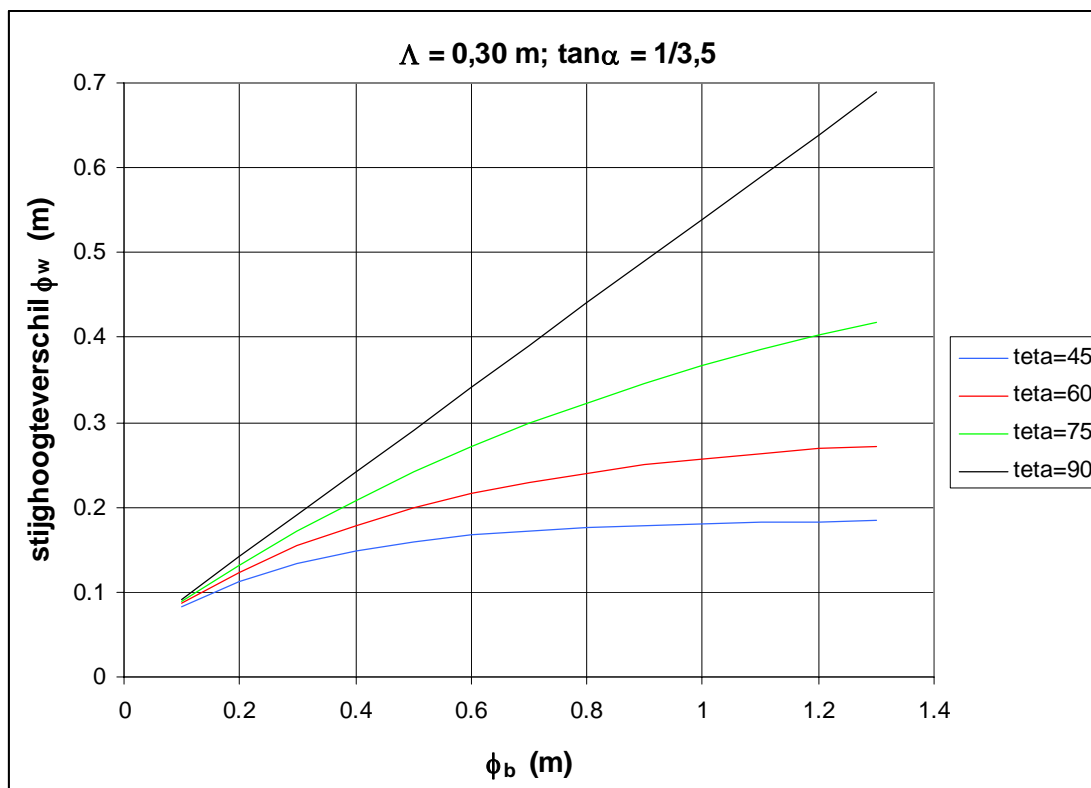
Dit probleem hangt specifiek samen met de gekozen eenvoudige vorm van het stijghoogteverloop op de toplaag. In Figuur 5.4 is te zien dat de grootte van het stijghoogteverschil op een bepaalde locatie afhankelijk is van het verloop van de stijghoogte op de toplaag in de buurt daarvan. De grootte van dit gebied is een paar leklengtes groot. Zodra de top van het stijghoogtefront buiten dit gebied valt, maakt het niet meer uit of het front hoger wordt gekozen, want het stijghoogteverschil wordt er niet meer door beïnvloed. Het valt immers buiten het invloedsgebied.



Figuur 5.4 Invloedsgebied voor stijghoogteverschil op locatie A, waarbij top van stijghoogtefront buiten dit gebied ligt.

Naarmate de helling van het front θ_f kleiner is, valt de top van het stijghoogtefront eerder buiten dit invloedsgebied. Daarom moet θ_f niet te klein gekozen worden.

Bovendien geldt dat als de gediptheid met een vrij grote waarde van de middelingslengte L wordt berekend, een wat groot gekozen θ_f conservatieve resultaten geeft voor ϕ_b (veilig).



Figuur 5.5 Stijghoogteverschil als functie van ϕ_b en θ_r (teta) bij een leklengte van 0,3 m en een talud van 1:3,5.

In Figuur 5.5 is te zien dat het stijghoogteverschil lineair toeneemt met ϕ_b als gerekend wordt met $\theta_r = 90^\circ$. Deze waarde is echter niet geschikt, omdat het stijghoogteverschil dan nauwelijks afhankelijk is van de leklengte. Als $\theta_r = 45^\circ$ neemt het stijghoogteverschil vanaf $\phi_b = 0,6$ à $0,8$ m nauwelijks meer toe, en is daarom ook minder geschikt. Het is te verwachten dat in de praktijk de waarde van ϕ_b niet groter wordt dan orde 1 m, en daarom wordt gekozen voor $\theta_r = 75^\circ$. Deze waarde is wat groter dan volgt uit Tabel 5.4, en zal daardoor een lichte overschatting geven van het stijghoogteverschil bij de leklengtes kleiner dan $0,5$ à $0,8$ m (middellingslengte $L < 0,37$ m).

5.6 Verloop van fronthoogte over het talud

Uit de analyse van de proeven volgde per proef en per drukopnemer de gediptheid met een overschrijdingsfrequentie van 2 procent: $\phi_{\text{dip}2\%}$ (zie paragraaf 5.4). De belasting op het talud werd vervolgens geschematiseerd tot een eenvoudig stijghoogtefront dat dezelfde gediptheid oplevert (zie paragraaf 5.5). Elke waarde voor de gediptheid werd volgens die methode omgerekend naar een representatieve fronthoogte. Voor elke proef leverde dat een verloop op van de fronthoogte over het talud. Dit verloop wordt aangeduid als 'fronthoogteverloop'.

Omdat de fronthoogte gebaseerd wordt op $\phi_{\text{dip}2\%}$ gaat het om een fronthoogte die door 2% van golven wordt overschreden: $\phi_{b2\%}$.

Het verloop van de fronthoogte bij diverse taludhellingen en bermgeometrieën wordt weergegeven in de bijlagen B.7 t/m B.21. Voor het vinden van het juiste verband tussen de fronthoogteverlopen werd op de x-as en de y-as op diverse manieren gevarieerd in de toevoeging van relevante parameters. In alle gevallen stond op de y-as een dimensieloos

gemaakte fronthoogte. Op de x-as stond een dimensieloos gemaakte afstand ten opzichte van de stilwaterlijn.

5.6.1 Dimensieloze fronthoogte en invloed golfsteilheid

Vrijwel alle proeven werden uitgevoerd met een andere significante golfhoogte. Om de proeven één op één te kunnen vergelijken, is de fronthoogte dimensieloos gemaakt door het te delen door de significante golfhoogte. Dat geeft op de y-as:

$$\frac{\phi_{b2\%}}{H_s} \quad (-)$$

Onder de stilwaterlijn heeft de golfsteilheid een significante invloed op de grootte van de belasting op het talud. In de formules voor het stijghoogtefront uit Klein Breteler (2009) wordt de dimensieloze fronthoogte gedeeld door de wortel van de golfsteilheid.

Deze belangrijke invloed van de golfsteilheid werd aanvankelijk ook verwacht boven de stilwaterlijn. Bij het bepalen van de invloed van de golfsteilheid bleek echter dat de golfsteilheid boven de stilwaterlijn geen belangrijke invloed meer heeft. De golfsteilheid wordt dan ook niet toegevoegd als factor in de dimensieloze fronthoogte.

5.6.2 Dimensieloze afstand tot de stilwaterlijn

De dimensieloze fronthoogten worden uitgezet tegen een dimensieloze afstand ten opzichte van de stilwaterlijn. Als basis voor die dimensieloze afstand kan gekozen worden voor de horizontale afstand, x , of voor de verticale afstand, z . Om de afstand dimensieloos te maken, ligt het voor de hand de afstand te delen door de golfoploop met een overschrijdingsfrequentie van 2 procent, $z_{2\%}$, of door de significante golfhoogte, H_s .

De waarden voor $z_{2\%}$ werden voor elke proef bepaald met het programma PC-Overslag en worden weergegeven in de bijlagen A.1 en A.2. Dit betreft de golfoploophoogte van de beproefde constructie, dus indien van toepassing inclusief berm. De in PC-Overslag gehanteerde rekenmethode wordt beschreven in TAW (2002).

Wanneer als basis gekozen wordt voor de verticale afstand, z , dan heeft delen door $z_{2\%}$ voorlopig de voorkeur wanneer we het belastingmechanisme beschouwen. Bij geen enkele proef kunnen immers belastingen optreden op een niveau dat hoger ligt dan $z_{2\%}$.

Wanneer als basis echter gekozen wordt voor de horizontale afstand, x , dan is delen door $z_{2\%}$, mede vanwege de aanwezigheid van de bermen, mogelijk niet de meest voor de hand liggende optie. In dat geval is het evenzeer mogelijk de horizontale afstand, x , dimensieloos te maken door te delen door H_s .

Gedurende de analyse werden de dimensieloze fronthoogteverlopen ($\phi_{b2\%}/H_s$) uitgezet tegen de volgende dimensieloze afstanden:

$$\frac{z}{z_{2\%}}, \quad \frac{z}{H_s}, \quad \frac{x}{z_{2\%}} \quad \text{en} \quad \frac{x}{H_s} \quad (-)$$

Daarbij is de invloed van de berm op $z_{2\%}$ alleen boven de berm meegeteld. Immers, het oplopende water, dat een stijghoogtefront vormt, heeft onder de berm de invloed ervan nog niet gemerkt. Er is slechts een marginale invloed op het front te verwachten van de door de berm iets veranderde golfneerloop, maar die is in deze analyse verwaarloosd.

In de huidige analyse is de berm invloed voorlopig ook meegeteld op locaties op de berm.

In alle gevallen werd een fronthoogteverloop zichtbaar dat het grootst is bij de stilwaterlijn en snel afneemt naarmate de afstand groter wordt.

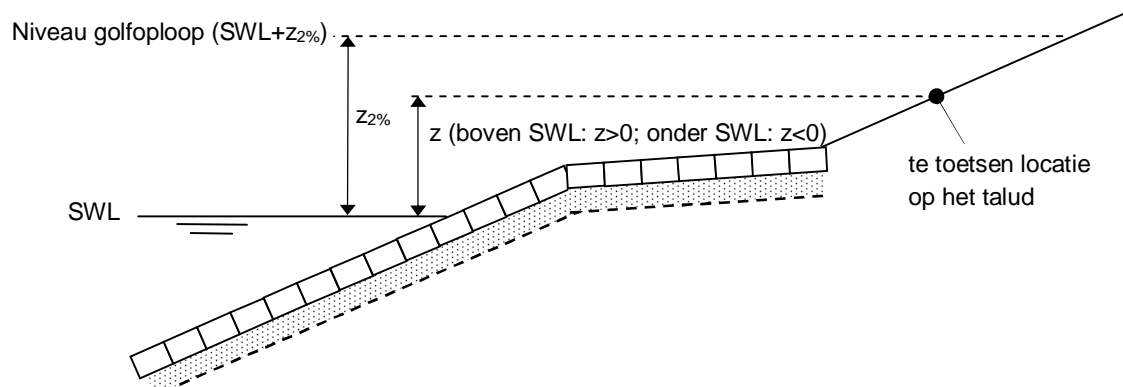
Verder is het opvallend dat de dimensieloze fronthoogte nauwelijks afneemt op een berm (zie bijlagen B.15 t/m B.21). Daaruit blijkt dat niet de horizontale afstand relevant is, maar de verticale afstand. Bij gebruik van de verticale afstand werden de meetpunten op de berm samengedrukt en vertoonden de fronthoogteverlopen wel een meer vloeiend verloop (zie bijlagen B.7 t/m B.14).

Daarnaast blijkt dat z/H_s en $z/z_{2\%}$ geen significante verschillen opleveren.

In een eerder ontwikkelde formule voor belastingen boven de stilwaterlijn (Van Steeg & Klein Breteler, 2009) wordt als dimensieloze afstand gebruik gemaakt van $z/z_{2\%}$. Om op die formule aan te sluiten en vanwege de hiervoor beschreven bevindingen wordt in deze analyse verder gewerkt met de volgende dimensieloze afstand:

$$\frac{z}{z_{2\%}} \quad (-)$$

In Figuur 5.6 worden z en $z_{2\%}$ schematisch weergegeven.



Figuur 5.6 Schematische weergave z en $z_{2\%}$ (situatie waarbij SWL onder de berm ligt).

5.6.3 Samenhang per geometrie

Na het uitzetten van de dimensieloze parameters $\phi_{b2\%}/H_s$ en $z/z_{2\%}$ werd het verband zichtbaar tussen de fronthoogteverlopen enerzijds en de berm breedte en bermdiepte anderzijds. Er wordt onderscheid gemaakt tussen proeven zonder berm (recht talud), en berm breedtes van $B_{berm} = 0,40$ en $B_{berm} = 1,00$ m. Daarnaast wordt onderscheid gemaakt tussen proeven waarbij de stilwaterlijn (SWL) boven, op of onder de berm ligt. Als relevant bermniveau is de zeewaartse rand van de berm aangehouden, zoals dat gebruikelijk is bij steenzettingen. In de Scheldegootproeven is dat steeds een niveau van 0,60 m boven de gootbodem.

Zoals in de vorige paragraaf is uitgelegd, is de invloed van de berm op $z_{2\%}$ alleen boven de berm meegeteld. Voor de locaties onder de berm is een fictieve $z_{2\%}$ berekend op een denkbeeldig doorlopend talud met een helling gelijk aan die onder de berm.

De proeven worden volgens de onderstaande indeling gegroepeerd:

- Bijlage B.7: Talud zonder berm

- Bijlage B.8: SWL boven berm ($B_{\text{berm}} = 0,40 \text{ m}$)
- Bijlage B.9: SWL op berm ($B_{\text{berm}} = 0,40 \text{ m}$)
- Bijlage B.10: SWL onder berm ($B_{\text{berm}} = 0,40 \text{ m}$)
- Bijlage B.11: SWL boven berm ($B_{\text{berm}} = 1,00 \text{ m}$)
- Bijlage B.12: SWL op berm ($B_{\text{berm}} = 1,00 \text{ m}$)
- Bijlage B.13: SWL onder berm ($B_{\text{berm}} = 1,00 \text{ m}$)

Uit de bijlagen 7 t/m 13 volgt dat op het talud boven SWL de belasting altijd het grootst is net boven SWL, en dat de belasting afneemt naarmate hoger op het talud wordt gekeken.

Wanneer de proeven beschouwd worden op basis van de indeling per waterstand, dan vallen de volgende verbanden op:

- ‘SWL boven berm’: Er is een vergelijkbaar afnameverloop zichtbaar tussen proeven met een smalle en brede berm, maar bij een smalle berm zijn de belastingen groter dan bij een brede berm.
- ‘SWL op berm’: Ook voor deze waterstand wordt bij een smalle berm een hogere belasting geconstateerd dan bij een brede berm.
- ‘SWL onder berm’: Zowel voor de brede als de smalle berm is een vergelijkbaar afnameverloop zichtbaar. Ook de belastinggrootte komt voor beide bermbreedtes overeen.

Bij taluds zonder berm en taluds met een smalle berm zijn over het algemeen vergelijkbare afnameverlopen zichtbaar. Wanneer bij een smalle berm de stilwaterlijn op de berm ligt (‘SWL op berm’), dan wordt op het talud boven de berm echter een hogere belasting geconstateerd dan bij rechte taluds (talud zonder berm). Dit is een onverwacht resultaat, en maakt het trekken van conclusies over de invloed van een berm moeilijk.

De bermbreedte heeft kennelijk een relevante invloed op de grootte van de belasting. Bij een smalle berm is de belasting groter dan in de situaties waarin er géén of juist een brede berm aanwezig is. Het is denkbaar dat een maximale belasting gevonden wordt bij een bermbreedte daar tussenin. De bermbreedte die bij dat belastingmaximum hoort, is echter onbekend. Hoewel de bermbreedte een relevante parameter blijkt, is het met bovenstaande constatering niet eenvoudig om een verantwoorde formule te ontwikkelen, waarin de bermbreedte en -diepte zijn opgenomen.

Daarom is er voor gekozen één formule te ontwikkelen voor alle situaties, waarin de invloed van de berm niet expliciet is opgenomen. Die formule is bij benadering de omhullende voor alle proeven. Bijlage B.14 geeft een overzicht van de fronthoogteverlopen van alle proeven in één figuur. De omhullende van alle fronthoogteverlopen vertoont vanaf de stilwaterlijn tot $0,4-z_{2\%}$ bij benadering een omgekeerd evenredig verband. Voor dat gedeelte van het talud kan volstaan worden met de functie, die in bijlage B.14 wordt weergegeven met de dikke zwarte lijn.

Voor niveaus hoger op het talud geeft deze functie weliswaar een te grote belasting. Dit heeft voor de praktijk echter nauwelijks consequenties, omdat steenzettingen nooit dunner worden gekozen dan een minimale maat. De belasting is hier zo klein, dat die minimale maat meestal maatgevend zal zijn.

De ‘omhullende’ (dikke zwarte lijn in bijlage B.14) wordt gegeven door de volgende formule:

$$\frac{\phi_{b2\%}}{H_s} = 0,042 \cdot \left(\frac{z}{z_{2\%}} + 0,060 \right)^{-1} \quad (5.4)$$

Met:

ϕ_b = Hoogte van het stijghoogtefront (m)

H_s = Significante golfhoogte (m)

z = Verticale afstand vanaf de stilwaterlijn tot de beschouwde locatie op het talud (boven stilwaterlijn is positief) (m)

$z_{2\%}$ = Golfploophoogte met een overschrijdingsfrequentie van 2% (boven de berm moet de invloed van de berm worden meegeteld, maar eronder niet) (m)

Daarnaast wordt voor de helling van het stijghoogtefront 75° aangehouden.

Formule (5.4) is zo gekozen dat de grootte van de fronthoogte niet te groot is als $z = 0$ (op de stilwaterlijn). De functie is zo bepaald dat de waarde van $\phi_{b2\%}/H_s$ bij $z = 0$ altijd kleiner zal zijn dan onder SWL.

Voor de belasting onder de stilwaterlijn geldt (Klein Breteler 2009):

- Hoog front: $\frac{\phi_{b2\%}}{H_s} = \min \left\{ 0,5 + 0,12 \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} ; 2,3 \right\}$ (5.5)

- Steil front: $\frac{\phi_{b2\%}}{H_s} = \min \left\{ 0,4 + 0,08 \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} ; 1,4 \right\}$ (5.6)

In de formules (5.5) en (5.6) worden de kleinste waarden van $\phi_{b2\%}/H_s$ gevonden bij een erg grote golfsteilheid, want $\xi_{op}/\tan \alpha = 1/\sqrt{s_{op}}$. Als $s_{op} = 0,06$ dan volgt voor het hoge front: $\phi_{b2\%}/H_s = 0,99$ en voor het steile front: $\phi_{b2\%}/H_s = 0,73$.

Formule (5.4) is zo gekozen dat de grootste waarde van $\phi_{b2\%}/H_s = 0,70$ (bij $z = 0$). De belasting boven de stilwaterlijn is daardoor altijd kleiner dan die onder de stilwaterlijn.

Formule (5.4) geeft als gevolg daarvan op de stilwaterlijn bij een grote golfsteilheid een belasting, die vrij goed aansluit bij de belasting onder de stilwaterlijn. Naarmate de golfsteilheid kleiner wordt, ontstaat echter een toenemende discontinuïteit tussen de belasting boven en onder de stilwaterlijn.

Doorgaans zal onder de stilwaterlijn de golfklap maatgevend zijn, die nog veel grotere belastingen geeft, waardoor het verschil tussen onder en boven de stilwaterlijn veel groter is dan lijkt uit bovenstaande getallen.

Als men in een specifiek geval geïnteresseerd is in een veel nauwkeuriger resultaat, kan overwogen worden om berekeningen uit te voeren met het numerieke golfmodel ComFlow. ComFLOW (zie Kleefsman et al., 2005) is een numerieke methode die is gebaseerd op de drie-dimensionale Navier-Stokes vergelijkingen. Het vrij oppervlak wordt bepaald met de Volume-of-Fluid (VOF) methode. ComFLOW kan situaties simuleren waarbij golven een golfklap of golfhoogte geven op de constructie.

6 Vergelijking formules met meetdata Deltagootproeven

De analyse van de Scheldegootproeven uit 1992 heeft geleid tot formule (5.4) voor het bepalen van de fronthoogte op het talud boven de stilwaterlijn. De formule is gegeven in paragraaf 5.6.3. Met die berekende fronthoogte kan vervolgens het stijghoogteverschil over de toplaag berekend worden met formule (5.3), zoals gegeven in paragraaf 5.5.

De ontwikkelde formules voor het berekenen van de fronthoogte en het stijghoogteverschil zijn gebaseerd op Scheldegootproeven en worden in het onderhavige hoofdstuk vergeleken met proeven, die uitgevoerd zijn in de Deltagoot (Van Steeg & Klein Breteler, 2009). De formules worden vergeleken door daarin parameters en geometrie van de Deltagootproeven in te vullen en te onderzoeken hoe de daarmee berekende stijghoogteverschillen zich verhouden tot de in de Deltagoot gemeten stijghoogteverschillen. Van de Deltagootproeven zijn de geometrie en het proevenprogramma in hoofdlijnen beschreven in paragraaf 2.2, voor zover van toepassing voor deze analyse. Een uitgebreide beschrijving van de proeven is te vinden in Van Steeg & Klein Breteler (2009).

Bij het beschouwen van de meetdata valt op dat in de meetdata van de meeste proeven negatieve pieken aanwezig zijn. Deze 'negatieve pieken' worden in het vervolg aangeduid als 'stijghoogteverlagingen'. De stijghoogteverlagingen zijn regelmatig zichtbaar in het meet-sigitaal op het moment dat een golffront één van de laaggelegen drukopnemerparen passeert. De aanwezigheid van dergelijke stijghoogteverlagingen is ongebruikelijk. Daarom is het noodzakelijk eerst deze stijghoogteverlagingen te onderzoeken en verklaren voordat de meetdata van de Deltagootproeven gebruikt kunnen worden voor een goede vergelijking met de formules (5.3) en (5.4).

De analyse van de stijghoogteverlagingen wordt beschreven in paragraaf 6.1. De vergelijking van de ontwikkelde formules wordt beschreven in paragraaf 6.2.

6.1 Analyse stijghoogteverlagingen in meetdata Deltagootproeven

Bij het analyseren van de Deltagootproeven valt op dat in de ruwe meetdata stijghoogteverlagingen aanwezig zijn. In bijlage B.22 zijn van proef L2 de ruwe meetdata van een willekeurig proefduurinterval weergegeven van de DRO's 5 en 6. In het signaal van DRO 5 zijn twee stijghoogteverlagingen zichtbaar. De stijghoogteverlagingen worden om de paar golven geconstateerd.

Deze drukopnemers zijn voor de proef zodanig afgeregeld dat zij de waarde nul registreerden. De drukopnemers op de toplaag zaten toen boven water, en meten daardoor de druk ten opzichte van de atmosferische druk. Negatieve waarden vertegenwoordigen dus een onderdruk (minder dan de atmosferische druk).

Om de stijghoogtes op de toplaag en in het filter makkelijker met elkaar te kunnen vergelijken, is in bijlage B.22 vervolgens het stijghoogtesigitaal van de drukopnemer in het filter (DRO 6) gecorrigeerd voor de plaatshoogte. Het verschil in plaatshoogte tussen beide drukopnemers bedraagt 9,5 cm. Het signaal van DRO 6 wordt daarom met 0,095 m verlaagd. Omdat de stijghoogtesignalen daarna nog niet exact op elkaar vielen, is een aanvullende correctie uitgevoerd, zodanig dat het stijghoogteverschil tussen de drukopnemers 0 werd. Het signaal van DRO 6 is daarom met nog 0,015 m verlaagd. Het is niet uit te sluiten dat dit resterende stijghoogteverschil van 1,5 cm te maken heeft met water dat door de steenzetting naar buiten

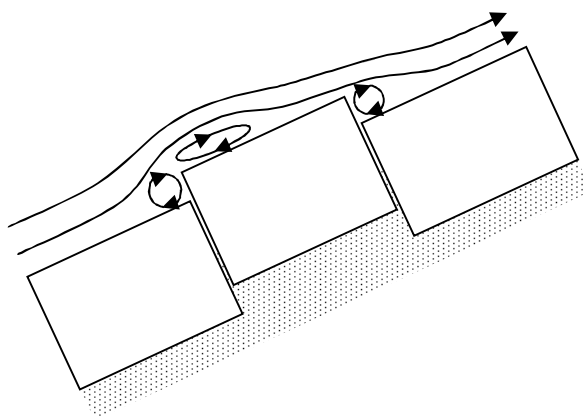
stroomt tijdens golfneerloop. De druk wordt door de beschreven bewerking uitgedrukt in meters waterkolom, zodanig dat als het stijghoogteverschil tussen de drukopnemers 0 is, er geen stroming door de toplaag plaatsvindt. Er moet gerekend worden met het onderwatergewicht ten aanzien van de stabiliteit. Zo is het vergelijkbaar met steenzettingen onder de stilwaterlijn.

Het valt op dat de stijghoogteverlagingen uitsluitend aanwezig zijn bij de drukopnemers bovenop de toplaag en dat ze bijna alleen zichtbaar zijn bij de drukopnemers laag op het talud en nauwelijks bij de hoogste drukopnemers. Wanneer de modelopstelling, het proevenprogramma en het schadeverloop tijdens de Deltagootproeven beschouwd worden, dan valt op dat de aanwezigheid van de stijghoogteverlagingen samenvallen met de aanwezigheid van obstakels in het talud ter plaatse van de drukopnemers. Daardoor ontstaat het vermoeden dat deze stijghoogteverlagingen worden veroorzaakt door een drukverlaging als gevolg van water dat met een hoge snelheid over uitsteeksels in het talud stroomt. Een kwalitatieve analyse van de stijghoogteverlagingen wordt beschreven in paragraaf 6.1.1.

In het verleden is in Klein Breteler e.a. (2006a) al eerder onderzocht wat de invloed is van water dat met een hoge snelheid over oneffenheden op de kruin en het binnentalud van havendammen stroomt. De theorie uit Klein Breteler e.a. (2006a) wordt gebruikt om te onderzoeken of de geconstateerde stijghoogteverlagingen wat betreft ordegrrootte overeenkomen met de destijds ontwikkelde formules. Die kwantitatieve analyse wordt beschreven in paragraaf 6.1.2.

6.1.1 Kwalitatieve analyse stijghoogteverlagingen

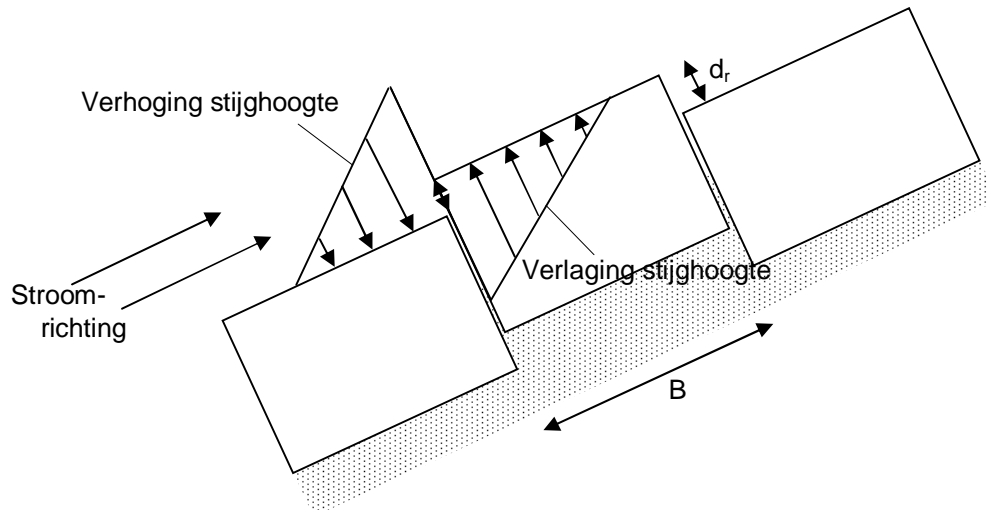
Wanneer water over een uitstekende steen in het talud stroomt, dan kan dat de stabiliteit ter plaatse beïnvloeden, met name als de snelheid van het water over het talud hoog is. Door lokale kromming van de stroomlijnen (Figuur 6.1) treedt boven de stenen die boven de andere stenen uitsteken een verlaging van de stijghoogte op, die een liftkracht geeft. Stroomopwaarts van de uitstekende steen zal echter een stijghoogteverhoging optreden. Figuur 6.2 geeft de lokale drukverhoging en -verlaging schematisch weer.



Figuur 6.1 Gekromde stroomlijnen over een uitstekende steen

De drukverlaging op de toplaag begint zodra het eerste water van een golf front de drukopnemer passeert. De stijghoogte neemt dan snel af en na het bereiken van het laagste punt neemt die geleidelijk weer toe tot een meer standaard verloop van de stijghoogte. Het

stijghoogteverschil is maximaal als de stijghoogteverlaging het grootst is en neemt geleidelijk af naarmate de golf verder passeert.

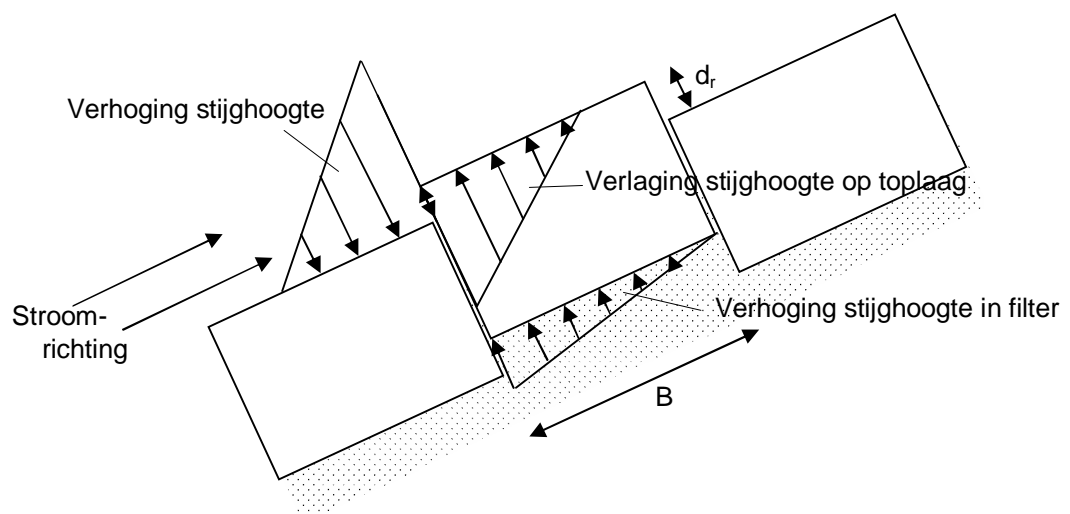


Figuur 6.2 Geschematiseerde stijghoogteverhoging en -verlaging volgens bijlage H van Klein Breteler e.a. (2009).

Het valt op dat de stijghoogteverlagingen alleen zichtbaar zijn in de meetsignalen van de drukopnemers op de toplaag. In de filterlaag worden geen stijghoogteverlagingen gemeten (zie bijlage B.22). Integendeel, wanneer op de toplaag een stijghoogteverlaging aanwezig is, wordt in het filter veelal zelfs een stijghoogteverhoging gemeten.

Enerzijds wordt dat verklaard doordat optredende stijghoogteverlagingen niet worden doorgegeven naar het filter, doordat de drukverlagingen slechts lokaal boven de uitstekende steen optreden. Bij de spleten aan de achter- en zijkant de uitstekende steen zijn stijghoogteverlagingen niet tot nauwelijks aanwezig en worden daardoor niet doorgegeven.

Anderzijds wordt het veroorzaakt doordat via de spleet aan de voorzijde van de steen juist een stijghoogteverhoging aan het filter wordt doorgegeven. Het water dat tegen de voorkant van de uitstekende steen stroomt, veroorzaakt daar een stijghoogteverhoging, die zeer snel aan het filter wordt doorgegeven. In het filter bereikt de stijghoogte daardoor een hogere waarde dan op de toplaag.



Figuur 6.3 Schematische weergave van stijghoogteverlaging op toplaag en stijghoogteverhoging in het filter.

Enerzijds wordt aan de bovenzijde van de steen een stijghoogteverlaging geconstateerd, anderzijds treedt aan de onderzijde van de steen een stijghoogteverhoging op, die een omhoog gerichte druk tegen de steen veroorzaakt. Dit is weergegeven in Figuur 6.3. De verhoging in het filter is weliswaar kleiner dan de verlaging aan de bovenzijde van de steen, maar is aanwezig over een grotere afstand.

De omhoog 'duwende' druk tegen de onderzijde van de steen wordt gewoonlijk verdisconteerd in de omhoog 'zuigende' drukverlaging op de toplaag. Daardoor kan bij benadering gerekend worden met één omhoog gerichte druk ϕ_{op} , zoals is weergegeven in Figuur 6.4. Dat de stijghoogteverhoging in het filter over een iets grotere afstand aanwezig is dan de verlaging op de toplaag wordt verwaarloosd.

Het verschijnsel dat de stijghoogte in het filter groter is en sneller toeneemt dan op de toplaag is zichtbaar in bijlage B.22. Juist bij de golven met een verlaging op de toplaag is de voorflank van het stijghoogteverloop aanzienlijk steiler dan bij de andere golven. De steile voorflanken in de stijghoogteverloop worden grotendeels veroorzaakt door de snelheid waarmee de drukverhogingen naar het filter worden doorgegeven. Daarnaast worden de drukverhogingen ook veroorzaakt doordat juist de golven, waarbij een verlaging op de toplaag optreedt, met een relatief hoge snelheid de drukopnemers passeren. Het beschreven beeld is ook zichtbaar gedurende het overige deel van proef L2.

6.1.1.1 *Blokkensteenzetting*

Bij de blokkensteenzetting zijn geen stijghoogteverlagingen zichtbaar gedurende de eerste proeven. Pas vanaf tweederde deel van de derde proef (proef L2) registreert de meetapparatuur regelmatig stijghoogteverlagingen bij DRO 5 (zie bijlage B.23). Ook in alle daarop volgende proeven worden drukverlagingen gemeten. Dit proces kan verklaard worden aan de hand van het verloop van de proevenseries.

In de loop van proef L2 werd beweging waargenomen van het blok waarin de drukopnemers 5 en 6 bevestigd waren, en het blok ernaast. Het blok met de drukopnemers erin kwam circa 2,5 cm uit het talud omhoog (zie Foto C.3.1). Om schade aan de drukopnemers te voorkomen, werd proef L2 vroegtijdig stilgelegd. Het ligt voor de hand dat het bewegen van het blok al eerder is begonnen dan het moment waarop de beweging voor het eerst werd waargenomen. Het kan op basis daarvan goed mogelijk zijn dat het omhoog komen van het blok en het ontstaan van de stijghoogteverlagingen met elkaar samenhangen.

Na proef L2 werd de schade hersteld en werd een brede metalen strip gedeeltelijk over de loszittende blokken geplaatst, zodat die niet opnieuw omhoog konden komen (zie Foto C.3.2). Hoewel het blok niet meer uit het talud stak, waren in alle proeven die daarna volgden bij DRO 5 opnieuw stijghoogteverlagingen zichtbaar. Dat lijkt in eerste instantie tegenstrijdig, maar dat is niet het geval. De metalen strip heeft een dikte van circa 5 mm en doordat het talud enigszins hobbelig en ruw is, is de afstand tussen de metalen strip en de steenzetting eveneens circa 5 mm. De overgang van de metalen strip naar de steenzetting betreft dus een verlaging van ongeveer 10 mm. Drukverlagingen treden niet alleen op bóven een uitsteeksel, maar ook direct daarachter. De drukopnemer bevindt zich circa 20 mm achter de metalen strip. Hoewel geen formules beschikbaar zijn voor het berekenen van drukverlagingen achter uitsteeksels, is het goed mogelijk dat ook die stijghoogteverlagingen het gevolg zijn van water dat met hoge snelheid over uitsteeksels stroomt.

In het stijghoogteverloop van DRO 6 zijn de voorflanken nu doorgaans niet meer zo extreem steil als tijdens proef L2. Er is immers geen sprake meer van een uitstekende steen.

Rondom DRO 7 zijn er geen blokken omhoog gekomen en is geen metalen strip bevestigd. Daarom is het logisch dat de stijghoogteverlagingen alleen zichtbaar zijn bij de drukopnemers laag op het talud en niet hoger op het talud (zie bijlage B.23).

6.1.1.2 *Zuilensteenzetting*

In de zuilensteenzetting zijn bij de hooggelegen drukopnemer (DRO 2) nauwelijks tot geen stijghoogteverlagingen zichtbaar. Bij de laaggelegen drukopnemer (DRO 1) zijn daarentegen wel stijghoogteverlagingen zichtbaar tijdens alle proeven. In tegenstelling tot de blokkensteenzetting zijn bij de zuilensteenzetting dus ook stijghoogteverlagingen zichtbaar tijdens de eerste twee proeven en het eerste deel van de derde proef (zie bijlage B.24), ondanks dat tijdens die proevenseries geen zuilen omhoog zijn gekomen rond de drukopnemers. De verklaring voor de stijghoogteverlagingen wordt gevonden in de bedrading, die de drukopnemers en de meetcomputer met elkaar verbindt. Laag op het talud passeert het water tijdens golfoploop eerst de bedrading en kort daarna DRO 1. Het water wordt hier sterk gehinderd door de enkele centimeters hoge kabels, wat zal leiden tot drukverlaging direct achter de kabels (zie Foto C.2.1 en Foto C.2.2). Dit veroorzaakt stijghoogteverlagingen in het meetsignaal op het moment dat een golfvront de drukopnemer passeert. Hoger op het talud zijn nauwelijks tot geen stijghoogteverlagingen zichtbaar. Dat is logisch omdat de bedrading daar vrijwel parallel loopt aan de golfoplooprichting. Het water ondervindt daar geen noemenswaardige hinder van (zie Foto C.2.1).

De invloed van kabels op stromend water is zichtbaar op Foto C.4.1. Daarop is te zien hoe water tijdens golfneerloop over de kabels 'springt', net voordat een nieuwe golfklap op het talud komt.

6.1.2 Kwantitatieve analyse stijghoogteverlagingen

De kwantitatieve analyse berust op het vergelijken van stijghoogteverlagingen, zoals die enerzijds volgen uit de meetdata en anderzijds zoals die berekend kunnen worden met de formules. In de kwantitatieve analyse is het belangrijk dat de omstandigheden van de Deltagootproeven zo goed mogelijk aansluiten bij het toepassingsgebied van de formules, die in eerder onderzoek ontwikkeld zijn (bijlage H van Klein Breteler e.a., 2006a). Die formules zijn specifiek ontwikkeld voor het bepalen van stijghoogteveranderingen rond uitstekende stenen op binnentaluds van havendammen, als gevolg van golfoverslag. Daarbij wordt als uitgangspunt genomen dat water tegen een uitstekende steen stroomt, die zich loodrecht op de stroomrichting bevindt.

Voor het kwantitatief analyseren van de stijghoogteverlagingen wordt gebruik gemaakt van de drukopnemers in de blokkentestsectie in het laatste deel van proef L2. Tijdens die proef kwam daadwerkelijk het blok met de drukopnemer omhoog.

Bij eerdere proeven was nog geen schade ontstaan en zijn dus nog geen stijghoogteverlagingen zichtbaar. En bij latere proeven zijn stijghoogteverlagingen waarschijnlijk het gevolg van de metalen afdekstrip (zie paragraaf 6.1.1.1), wat buiten het toepassingsgebied van de formules valt. De drukopnemers in de zuilentestsectie vallen eveneens buiten het toepassingsgebied van de formules. De stijghoogteverlagingen worden daar waarschijnlijk veroorzaakt door de kabels (Foto C.2.2).

6.1.2.1 Stijghoogteverlagingen in proef L2 op basis van meetdata

Van proef L2 zijn voor de blokkentestsectie de meetdata geanalyseerd en is de grootte van de stijghoogteverlagingen bepaald. Van alle golven is de grootte van de stijghoogteverlaging bepaald, waarna van de grootste 5 procent stijghoogteverlagingen het gemiddelde is berekend. De stijghoogteverlaging die daaruit volgt is een maat voor de stijghoogteverlaging met een overschrijdingsfrequentie van 2 procent en wordt aangeduid als $\phi_{op2\%}$ (m).

Voor proef L2 gelden de volgende hydraulische randvoorwaarden:

h	= waterdiepte = 4,54 (m)
H_s	= significante golfhoogte = 0,86 (m)
T_p	= golfperiode bij piek van spectrum = 4,15 (s)
$T_{m-1,0}$	= spectrale golfperiode = 3,84 (s)
N	= aantal golven = 744 (-)

Omdat de stijghoogteverlagingen pas optreden na ongeveer tweederde deel van proef L2, wordt uitsluitend dat deel van de proef beschouwd. Voor het laatste deel van proef L2 geldt:

N	= aantal golven = 248 (-)
$N_{5\%}$	= 5 procent van aantal golven = 13 (-)

Uit de analyse van de meetdata volgen de onderstaande resultaten:

Testsectie	DRO	$\phi_{op2\%}$ (m)
Blokken	DRO 5	-0,23
	DRO 7	-0,02

Tabel 6.1 Stijghoogteverlaging $\phi_{op2\%}$ op basis van meetdata (proef L2)

6.1.2.2 Stijghoogteverlagingen in proef L2 op basis van theorie

De invloed van water, dat over uitstekende stenen stroomt, op het stijghoogteverloop is onderzocht in Klein Breteler e.a. (2006a). Dat onderzoek was weliswaar specifiek gericht op binnentaluds van havendammen, maar de resultaten daarvan zijn ook toepasbaar op het buitentalud.

Klein Breteler e.a. (2006a) geeft de volgende formules voor het berekenen van de stijghoogteverlaging (zie ook Figuur 6.4):

$$\phi_a = c \cdot \frac{u^2}{2g} \quad (6.1)$$

$$\phi_{op} = C_L \cdot \phi_a \quad (6.2)$$

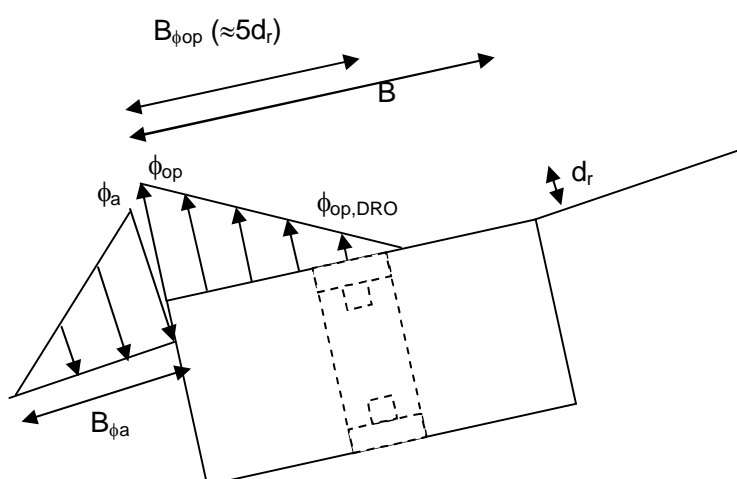
Substitutie daarvan geeft:

$$\phi_{op} = C_L \cdot c \cdot \frac{u^2}{2g} \quad (6.3)$$

Met:

ϕ_a = maximale stijghoogteverhoging aan bovenstroomse zijde van uitstekende steen (m)

- ϕ_{op} = maximale stijghoogteverlaging boven de uitstekende steen (m).
 c = coëfficiënt $\approx 0,7$ à $0,9$ (-).
 In de onderhavige berekeningen wordt gerekend met $0,8$ (-).
 C_L = liftcoëfficiënt (-).
 Bij het berekenen van stabiliteit wordt gerekend met $0,9$.
 Bij het berekenen van stijghoogteverlagingen wordt gerekend met $0,7$.
 (zie paragraaf 6.1.2.3 voor toelichting)
 u = snelheid van het water over het talud (m/s).
 g = versnelling van de zwaartekracht $\approx 9,81$ (m/s²).
 B = breedte van de stenen in de stroomrichting van het water (m).
 d_r = mate waarin uitstekende steen uitsteekt boven het taludoppervlak (m).
 $B_{\phi_{op}}$ = afstand waarover stijghoogteverlaging aanwezig is. Met $B_{\phi_{op}} \approx 5d_r$ (m)
 $\phi_{op,DRO}$ = stijghoogteverlaging ter plaatse van drukopnemer (m).



Figuur 6.4 Schematische weergave van uitstekende steen en verloop stijghoogteverlaging.

De stijghoogteverlaging bij de drukopnemer kan nu berekend worden met de formule:

$$\phi_{op,DRO} = \frac{B_{\phi_{op}} - (B/2)}{B_{\phi_{op}}} \cdot \phi_{op} \quad (6.4)$$

Een belangrijke parameter bij het bepalen van de stijghoogteverlaging boven een uitstekende steen is de snelheid van het water over het talud. In Klein Breteler e.a. (2006a) wordt een formule gegeven voor het berekenen van de snelheid van overslaand water op de kruin, als gevolg van golfoploop. De formule is gebaseerd op het evenwicht van kinetische energie (maximaal op SWL) en potentiële energie (maximaal op SWL+z_{2%}). Energieverlies tijdens de golfoploop wordt daarbij verwaarloosd. Op de kruin zal, als er geen energieverlies optreedt, de snelheid gelijk zijn aan:

$$u_{2\%,kruin} = \sqrt{2g \cdot (z_{2\%} - h_c)} \quad (6.5)$$

Met:

- $u_{2\%,kruin}$ = snelheid van het water op de kruin met overschrijdingsfrequentie van 2% (m/s).
 $z_{2\%}$ = golfoploophoogte met een overschrijdingsfrequentie van 2% (m).
 h_c = hoogte van de kruin t.o.v. de stilwaterlijn (m).

Uitgaande van dat energie-evenwicht kan deze formule in een iets andere vorm ook gebruikt worden voor het berekenen van de snelheid op andere willekeurige niveaus op het talud:

$$u_{2\%} = \sqrt{2g \cdot (z_{2\%} - z)} \quad (6.6)$$

Met:

$u_{2\%}$ = snelheid van het water over het talud, op hoogte z boven de stilwaterlijn met overschrijdingsfrequentie van 2% (m/s).

z = verticale afstand vanaf de stilwaterlijn tot de beschouwde locatie op het talud (m).

De golfploophoogte $z_{2\%}$ wordt berekend met het programma PC-Overslag (TAW, 2002). Voor de blokkentestsectie (het taluddeel van gootbodem+4,80m tot gootbodem+5,49m) geldt een invloedsfactor voor de ruwheid op het talud van $\gamma_f = 1,0$ (= glad talud). Ook voor het overige deel van het talud geldt een ruwheidsfactor van $\gamma_f = 1,0$. Daaruit volgt een golfploophoogte van $z_{2\%} = 2,595$ m.

Voor het blok met daarin DRO 5 geldt verder:

d_r = 0,025 m (opgemeten in Foto C.3.1)

$B_{\phi_{op}}$ = $5d_r = 0,125$ m

B = 0,20 m

z = 0,292 m (hoogte van DRO 5 t.o.v. SWL)

Op basis van de bovenstaande formules en de gegeven parameters kan de stijghoogteverlaging ter plaatse van DRO 5 berekend worden. In Tabel 6.2 zijn de resultaten gegeven, waarbij $\phi_{op2\%}$ de maximale stijghoogteverlaging is aan de voorrand van het opstaande blok, en $\phi_{op2\%,DRO}$ de stijghoogteverlaging bij de drukopnemer.

Testsectie	DRO	$u_{2\%}$ (m/s)	$\phi_{op2\%}$ (m)	$\phi_{op2\%,DRO}$ (m)
Blokken	DRO 5	6,72	-1,3	-0,26

Tabel 6.2 Stijghoogteverlaging $\phi_{op2\%}$ op basis van theorie (proef L2).

Opgemerkt wordt dat de stijghoogteverlaging bij de drukopnemer $\phi_{op,DRO}$ gevoelig is voor kleine variaties in d_r . De gebruikte waarde $d_r = 0,025$ m is een nauwkeurige schatting op basis van Foto C.3.1, die het eindresultaat geeft van de verplaatsing na het stopzetten van de proef. Hoe de steen zich gedurende de proef omhoog heeft gewerkt is niet waargenomen, maar in deze berekening wordt aangenomen dat de steen gedurende het laatste 1/3^e deel van proef L2 steeds in dezelfde mate boven het talud uitstak. Bijlage B.23 toont gedurende dat deel van de proef een vergelijkbaar patroon in de stijghoogteverlagingen en ondersteunt daarmee deze aanname.

Ook een kleine variatie in de verhouding tussen d_r en $B_{\phi_{op}}$ (bijvoorbeeld $B_{\phi_{op}} = 4d_r$ of $6d_r$) heeft een grote invloed op $\phi_{op,DRO}$. De aanname dat naar schatting $B_{\phi_{op}} = 5d_r$, is afkomstig uit eerder onderzoek (Klein Breteler e.a., 2006a) en wordt in deze berekeningen gebruikt om aan te sluiten op de bestaande theorie. De verhouding $B_{\phi_{op}} = 5d_r$ betreft een schatting, maar zal gemiddeld een vrij goed beeld geven. In werkelijkheid zal deze verhouding echter van golf tot golf variëren.

Wanneer in de situatie van proef L2 (met $d_r = 0,025$ m) tijdens een individuele golf geldt dat $B_{\phi_{op}} \leq 4d_r$, dan treedt er geen stijghoogteverlaging op bij de drukopnemer. Dit vormt een verklaring voor het verschijnsel dat stijghoogteverlagingen niet bij elke golf gemeten worden, maar slechts om de paar golven (zie bijlage B.22 en B.23).

6.1.2.3 Vergelijking meetdata en theorie

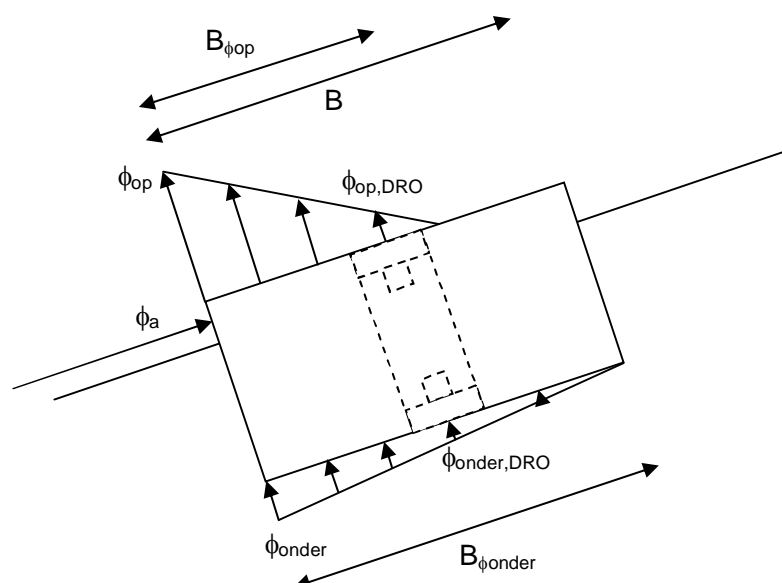
In de paragrafen 6.1.2.1 en 6.1.2.2 zijn de stijghoogteverlagingen kwantitatief geanalyseerd, op basis van enerzijds meetdata en anderzijds bestaande theorie. De resultaten worden gegeven in Tabel 6.3.

Methode	$\phi_{op2\%,DRO}$ (m)
Op basis van meetdata	-0,23
Op basis van bestaande theorie	-0,26

Tabel 6.3 Resultaten kwantitatieve analyse van stijghoogteverlagingen.

De gemeten waarden zijn ongeveer 10 procent lager dan de berekende waarden en hebben daarmee beide dezelfde ordegrrootte. Bij het vergelijken van de resultaten dient conform paragraaf 6.1.2.2 opgemerkt te worden dat de waarden voor d_r en $B_{\phi_{op}}$ schattingen betreffen en dat kleine variaties in die waarden relatief grote verschillen in de uitkomst geven. Echter, uitgaande van in paragraaf 6.1.2.2 beargumenteerde waarden en uitgangspunten, die in de berekening gebruikt zijn, blijken de gemeten en berekende waarden goed met elkaar overeen te komen. De hypothese, dat de stijghoogteverlagingen het gevolg zijn van over uitsteeksels stromend water, wordt daarmee bekrachtigd.

Een aanvullende vergelijking van de meetdata met de theorie is uitgevoerd door de stijghoogteverhogingen in de filterlaag te analyseren. Zoals in paragraaf 6.1.1 is beschreven, treedt bij de voorrand van de uitstekende steen een drukverhoging op als daar water tegenaan stroomt. Die drukverhoging wordt via de spleet aan de voorzijde van de steen doorgegeven naar het filter. In het filter ontstaat daardoor een omhoog gerichte druk tegen de onderzijde van de uitstekende steen. Die druk is het grootst bij de voorrand en neemt geleidelijk af naarmate de afstand tot de spleet groter wordt. Dit principe is weergegeven in Figuur 6.3.



Figuur 6.5 Schematische weergave van stijghoogteverlaging op toplaag en stijghoogteverhoging in het filter

Tijdens proef L2 stak de uitstekende steen 0,025 m uit boven het talud. Daarbij hoort $B_{\phi_{op}} = 5d_r = 0,125$ m. De stijghoogteverhoging in het filter zal aanwezig zijn over een grotere afstand en daarvoor wordt arbitrair aangenomen dat $B_{\phi_{onder}} = B = 0,20$ m (zie Figuur 6.5).

In Klein Breteler e.a. (2006a) wordt gegeven dat $\phi_{op}/\phi_a = 0,7$ en $\phi_{onder}/\phi_a = 0,2$ (zie Figuur H.6 uit Klein Breteler e.a., 2006a, voor leklengte $\Lambda \approx 0,0,2$ en $B_{\phi_a} = 0,1$).

Uitgaande van $B_{\phi_{op}} = 0,125$ m en $B_{\phi_{onder}} = 0,20$ m volgt daaruit op basis van de theorie dat:

$$\begin{aligned}\phi_{op,DRO} &= 0,2 \cdot \phi_{op} = 0,2 \cdot 0,7 \cdot \phi_a = 0,14 \cdot \phi_a \\ \phi_{onder,DRO} &= 0,5 \cdot \phi_{onder} = 0,5 \cdot 0,2 \cdot \phi_a = 0,10 \cdot \phi_a\end{aligned}$$

Uit het bovenstaande volgt dat $\phi_{op,DRO}$ ongeveer anderhalf keer groter zal zijn dan $\phi_{onder,DRO}$. Wanneer nu de stijghoogteverlopen van DRO 5 en 6 (bijlage B.22) beschouwd worden, valt op dat de stijghoogteverlagingen bij DRO 5 inderdaad circa anderhalf keer groter zijn dan de stijghoogteverhogingen bij DRO 6. Dit vergroot de aannemelijkheid van de hypothese.

De bovenstaande analyse geeft tevens inzicht in de waarden die gebruikt worden voor de liftcoëfficiënt C_L . De waarde van de liftcoëfficiënt C_L is immers direct verbonden aan deze materie.

Wanneer alleen een stijghoogteverlaging wordt berekend, wordt uitsluitend de omhoog gerichte kracht aan de bovenzijde van de steen beschouwd. In dat geval geldt dat $C_L = \phi_{op}/\phi_a = 0,7$.

Bij het bepalen van de stabiliteit van een uitstekend blok worden de omhoog gerichte kracht aan zowel de bovenzijde als aan de onderzijde van de steen beschouwd. In dat geval geldt dat $C_L = \phi_{op}/\phi_a + \phi_{onder}/\phi_a = 0,7 + 0,2 = 0,9$.

6.1.2.4 Maximaal toelaatbare d_r

Een aanvullende check om de aannemelijkheid van de hypothese te vergroten, bestaat uit het onderzoeken van de waarde van d_r waarbij het blok begint te bewegen. In deze paragraaf wordt die d_r berekend en vervolgens vergeleken met waarnemingen, die gedaan zijn tijdens proef L2.

In Bijlage H van Klein Breteler e.a. (2006a) werden formules ontwikkeld voor de beoordeling van de stabiliteit van uitstekende stenen op binnentaluds van havendammen, wanneer overslaand water tegen die stenen aan stroomt. In die bijlage wordt gesteld dat een uitstekende steen niet zal gaan bewegen als voldaan wordt aan de volgende voorwaarden:

Als $C_L B_{\phi_{op}} \geq fD$:

Als $B_{\phi_{op}} \leq B$:

$$\text{Als } \phi_a < \frac{2\Delta DB(\cos \alpha + f \sin \alpha)}{C_L B_{\phi_{op}} - fD}, \text{ dan stabiel} \quad (6.7)$$

Als $B_{\phi_{op}} > B$:

$$\text{Als } \phi_a < \frac{2\Delta DB(\cos \alpha + f \sin \alpha)}{C_L B \left(2 - \frac{B}{B_{\phi_{op}}} \right) - fD}, \text{ dan stabiel} \quad (6.8)$$

Als $C_L B_{\phi_{op}} < fD$: altijd stabiel

Met:

- f = wrijvingscoëfficiënt (-)
- D = dikte van de toplaag (m)
- $\Delta = (\rho_s - \rho_w) / \rho_w$ = relatieve soortelijke massa van steenzettingselementen (-)
- ρ_s = soortelijke massa van de stenen (kg/m^3)
- ρ_w = soortelijke massa van water (kg/m^3)
- α = taludhelling ($^\circ$)

De formules uit bijlage H van Klein Breteler e.a. (2006a) zijn op basis van een gecompliceerd krachtenevenwicht ontwikkeld voor de situatie waarbij overslaand water over het binnentalud naar beneden stroomt. In de problematiek van het onderhavige onderzoek is daarentegen sprake van water, dat over het buitentalud naar boven stroomt. De formules kunnen hiervoor eenvoudig worden aangepast door α te vervangen door $-\alpha$. De basis van het krachtenevenwicht blijft daardoor ongewijzigd.

In Klein Breteler e.a. (2006a) en Klein Breteler (2009) worden voor enkele parameters, voor algemeen gebruik van de formules, de volgende waarden aanbevolen:

- $C_L = 0,9$ (zie ook paragraaf 6.1.2.3)
- $B_{\phi_{op}} = 5d_r$
- f = 0,5

Verder geldt conform paragraaf 6.1.2.2 dat $\phi_a = c \cdot \frac{u^2}{2g}$, waarin $u_{2\%} = \sqrt{2g \cdot (z_{2\%} - z)}$

Voor toepassing bij omhoog stromend water worden de formules omgeschreven tot:

Als $C_L B_{\phi_{op}} \geq fD$:

Als $d_r \leq 0,2B$:

$$\text{Als } 0,9(z_{2\%} - z) < \frac{2\Delta DB(\cos \alpha - 0,5 \sin \alpha)}{4,5d_r - 0,5D}, \text{ dan stabiel} \quad (6.9)$$

Als $d_r > 0,2B$:

$$\text{Als } 0,9(z_{2\%} - z) < \frac{2\Delta DB(\cos \alpha - 0,5 \sin \alpha)}{0,9B \left(2 - \frac{B}{5d_r} \right) - 0,5D}, \text{ dan stabiel} \quad (6.10)$$

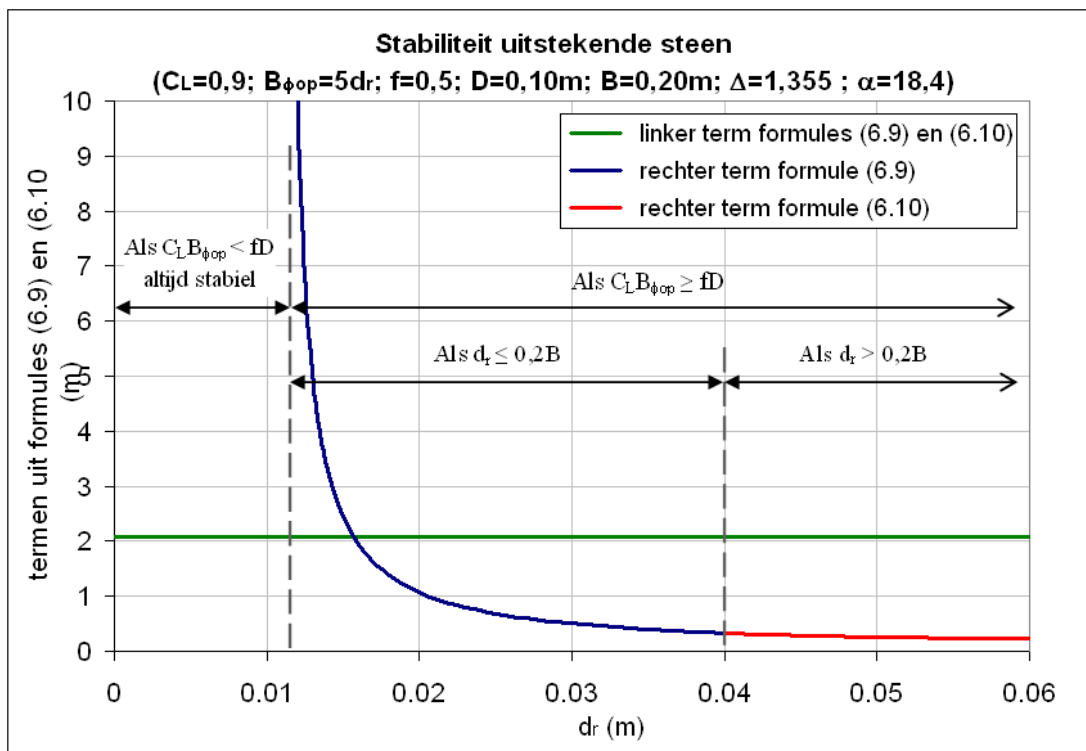
Als $C_L B_{\phi_{op}} < fD$: altijd stabiel

De formules worden vervolgens ingevuld met de parameters, zoals die voor de Deltagootproeven van toepassing zijn. Voor de Deltagootproeven gelden voor de testsectie met de betonblokken de volgende parameters:

- $z_{2\%}$ = 2,595 m
- ρ_s = 2355 kg/m³
- ρ_w = 1000 kg/m³
- Δ = $(\rho_s - \rho_w) / \rho_w = (2355 - 1000) / 1000 = 1,355$
- B = 0,20 m
- D = 0,10 m
- α = 18,4° (talud 1:3)
- z = 0,292 m (hoogte van stilwaterlijn tot DRO 5)

Daarmee kan voor de Deltagootproeven bepaald worden tot welke d_r het blok met DRO 5 nog stabiel is, en vanaf welke d_r die instabiel wordt. In Figuur 6.6 zijn de stabiliteitsformules geplot, met d_r als variabele. De groene lijn is de linker term van formules (6.9) en (6.10): $0,9(z_{2\%} - z)$. De blauwe lijn is de rechter term van formule (6.9) en de rode lijn is de rechter term van formule (6.10). Wanneer de groene lijn lager ligt dan de blauwe of rode lijn, dan is de uitstekende steen stabiel. Uit Figuur 1.1 blijkt dat de steen instabiel wordt bij $d_r = 0,016$ m, ofwel als de steen 16 mm boven het talud uitsteekt.

Uit gerapporteerde waarnemingen van de Deltagootproeven blijkt dat proef L2 is stilgelegd omdat het blok met DRO 5 bewoog (Van Steeg & Klein Breteler, 2009). Het blok bleek daarbij ongeveer 25 mm boven het taludoppervlak uit te steken. Met inachtneming van een zekere conservativiteit bij het ontwikkelen van de formules komt de waargenomen 25 mm vrij goed overeen met de berekende 16 mm.



Figuur 6.6 Stabiliteit van uitstekende steen als functie van d_r volgens formules (6.9) en (6.10).

6.1.3 Beoordeling stijghoogteverlagingen

De analyse versterkt het vermoeden dat de stijghoogteverlagingen het gevolg zijn van water, dat met hoge snelheid over oneffenheden stroomt, zoals uitstekende stenen. Hieruit volgt de relevantie om bij het beoordelen van steenzettingen boven SWL tevens rekening te houden met uit het talud stekende stenen. Het wordt aanbevolen om de beoordeling van steenzettingen boven de stilwaterlijn uit te breiden met de formules (6.9) en (6.10) en de bijbehorende criteria.

De invloed van oneffenheden zal boven de stilwaterlijn relatief groter zijn dan daaronder. Onder water is veelal sprake van grote belastingen door golffronten en golfklappen, waardoor de invloed van oneffenheden relatief gering zal zijn. Daar waar de grootste stijghoogteverschillen ontstaan door golffronten, zijn de watersnelheden niet zo groot, en waar de golfklappen optreden is er eerst sprake van een hoge snelheid en pas daarna een belasting door de golfklap. Dat maakt dat de belasting door de watersnelheden niet op dezelfde plaats of hetzelfde tijdstip optreden als die van het golffront en golfklap. De toplaagdikte is onder de waterlijn veel groter dan erboven. Daarom zal het stijghoogteverschil onder de waterlijn altijd kleiner zijn dan het eigengewicht van de stenen in tegenstelling tot boven de waterlijn.

(Hoog) boven de stilwaterlijn leveren de golffronten en golfklappen nauwelijks nog relevante stijghoogteverschillen, waardoor de relatieve invloed van oneffenheden toeneemt. Een uitsteeksel van enkele centimeters kan hoog op het talud ook bij grote golven een relevante invloed hebben.

Opgemerkt wordt dat de beoordeling van oneffenheden afhankelijk is van de oorzaak daarvan. Een toplaag kan bijvoorbeeld uitsteeksel bevatten wanneer zuilen of blokken van verschillende dikte gebruikt. Stenen die uitsteken doordat ze dikker zijn, zullen ook stabiel zijn. De invloed van de oneffenheden is in dat geval niet relevant. Wanneer oneffenheden echter worden veroorzaakt door verzakkingen dan moet de stabiliteit ten aanzien van overtrekkende stroming beoordeeld worden.

6.2 Vergelijking formules (5.3) en (5.4) met meetdata Deltagootproeven

In deze paragraaf worden de op Scheldegootproeven gebaseerde formules (5.3) en (5.4) (zie paragrafen 5.5 en 5.6.3) vergeleken met de Deltagootproeven. Dit betreft het vergelijken van enerzijds het stijghoogteverschil dat berekend kan worden met de nieuw ontwikkelde formules (waarbij als input gebruik wordt gemaakt van gegevens van de Deltagootproeven) en anderzijds het stijghoogteverschil dat werkelijk optreedt tijdens de Deltagootproeven.

6.2.1 Stijghoogteverschil op basis van meetdata van Deltagootproeven

6.2.1.1 Gebruikte meetdata

Al bij het begin van de vergelijking werd ontdekt dat het meetsignaal van de Deltagootproeven opmerkelijke stijghoogteverlagingen vertoonden (zie paragraaf 6.1). Die stijghoogteverlagingen ontstaan waarschijnlijk doordat water tijdens golfoploop met hoge snelheid over uitsteeksel in het talud stroomt, zoals uitgelegd in paragraaf 6.1. Wanneer deze verlagingen in het meetsignaal aanwezig zijn, is een goede vergelijking tussen de Schelde- en Deltagootproeven niet mogelijk. De vergelijking tussen beide typen proeven dient

daarom te gebeuren op basis van proeven zonder dergelijke verlagingen. Voor de vergelijking blijkt slechts een gedeelte van proef L1 in aanmerking te komen. De drukopnemers in het blokkentalud en de drukopnemer hoog op het zuilentalud bevatten geen stijghoogteverlagingen en kunnen gebruikt worden. De drukopnemer laag op het zuilentalud laat wel stijghoogteverlagingen zien en kan dus niet gebruikt worden. Ook alle andere proeven bevatten stijghoogteverlagingen en kunnen niet gebruikt worden.

Van proef L1 worden dus de volgende drukopnemerparen beschouwd:

- DRO 5 en 6 (laag op talud blokkentestsectie)
- DRO 7 en 8 (hoog op talud blokkentestsectie)
- DRO 2 en 4 (hoog op talud zuilentestsectie)

6.2.1.2 *Bewerking ruwe meetdata*

De ruwe meetdata van alle drukopnemers zijn voorafgaand aan de analyse bewerkt om ruis uit het ruwe stijghoogtemeetsignaal te verwijderen. Het ruwe meetsignaal is gecorrigeerd door een voortschrijdend gemiddelde over de tijd uit te voeren. De ruwe meetdata zijn bemonsterd met 100 Hz en analoog gefilterd met 50 Hz. Het voortschrijdend gemiddelde van de stijghoogte op tijdstip t is berekend met de volgende formule:

$$\phi = (\phi_{t-2,ruw} \cdot f_{t-2}) + (\phi_{t-1,ruw} \cdot f_{t-1}) + (\phi_{t,ruw} \cdot f_t) + (\phi_{t+1,ruw} \cdot f_{t+1}) + (\phi_{t+2,ruw} \cdot f_{t+2}) \quad (6.11)$$

Met:

ϕ = voortschrijdend gemiddelde van de stijghoogte op tijdstip t (m).

$\phi_{t+n,ruw}$ = stijghoogte in de ruwe meetdata, n meetsamples na tijdstip t (m). De tijd tussen 2 meetsamples bedraagt 0,01 s, i.v.m. meetfrequentie = 100 Hz.

f_{t+n} = weegfactor, n meetsamples na tijdstip t (-).

Er is gebruik gemaakt van de volgende waarden voor de weegfactoren:

- $f_{t-2} = 0,125$
- $f_{t-1} = 0,25$
- $f_t = 0,25$
- $f_{t+1} = 0,25$
- $f_{t+2} = 0,125$

Deze bewerking komt overeen met een laagdoorlaatfilter van ongeveer 30 Hz.

6.2.1.3 *Stijghoogteverschil*

Voorafgaand aan het berekenen van het stijghoogteverschil over de toplaag wordt het stijghoogtesignaal van de drukopnemer in het filter (DRO 6) gecorrigeerd voor de plaatshoogte, waardoor het makkelijker is om de stijghoogtes op de toplaag en in het filter met elkaar te vergelijken. Het verschil in plaatshoogte tussen beide drukopnemers bedraagt 9,5 cm. Het signaal van DRO 6 wordt daarom met 0,095 m verlaagd. Omdat de signalen daarna nog niet exact op elkaar vielen, is een aanvullende correctie uitgevoerd, zodanig dat het stijghoogteverschil tussen de drukopnemers 0 werd. Het signaal van DRO 6 is daarom met nog 0,025 m verlaagd. De druk wordt door de beschreven bewerking uitgedrukt in meters waterkolom, zodanig dat als het stijghoogteverschil tussen de drukopnemers 0 is, er geen stroming door de toplaag plaatsvindt. Er moet gerekend worden met het onderwatergewicht ten aanzien van de stabiliteit. Zo is het vergelijkbaar met steenzettingen onder de stilwaterlijn.

Het stijghoogteverschil ϕ_w over de toplaag wordt nu berekend door de stijghoogte op de toplaag ϕ_{top} af te trekken van de stijghoogte in het filter ϕ_{filter} :

$$\phi_w = \phi_{filter} - \phi_{top} \quad (6.12)$$

Voor elke golf is vervolgens het maximaal optredende stijghoogteverschil bepaald. Uit al die stijghoogteverschillen zijn vervolgens de 5 procent grootste stijghoogteverschillen geselecteerd, waarna van die 5 procent het gemiddelde is bepaald. Het gemiddelde van de grootste 5 procent wordt gebruikt als maat voor het stijghoogteverschil met een overschrijdingsfrequentie van 2 procent, en wordt aangeduid als $\phi_{w2\%}$.

Testsectie	DRO-paar	$\phi_{w2\%}$ (m)
Blokken	5 en 6	0,20
	7 en 8	0,17
Zuilen	1 en 3	-
	2 en 4	0,13

Figuur 6.7 Stijghoogteverschil $\phi_{w2\%}$ op basis van meetdata Deltagootproeven (proef L1)

6.2.2 Stijghoogteverschil op basis van ontwikkelde formules

In paragraaf 5.6.3 van dit rapport werd op basis van analyse van Scheldegootproeven de onderstaande formule ontwikkeld, waarmee de fronthoogte $\phi_{b2\%}$ op het talud bepaald kan worden, afhankelijk van de significante golfhoogte H_s en de golfploophoogte $z_{2\%}$. Voor proef L1 geldt dat $H_s = 0,86$ m en $z_{2\%} = 2,595$ m (berekend met PC-Overslag).

$$\frac{\phi_{b2\%}}{H_s} = 0,042 \left(\frac{z}{z_{2\%}} + 0,060 \right)^{-1} \quad (6.13)$$

Met:

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

H_s = significante golfhoogte = 0,86 (m)

z = verticale afstand vanaf de stilwaterlijn tot de beschouwde locatie op het talud (m)

$z_{2\%}$ = golfploophoogte met overschrijdingsfrequentie van 2% = 2,595 (m)

Gebruik van de bovenstaande formule levert per drukopnemerpaar de bijbehorende fronthoogte $\phi_{b2\%}$ op. Met deze waarden van $\phi_{b2\%}$ is het mogelijk de bijbehorende stijghoogteverschillen $\phi_{w2\%}$ te berekenen. Daarvoor wordt de onderstaande formule uit paragraaf 5.5 gebruikt, die het verband geeft tussen onder andere de fronthoogte en het stijghoogteverschil.

$$\phi_{w2\%} = \frac{\Lambda}{2} \left(\cos \alpha \tan \theta_f \left(1 - \exp \left(\frac{-\phi_{b2\%}}{\Lambda \cos \alpha \tan \theta_f} \right) \right) + \sin \alpha \right) \quad (6.14)$$

Met:

Λ = leklengte: $\Lambda_{zuilensectie} = 0,12$; $\Lambda_{blokkensectie} = 0,22$ (m)

θ_f = helling van het stijghoogtefront = 75 (°)

α = taludhelling = 18,4 (°)

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

$\phi_{w2\%}$ = maximale stijghoogteverschil over de toplaag (m)

De berekende waarden voor $\phi_{b2\%}$ en $\phi_{w2\%}$ worden gegeven in Tabel 6.4.

Testsectie	DRO-paar	z (m)	$\phi_{b2\%}$	$\phi_{w2\%}$
Blokken	5 en 6	0,332	0,19	0,12
	7 en 8	0,458	0,15	0,10
Zuilen	1 en 3	0,316	-	-
	2 en 4	0,464	0,15	0,08

Tabel 6.4 Stijghoogteverschil $\phi_{w2\%}$ op basis van ontwikkelde formules (proef L1)

6.2.3 Vergelijking berekende resultaten met metingen

In de voorgaande paragrafen werden van Deltagootproef L1 de stijghoogteverschillen met een overschrijdingsfrequentie van 2 procent ($\phi_{w2\%}$) bepaald. In paragraaf 6.2.1 werd $\phi_{w2\%}$ bepaald door analyse van de meetdata. In paragraaf 6.2.2 werd $\phi_{w2\%}$ bepaald door de te vergelijken formules in te vullen met gegevens van proef L1. De resultaten van beide methoden zijn gegeven in Tabel 6.5 en worden in deze paragraaf met elkaar vergeleken.

Testsectie	DRO-paar	$\phi_{w2\%,meetdata}$	$\phi_{w2\%,formules}$
Blokken	5 en 6	0,20	0,12
	7 en 8	0,17	0,10
Zuilen	1 en 3	-	-
	2 en 4	0,13	0,08

Tabel 6.5 Resultaten van verificatie

Gemiddeld is $\phi_{w2\%,meetdata}$ ongeveer 1,6 maal groter dan $\phi_{w2\%,formules}$. Daaruit kan in eerste instantie gesteld worden dat tijdens de Deltagootproeven grotere stijghoogteverschillen optreden dan tijdens de Scheldeproeven, met als conclusie dat de formules te onveilig zouden zijn. Maar een gedetailleerdere beschouwing van de resultaten leert dat deze conclusie te voorbarig is. De meetdata van proef L1 vertonen namelijk een merkwaardig stijghoogteverloop.

Van de 6 golven met de grootste stijghoogteverschillen, ter plaatse van drukopnemerpaar 5 en 6 tijdens proef L1, worden de stijghoogteverlopen en stijghoogteverschillen weergegeven in bijlage B.25. In bijlage B.25 is het stijghoogteverloop in het filter gecorrigeerd voor onder andere de plaatshoogte, waardoor het makkelijker is om de stijghoogtes op de toplaag en in het filter met elkaar te vergelijken (zie paragraaf 6.2.1.3).

Bij de golven met een groot stijghoogteverschil blijkt veelal dat de stijghoogte in het filter aanzienlijk groter is dan de stijghoogte op de toplaag. Hoewel het gebruikelijk is dat de stijghoogte in het filter bij een naderend golffront iets voorloopt op de stijghoogte op de toplaag, is het echter ongebruikelijk dat de maximale stijghoogte tijdens een golf in het filter groter is dan op de toplaag. Er wordt immers aangenomen dat in proef L1 de steen met DRO 5 en 6 niet boven het talud uitsteekt.

De exacte oorzaak van dit verschijnsel is voor deze proef onbekend, maar naar aanleiding van de bevindingen wat betreft de stijghoogteverlagingen (zie paragraaf 6.1) wordt als mogelijke verklaring aangenomen dat de grote stijghoogtes in het filter ook in deze proef het gevolg zijn van water dat met hoge snelheid over het talud stroomt. De spleten tussen de elementen kunnen daarbij een rol spelen. Daarnaast is het mogelijk dat ook tijdens deze proef de steen met DRO 5 en 6 al enigszins boven het talud uitstak.

Wanneer de merkwaardige grote stijghoogteverschillen buiten beschouwing blijven, zal het stijghoogteverschil $\phi_{w2\%,meetdata}$ tijdens proef L1 beduidend lager uitvallen. Naar verwachting zullen $\phi_{w2\%,meetdata}$ en $\phi_{w2\%,formules}$ dezelfde ordegrrootte hebben. De meetdata van de Deltagootproeven zijn in dat geval niet strijdig met de ontwikkelde formules.

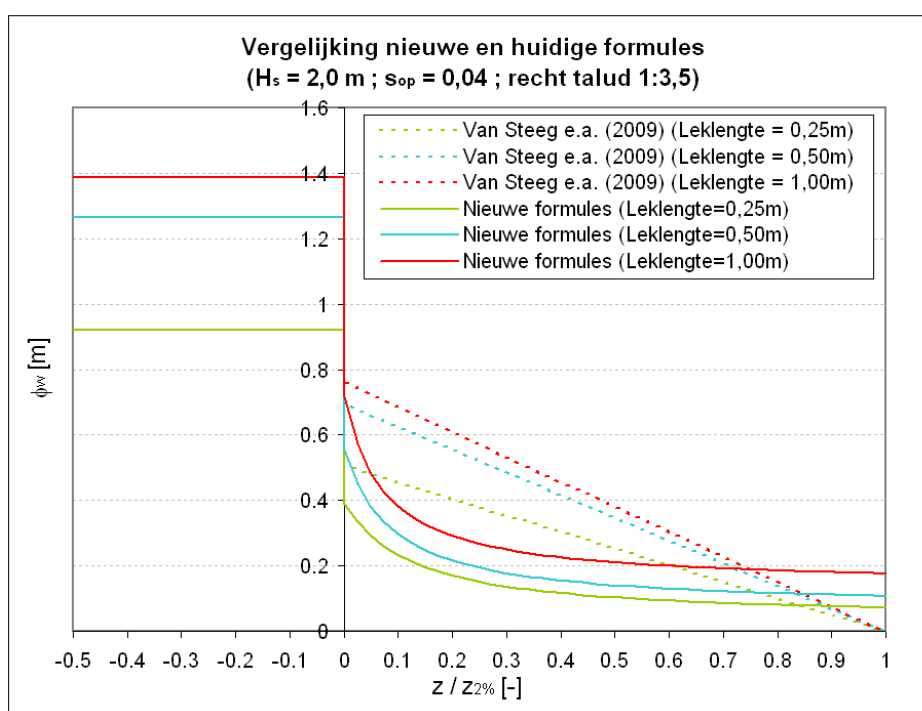
6.3 Vergelijking nieuwe formules (5.3) en (5.4) met huidige formules

In de onderhavige paragraaf worden de nieuwe formules (5.3) en (5.4) vergeleken met de huidige formules, die in Steentoets gebruikt worden.

In Steentoets wordt voor het berekenen van de belasting boven SWL eerst de maximale belasting onder SWL uitgerekend. De belasting bóven SWL wordt vervolgens uitgerekend door die maximale belasting onder SWL te vermenigvuldigen met de correctiefactor $f_{bovenbeloop}$, welke wordt gegeven in formule (6.15). Deze factor is bepaald in Van Steeg & Klein Breteler (2009).

$$f_{bovenbeloop} = -0,55 \frac{z}{z_{2\%}} + 0,55 \quad (\text{voor } 0 < z/z_{2\%} < 1) \quad (6.15)$$

De nieuwe formules (5.3) en (5.4) en de huidige formules worden met elkaar vergeleken in Figuur 6.8. De ononderbroken lijnen hebben betrekking op de nieuwe formules en de stippellijnen op de huidige formules. De formules zijn met elkaar vergeleken voor enkele realistische lek lengtes (groen: $\Lambda = 0,25$ m ; blauw: $\Lambda = 0,50$ m ; rood: $\Lambda = 1,00$ m). Op de horizontale as is de dimensieloze verticale afstand ten opzicht van SWL gegeven: $z/z_{2\%}$. Op de verticale as is het stijghoogteverschil ϕ_w uitgezet.



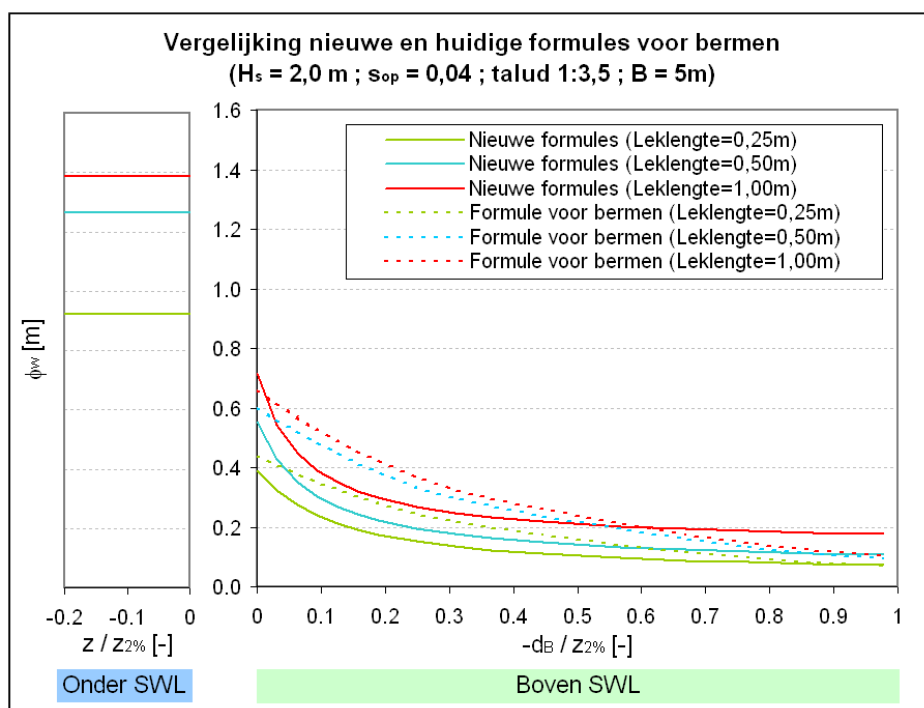
Figuur 6.8 Vergelijking nieuwe formules (5.3) en (5.4) en huidige formules (Van Steeg & Klein Breteler, 2009) voor belasting boven SWL (recht talud).

De stijghoogteverschillen onder SWL zijn met Steentoets uitgerekend door daarin een realistische steenzetting in te voeren. De verschillende leklengtes werden gerealiseerd door te variëren in het percentage open oppervlak. Daarbij wordt uitgegaan van de volgende relevante parameters: $H_s = 2,0$ m; $s_{op} = 0,04$ en talud = 1:3,5 (recht zonder berm).

De stijghoogteverschillen boven SWL worden bij de nieuwe methode berekend met de formules (5.3) en (5.4), waarbij wordt uitgegaan van de parameters $z_{2\%} = 4,10$ m (berekend met PC-Overslag), $\tan\alpha = 1/3,5$ en $\theta_f = 75^\circ$. De stijghoogteverschillen boven SWL worden bij de huidige methode berekend door het stijghoogteverschil onder SWL te vermenigvuldigen met $f_{\text{bovenbeloop}}$.

Volgens de nieuwe formules is de belasting op het talud boven SWL over het algemeen lager dan volgens formules in Steentoets. Dit was te verwachten, omdat in het huidige onderzoek met veel meer detail is gekeken naar de belasting boven de waterlijn.

Alleen heel hoog op het talud geven de nieuwe formules een grotere belasting. Dit heeft voor de praktijk echter nauwelijks consequenties, omdat steenzettingen nooit dunner worden gekozen dan een minimale maat. De belasting is hier zo klein, dat die minimale maat meestal maatgevend zal zijn.



Figuur 6.9 Vergelijking nieuwe formules (5.3) en (5.4) en huidige formule voor bermen.

Daarnaast zijn de nieuwe formules vergeleken met de huidige formules voor een berm, zie Figuur 6.9. De getrokken lijnen zijn weer hetzelfde als in Figuur 6.8. Dit komt omdat volgens de nieuwe formules uitsluitend de hoogte boven de stilwaterlijn relevant is, en niet of de bekleding op een berm ligt. Op de horizontale as is in de figuur de hoogte van de berm ten opzichte van de waterlijn uitgezet, d_B , die dimensieloos is gemaakt met de golfploop, $z_{2\%}$. Omdat de hoogte van de berm negatief is bij een berm boven SWL, is voor deze figuur gekozen om $-d_B/H_s$ op de horizontale as te zetten.

De gestippelde lijnen zijn bepaald met de invloedsfactor voor bermen, die te vinden is in bijlage C van het Technisch Rapport Steenzettingen (TAW 2003).

Naarmate de berm hoger boven SWL zit, is het stijghoogteverschil over de bekleding kleiner, zoals verwacht kon worden. Deze afname van de belasting is aanvankelijk bij de nieuwe formules groter dan volgens de formules voor bermen.

De formules voor bermen zijn destijds vastgesteld op basis van een analyse van dezelfde proeven als die in het huidige verslag zijn geanalyseerd. Toen, bijna 20 jaar geleden, is de analyse vooral geconcentreerd geweest op bermen onder de waterlijn, omdat daar de grootste belastingen optreden (Luth en de Waal, 1994). Bermen boven de waterlijn worden bijna niet belast. De trend die gevonden is voor bermen onder water, is vervolgens voortgezet voor bermen boven water.

In de huidige analyse is echter uitsluitend gekeken naar steenzettingen boven water.

Dit verklaart de verschillen tussen gestippelde lijnen en getrokken lijnen in Figuur 6.9. Aangenomen wordt dat de nieuwe formules beter zijn dan de oude.

7 Conclusies en aanbevelingen

Voor het ontwikkelen van een rekenmodel voor steenzettingen boven de waterlijn is de maatgevende belasting boven de waterlijn gekwantificeerd. Het bleek noodzakelijk te zijn onderscheid te maken tussen relatief vlak gezette steenbekledingen en steenzettingen waarin sommige stenen wat uitsteken boven het taludoppervlak.

Voor de relatief vlak gezette bekledingen zijn in het onderhavige onderzoek modelproeven uit 1992 (De Waal, 1992) geanalyseerd. Tijdens de proeven van 1992 waren er drukopnemers in een glad talud geplaatst, zowel boven als onder de stilwaterlijn. Zowel constructies met als zonder berm werden geanalyseerd, om ook de invloed van een berm op de belasting te bepalen.

In het modelonderzoek van 1992 is voor diverse geometrieën onderzoek gedaan naar onder andere het drukverloop op het talud. Wat betreft de geometrie van de constructies werd gevarieerd in de taludhelling (1:3 of 1:4) en de bermbreedte (0,40 m, 1,00 m of geen berm). Alle proeven zijn uitgevoerd met een glad ondoorlatend talud met een diep voorland.

Bij de analyse van de metingen is gebruikgemaakt van de 'gediptheid'. Dit is een maat voor het stijghoogteverschil als het talud zou bestaan uit een steenzetting op een filter.

Volgens een uitgebreid selectieproces werden de grote hoeveelheid data met gediptheden teruggebracht tot slechts enkele getallen per proef: het verloop over het talud van de gediptheid met een overschrijdingsfrequentie van 2% (zie paragraaf 5.4). Om de resultaten praktisch bruikbaar en geschikt te maken voor inpassing in de gebruikelijke formules voor steenzettingen (zoals geprogrammeerd in Steentoets), werden die gediptheden vervolgens omgerekend naar een fronthoogte bij een bepaald geschematiseerd front (zie paragraaf 5.5). Op basis van de fronthoogteverlopen over het talud, die daaruit volgden, werd tenslotte toegewerkt naar een praktisch bruikbare formule voor het fronthoogteverloop over het talud (paragraaf 5.6).

Uit de analyse volgde dat de bermbreedte en bermdiepte invloed hebben op de grootte van de belasting. Het bleek dat de beste manier om de belasting te kwantificeren is door de fronthoogte dimensieloos te maken met de significante golfhoogte ($\phi_{b2\%}/H_s$), en de plaats op het talud weer te geven als een niveau relatief ten opzichte van de golfoploophoogte ($z/z_{2\%}$). Dit sluit aan op de constatering dat de belasting op de hele berm ongeveer constant is. Daarbij moet de invloed van de berm op $z_{2\%}$ alleen boven de berm meegeteld worden. Immers, het oplopende water, dat een stijghoogtefront vormt, heeft onder de berm de invloed ervan nog niet gemerkt. Er is slechts een marginale invloed op het front te verwachten van de door de berm iets veranderde golfneerloop. Voor de locaties onder de berm moet een fictieve $z_{2\%}$ berekend worden op een denkbeeldig doorlopend talud met een helling gelijk aan die onder de berm.

Vanwege de gecompliceerde invloed van de bermbreedte en bermdiepte is gekozen voor een eenvoudige formule, waarin deze invloeden niet expliciet zijn opgenomen, maar die een omhullende vormt om alle meetpunten:

$$\frac{\phi_{b2\%}}{H_s} = 0,042 \cdot \left(\frac{z}{z_{2\%}} + 0,060 \right)^{-1} \quad (7.1)$$

Met:

- $\phi_{b2\%}$ = Hoogte van het stijghoogtefront (m)
- H_s = Significante golfhoogte (m)
- z = Verticale afstand vanaf de stilwaterlijn tot de beschouwde locatie op het talud (boven stilwaterlijn is positief) (m)
- $z_{2\%}$ = Golfploophoogte met een overschrijdingsfrequentie van 2% (m)
Daarbij is $z_{2\%}$ de golfploophoogte van de totale constructie, dus indien van toepassing inclusief berm. Boven de berm moet de invloed van de berm worden meegeteld, maar eronder niet. Op de berm kan eventueel geïnterpoleerd worden tussen $z_{2\%}$ met berm en zonder berm.

Dit levert een conservatief resultaat voor de belasting op een relatief vlakke taludbekleding van gezette steen. Het blijkt dat deze belasting altijd kleiner is dan de belasting onder de waterlijn.

Daarnaast wordt voor de helling van het stijghoogtefront $\theta_f = 75^\circ$ aanbevolen. Hiermee kan het stijghoogteverschil over de toplaag berekend worden met de volgende formule:

$$\phi_w = \frac{\Lambda}{2} \left(\cos \alpha \tan \theta_f \left(1 - \exp \left(\frac{-\phi_{b2\%}}{\Lambda \cos \alpha \tan \theta_f} \right) \right) + \sin \alpha \right) \quad (7.2)$$

Met:

- ϕ_w = maximale stijghoogteverschil over de toplaag (m)
- Λ = leklengte (m)
- α = taludhelling ($^\circ$)
- $\phi_{b2\%}$ = hoogte van het stijghoogtefront (m)
- θ_f = helling van het stijghoogtefront = 75° ($^\circ$)

Het maximale stijghoogteverschil over de toplaag ϕ_w is de belasting die vergeleken kan worden met de sterkte voor relatief vlakke steenzettingen.

De sterkte van de steenzetting boven de waterlijn is niet wezenlijk anders dan onder de waterlijn. Er kan daarom gebruikgemaakt worden van dezelfde formules als in Steentoets2010. Met die formules wordt rekening gehouden met het eigengewicht van de stenen, de wrijving tussen naast elkaar gelegen stenen, de klemming, de invloed van traagheid en de invloed van toestroming.

De formules (7.1) en (7.2) zijn gebaseerd op modelproeven, die uitgevoerd zijn in de Scheldegoot (De Waal, 1992). De ontwikkelde formules zijn in de onderhavige analyse vergeleken met de resultaten van Deltagootproeven (Van Steeg & Klein Breteler, 2009). De hoeveelheid meetdata van de Deltagootproeven, die geschikt zijn voor het maken van een goede vergelijking, waren weliswaar beperkt, maar niet strijdig met de Scheldegootproeven.

De Deltagootproeven geven ook inzicht in de belasting van minder vlak gezette steenbekledingen. Uit de vergelijking van de Schelde- en Deltagootproeven volgde dat de stabiliteit van steenzettingen boven de stilwaterlijn gevoelig is voor water dat tijdens de golfploop met hoge snelheid over het talud, tegen uitstekende stenen stroomt, zoals dat in het verleden ook al voor havendammen was geconstateerd. Dan treden lokaal boven die stenen stijghoogteverlagingen op. In het filter zijn de stijghoogteverlagingen niet merkbaar, waardoor stijghoogteverschillen over de toplaag ontstaan. Als een uitstekende steen te ver omhoog

komt, kan die uit het talud gedrukt worden. Bij het bepalen van de stabiliteit van steenzettingen is het belangrijk dat met dit mechanisme rekening gehouden wordt. Daarom zijn bestaande stabiliteitsformules van een vergelijkbaar mechanisme (uitstekende stenen op binnentaluds van havendammen, in Klein Breteler e.a., 2006a) aangepast voor de toepassing op buitentaluds.

Er wordt geconcludeerd dat een uitstekende steen in een buitentalud niet zal gaan bewegen als voldaan wordt aan de volgende voorwaarden:

Als $C_L B_{\phi_{op}} \geq fD$:

Als $d_r \leq 0,2B$:

$$\text{Als } 0,9(z_{2\%} - z) < \frac{2\Delta DB(\cos \alpha - 0,5 \sin \alpha)}{4,5d_r - 0,5D}, \text{ dan stabiel} \quad (7.3)$$

Als $d_r > 0,2B$:

$$\text{Als } 0,9(z_{2\%} - z) < \frac{2\Delta DB(\cos \alpha - 0,5 \sin \alpha)}{0,9B \left(2 - \frac{B}{5d_r}\right) - 0,5D}, \text{ dan stabiel} \quad (7.4)$$

Als $C_L B_{\phi_{op}} < fD$: altijd stabiel

Met:

C_L = liftcoëfficiënt = 0,9 (-).

$B_{\phi_{op}}$ = afstand waarover stijghoogteverlaging aanwezig is. Met $B_{\phi_{op}} \approx 5d_r$ (m)

f = wrijvingscoëfficiënt (-)

D = dikte van de toplaag (m)

d_r = mate waarin uitstekende steen uitsteekt boven het taludoppervlak (m).

B = breedte van de stenen in de stroomrichting van het water (m).

$z_{2\%}$ = golfploophoogte met een overschrijdingsfrequentie van 2% (m).

z = verticale afstand vanaf de stilwaterlijn tot de beschouwde locatie op het talud (m).

Δ = $(\rho_s - \rho_w) / \rho_w$ = relatieve soortelijke massa van steenzettingselementen (-)

ρ_s = soortelijke massa van de stenen (kg/m^3)

ρ_w = soortelijke massa van water (kg/m^3)

α = taludhelling ($^\circ$)

Uit de analyse volgt dat steenzettingen op het boventalud gecontroleerd moeten worden op 2 aspecten:

- Stijghoogteverschil als gevolg van oplopend stijghoogtefront: formules (7.1) en (7.2).
- Stabiliteit van uitstekende stenen: formules (7.3) en (7.4).
Deze formules kunnen op vergelijkbare wijze gebruikt worden als de formules voor uitstekende stenen op binnentaluds van havendammen (Klein Breteler e.a., 2006a).

In Figuur 6.8 en Figuur 6.9 zijn de nieuwe criteria voor steenzettingen zonder oneffenheden vergeleken met de formules van Van Steeg & Klein Breteler (2009), die thans in Steentoets zijn opgenomen voor bekledingen boven SWL, en met de huidige formules voor bermen boven SWL. Het blijkt dat de nieuwe criteria leiden tot dunnere steenzettingen, behalve rond de waterlijn. Rond de waterlijn zijn de resultaten vrijwel gelijk.

Dat de nieuwe formules tot dunnere steenzettingen leiden was te verwachten omdat nu met veel meer detail naar de belastingen is gekeken dan door Van Steeg & Klein Breteler (2009), en de formules voor bermen destijds vooral zijn opgesteld voor bermen onder SWL.

In overleg met de opdrachtgever is geconcludeerd dat deze formules goed gebruikt kunnen worden in een geavanceerde analyse van de stabiliteit van steenzettingen. De formules zijn voorlopig nog onvoldoende geverifieerd in een breed toepassingsgebied om ze op te nemen in Steentoets.

8 Referenties

- Battjes, J.A., en Groenendijk, H.W. (2000), *Wave height distributions on shallow foreshores*, *Coastal Engineering* 40, pp 161-182, Elsevier Science BV
- BREAKWAT 3.3 (2010), *User and Technical Manual, Version 3.3, Deltares, maart 2010*
- De Waal, J.P. (1992), *Taludbekledingen van gezette steen, Golfdruk op het talud, Deltares, Rapport H195, december 1992*
- Kleefsman, K.M.T., Fekken, G., Veldman, A.E.P., Iwanowski, B., and Buchner, B. (2005), *A Volume-of-Fluid based simulation method for wave impact problems. Journal Of Computational Physics*, 206(1):363–393, 2005.
- Klein Breteler, M. e.a. (1991), *Taludbekledingen van gezette steen, analytische en numerieke berekening van de stijghoogte onder de toplaag, rapport M1795/H195 deel XIX, Waterloopkundig Laboratorium, augustus 1991*
- Klein Breteler, M. (2000), *Grootschalig modelonderzoek naar stabiliteit van taludbekledingen; analyse van resultaten van Deltagootproeven, Waterloopkundig Laboratorium, rapport H3272, mei 2000*
- Klein Breteler, M., I vd Werf en I Wenneker (2006), *Kwantificering golfbelasting en invloed lange golven, Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen, Deltares, Conceptrapport H4421, juni 2006*
- Klein Breteler, M., Kuiper, C., Booster, L.N. (GeoDelft), Eysink, W., (2006a), *Stabiliteit van gezette steenbekledingen op havendammen, Afleiding van een verbeterde toetsmethode van de toplaag, Waterloopkundig Laboratorium, rapport H4432 versie 5, februari 2006*
- Klein Breteler, M. (2009), *Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen, Documentatie STEENTOETS2008 en STEENTOETS2010, Deltares, Rapport 1200193-001, november 2009*
- Luth en de Waal (1994), *Taludbekledingen van gezette steen, Golfdruk op het talud, Deltares, Rapport H1770, november 1994*
- Mourik, G.C. (2011), *Locatie maximale belasting op steenzettingen bij ondiepe voorlanden, rapport 1202551.008, Deltares, februari 2011*
- TAW (2002), *Technisch Rapport Golfoploop en Golfoverslag bij dijken, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Delft, mei 2002*
- TAW (2003), *Technisch Rapport Steenzettingen, Toetsing, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, DWW-2003-097, ISBN 90-369-5551-3, december 2003*
- Van Steeg, P. en Klein Breteler, M. (2009), *Stabiliteit van steenzettingen onder golfaanval, deel 1 - boven de waterlijn, Deltares, Rapport 1200193-002 versie 2.0, november 2009*

A Tabellen

Tabel A.1	Overzicht randvoorwaarden en meetresultaten (3000-, 3100- en 3200-serie)
Tabel A.2	Overzicht randvoorwaarden en meetresultaten (4000-, 4100- en 4200-serie)

Proef	tana	h	H _s	T _p	B _{berm}	d _B	s _{op}	ξ _{op}	Z _{2%} zonder berm	Z _{2%} met berm	N	N _{5%}
	[-]	[m]	[m]	[s]	[m]	[m]	[-]	[-]	[m]	[m]	[-]	[-]
3001	0.33	0.60	0.100	2.56	0.00	0.00	0.010	3.37	0.339	-	839	42
3002	0.33	0.60	0.143	2.19	0.00	0.00	0.019	2.41	0.460	-	826	41
3003	0.33	0.60	0.173	1.95	0.00	0.00	0.029	1.95	0.536	-	841	42
3004	0.33	0.60	0.185	1.88	0.00	0.00	0.034	1.82	0.536	-	826	41
3005	0.33	0.60	0.190	1.75	0.00	0.00	0.040	1.67	0.505	-	857	43
3006	0.33	0.60	0.171	1.69	0.00	0.00	0.038	1.70	0.463	-	878	44
3007	0.33	0.60	0.100	1.76	0.00	0.00	0.021	2.32	0.320	-	881	44
3008	0.33	0.60	0.103	1.38	0.00	0.00	0.035	1.79	0.293	-	870	44
3009	0.33	0.60	0.144	1.57	0.00	0.00	0.037	1.72	0.395	-	843	42
3010	0.33	0.60	0.114	1.57	0.00	0.00	0.030	1.94	0.351	-	853	43
3011	0.33	0.60	0.135	1.69	0.00	0.00	0.030	1.91	0.411	-	907	45
3012	0.33	0.60	0.154	1.88	0.00	0.00	0.028	1.99	0.479	-	841	42
3015	0.33	0.60	0.117	2.56	0.00	0.00	0.011	3.12	0.392	-	838	42
3101	0.33	0.52	0.166	1.79	0.40	-0.08	0.033	1.83	-	-	-	-
3102	0.33	0.52	0.144	2.15	0.40	-0.08	0.020	2.36	-	-	-	-
3103	0.33	0.60	0.101	2.56	0.40	0.00	0.010	3.35	-	-	-	-
3104	0.33	0.60	0.141	2.16	0.40	0.00	0.019	2.39	-	-	-	-
3105	0.33	0.60	0.173	1.96	0.40	0.00	0.029	1.96	-	-	-	-
3106	0.33	0.60	0.184	1.84	0.40	0.00	0.035	1.79	-	0.406	856	43
3107	0.33	0.60	0.196	1.76	0.40	0.00	0.041	1.66	-	0.406	876	44
3108	0.33	0.60	0.173	1.71	0.40	0.00	0.038	1.71	-	0.360	880	44
3109	0.33	0.60	0.103	1.78	0.40	0.00	0.021	2.31	-	0.250	864	43
3110	0.33	0.68	0.100	1.71	0.40	0.08	0.022	2.25	-	0.265	874	44
3111	0.33	0.68	0.172	1.71	0.40	0.08	0.038	1.72	-	0.369	887	44
3112	0.33	0.68	0.184	1.89	0.40	0.08	0.033	1.83	-	0.426	862	43
3113	0.33	0.68	0.170	1.95	0.40	0.08	0.029	1.97	-	0.417	897	45
3114	0.33	0.68	0.141	2.20	0.40	0.08	0.019	2.44	-	0.417	909	45
3115	0.33	0.73	0.144	2.17	0.40	0.13	0.020	2.38	-	0.450	908	45
3116	0.33	0.73	0.174	1.73	0.40	0.13	0.037	1.73	-	0.394	868	43
3117	0.33	0.60	0.152	1.66	0.40	0.00	0.035	1.77	-	0.318	849	42
3118	0.33	0.68	0.099	1.82	0.40	0.08	0.019	2.41	-	0.280	869	43
3201	0.33	0.73	0.172	1.74	1.00	0.13	0.036	1.75	-	0.330	831	42
3202	0.33	0.73	0.140	2.10	1.00	0.13	0.020	2.34	-	0.334	868	43
3203	0.33	0.68	0.141	2.13	1.00	0.08	0.020	2.36	-	0.318	861	43
3204	0.33	0.68	0.173	1.97	1.00	0.08	0.029	1.97	-	0.326	819	41
3205	0.33	0.68	0.175	1.82	1.00	0.08	0.034	1.81	-	0.303	813	41
3206	0.33	0.68	0.170	1.72	1.00	0.08	0.037	1.74	-	0.323	841	42
3207	0.33	0.68	0.100	1.86	1.00	0.08	0.019	2.45	-	0.234	863	43
3208	0.33	0.60	0.101	1.88	1.00	0.00	0.018	2.46	-	0.238	824	41
3209	0.33	0.60	0.165	1.65	1.00	0.00	0.039	1.69	-	0.302	855	43
3210	0.33	0.60	0.190	1.74	1.00	0.00	0.040	1.66	-	0.355	800	40
3211	0.33	0.60	0.195	1.88	1.00	0.00	0.035	1.77	-	0.330	815	41
3212	0.33	0.60	0.168	1.88	1.00	0.00	0.030	1.91	-	0.306	844	42
3213	0.33	0.60	0.141	2.21	1.00	0.00	0.019	2.45	-	0.330	835	42
3214	0.33	0.60	0.102	2.45	1.00	0.00	0.011	3.19	-	0.311	872	44
3215	0.33	0.52	0.141	2.10	1.00	-0.08	0.020	2.33	0.451	0.313	822	41
3216	0.33	0.52	0.165	1.80	1.00	-0.08	0.033	1.84	0.484	0.296	804	40
3217	0.33	0.60	0.182	1.88	1.00	0.00	0.033	1.83	-	0.319	818	41
3218	0.33	0.60	0.149	1.64	1.00	0.00	0.036	1.77	-	0.278	875	44
Overzicht randvoorwaarden en berekende golfoploop 3000-, 3100- en 3200-serie									Talud 1:3			
DELTA RES									1202551-009		FIG A.1	

Proef	$\tan\alpha$	h	H_s	T_p	B_{berm}	d_B	s_{op}	ξ_{op}	$z_{2\%}$ zonder berm	$z_{2\%}$ met berm	N	$N_{5\%}$
	[-]	[m]	[m]	[s]	[m]	[m]	[-]	[-]	[m]	[m]	[-]	[-]
4001	0.25	0.60	0.101	2.48	0.00	0.00	0.011	2.44	-	-	-	-
4002	0.25	0.60	0.143	2.21	0.00	0.00	0.019	1.82	-	-	-	-
4003	0.25	0.60	0.164	1.95	0.00	0.00	0.028	1.50	-	-	-	-
4004	0.25	0.60	0.182	1.82	0.00	0.00	0.035	1.33	-	-	-	-
4005	0.25	0.60	0.194	1.74	0.00	0.00	0.041	1.23	-	-	-	-
4006	0.25	0.60	0.105	1.78	0.00	0.00	0.021	1.72	-	-	-	-
4007	0.25	0.60	0.158	1.70	0.00	0.00	0.035	1.34	-	-	-	-
4008	0.25	0.60	0.100	2.48	0.00	0.00	0.010	2.45	-	-	-	-
4009	0.25	0.60	0.165	1.55	0.00	0.00	0.044	1.19	-	-	-	-
4101	0.25	0.60	0.103	2.48	0.40	0.00	0.011	2.41	-	-	-	-
4102	0.25	0.60	0.143	2.21	0.40	0.00	0.019	1.82	-	-	-	-
4103	0.25	0.60	0.167	1.99	0.40	0.00	0.027	1.52	-	-	-	-
4104	0.25	0.60	0.183	1.86	0.40	0.00	0.034	1.36	-	-	-	-
4105	0.25	0.60	0.198	1.74	0.40	0.00	0.042	1.22	-	-	-	-
4106	0.25	0.60	0.107	1.78	0.40	0.00	0.022	1.70	-	-	-	-
4107	0.25	0.60	0.165	1.74	0.40	0.00	0.035	1.34	-	-	-	-
4108	0.25	0.68	0.103	1.82	0.40	0.08	0.020	1.77	-	-	-	-
4109	0.25	0.68	0.135	2.10	0.40	0.08	0.020	1.78	-	-	-	-
4110	0.25	0.68	0.169	1.95	0.40	0.08	0.028	1.48	-	-	-	-
4111	0.25	0.68	0.185	1.82	0.40	0.08	0.036	1.32	-	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
4112	0.25	0.68	0.167	1.71	0.40	0.08	0.037	1.31	-	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
4113	0.25	0.76	0.139	2.21	0.40	0.16	0.018	1.85	-	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
4114	0.25	0.76	0.163	1.74	0.40	0.16	0.035	1.35	-	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
4115	0.25	0.52	0.145	2.10	0.40	-0.08	0.021	1.72	0.397	0.328	843	42
4116	0.25	0.52	0.162	1.82	0.40	-0.08	0.031	1.41	0.364	0.307	799	40
4117	0.25	0.68	0.176	1.95	0.40	0.08	0.030	1.45	-	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
4118	0.25	0.60	0.129	2.82	0.40	0.00	0.010	2.45	-	0.392	901	45
4119	0.25	0.60	0.168	2.00	0.40	0.00	0.027	1.52	-	0.335	819	41
4120	0.25	0.60	0.184	1.86	0.40	0.00	0.034	1.35	-	0.331	799	40
4121	0.25	0.60	0.173	2.21	0.40	0.00	0.023	1.66	-	0.377	853	43
4122	0.25	0.60	0.140	2.48	0.40	0.00	0.015	2.07	-	0.366	887	44
4201	0.25	0.52	0.144	2.10	1.00	-0.08	0.021	1.73	0.396	0.271	836	42
4202	0.25	0.52	0.165	1.82	1.00	-0.08	0.032	1.40	0.367	0.265	792	40
4203	0.25	0.60	0.102	2.48	1.00	0.00	0.011	2.42	-	0.236	858	43
4204	0.25	0.60	0.142	2.21	1.00	0.00	0.019	1.83	-	0.254	845	42
4205	0.25	0.60	0.168	1.91	1.00	0.00	0.030	1.46	-	0.254	869	43
4206	0.25	0.60	0.183	1.86	1.00	0.00	0.034	1.36	-	0.266	840	42
4207	0.25	0.60	0.191	1.74	1.00	0.00	0.040	1.24	-	0.286	810	41
4208	0.25	0.60	0.105	1.86	1.00	0.00	0.019	1.79	-	0.180	821	41
4209	0.25	0.60	0.166	1.74	1.00	0.00	0.035	1.33	-	0.259	842	42
4210	0.25	0.68	0.172	1.95	1.00	0.08	0.029	1.47	-	0.268	827	41
4211	0.25	0.68	0.186	1.82	1.00	0.08	0.036	1.32	-	0.266	801	40
4212	0.25	0.68	0.165	1.74	1.00	0.08	0.035	1.34	-	0.258	855	43
4213	0.25	0.68	0.103	1.86	1.00	0.08	0.019	1.81	-	0.178	845	42
4214	0.25	0.68	0.141	2.16	1.00	0.08	0.019	1.80	-	0.255	882	44
4215	0.25	0.73	0.139	2.10	1.00	0.13	0.020	1.76	-	0.276	875	44
4216	0.25	0.73	0.171	1.74	1.00	0.13	0.036	1.31	-	0.266	855	43
4217	0.25	0.68	0.103	1.78	1.00	0.08	0.021	1.73	-	0.170	848	42

Overzicht randvoorwaarden en berekende golfloop
4000-, 4100- en 4200-serie

Talud 1:4

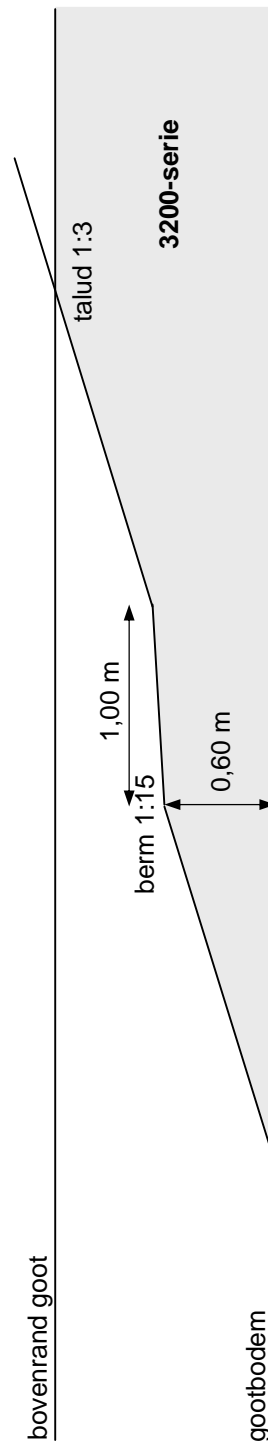
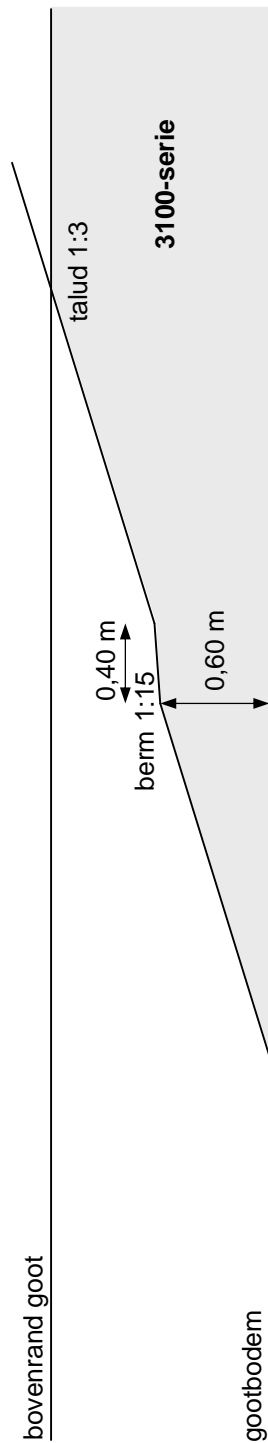
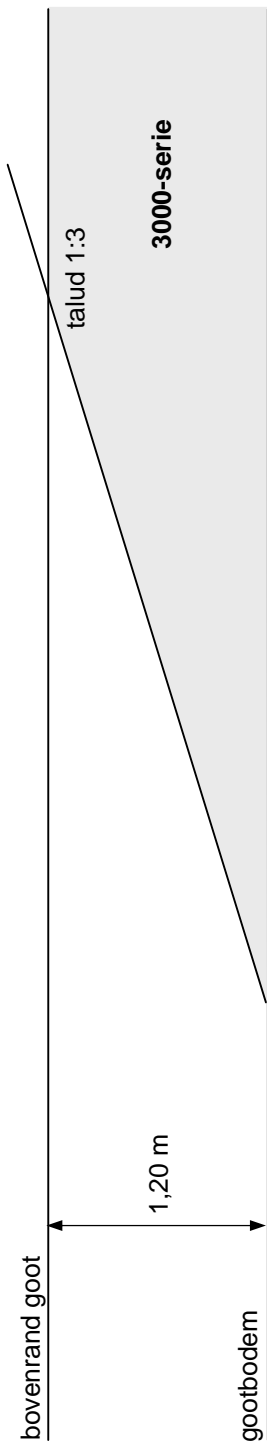
DELTARES

1202551-009

FIG A.2

B Figuren

Figuur B.1	Geometrie modelopstelling (3000-, 3100- en 3200-serie)
Figuur B.2	Geometrie modelopstelling (4000-, 4100- en 4200-serie)
Figuur B.3	Locaties drukopnemers en niveaus SWL (3000-, 3100- en 3200-serie)
Figuur B.4	Locaties drukopnemers en niveaus SWL (4000-, 4100- en 4200-serie)
Figuur B.5	Tijdstippen maximale gediptheid (proef 3112)
Figuur B.6	Meetdata modelproeven Deltagoot (2009)
Figuur B.7	Resultaten (x-as: $z/z_{2\%}$): Talud zonder berm
Figuur B.8	Resultaten (x-as: $z/z_{2\%}$): SWL onder berm ($B_{\text{berm}}=0,40\text{m}$)
Figuur B.9	Resultaten (x-as: $z/z_{2\%}$): SWL boven berm ($B_{\text{berm}}=0,40\text{m}$)
Figuur B.10	Resultaten (x-as: $z/z_{2\%}$): SWL op berm ($B_{\text{berm}}=0,40\text{m}$)
Figuur B.11	Resultaten (x-as: $z/z_{2\%}$): SWL onder berm ($B_{\text{berm}}=1,00\text{m}$)
Figuur B.12	Resultaten (x-as: $z/z_{2\%}$): SWL boven berm ($B_{\text{berm}}=1,00\text{m}$)
Figuur B.13	Resultaten (x-as: $z/z_{2\%}$): SWL op berm ($B_{\text{berm}}=1,00\text{m}$)
Figuur B.14	Resultaten (x-as: $z/z_{2\%}$): Alle proeven
Figuur B.15	Resultaten (x-as: x/H_s): Talud zonder berm
Figuur B.16	Resultaten (x-as: x/H_s): SWL onder berm ($B_{\text{berm}}=0,40\text{m}$)
Figuur B.17	Resultaten (x-as: x/H_s): SWL boven berm ($B_{\text{berm}}=0,40\text{m}$)
Figuur B.18	Resultaten (x-as: x/H_s): SWL op berm ($B_{\text{berm}}=0,40\text{m}$)
Figuur B.19	Resultaten (x-as: x/H_s): SWL onder berm ($B_{\text{berm}}=1,00\text{m}$)
Figuur B.20	Resultaten (x-as: x/H_s): SWL boven berm ($B_{\text{berm}}=1,00\text{m}$)
Figuur B.21	Resultaten (x-as: x/H_s): SWL op berm ($B_{\text{berm}}=1,00\text{m}$)
Figuur B.22	Meetdata modelproeven Deltagoot (2009), DRO 5 en 6 (proef L2, blokken)
Figuur B.23	Meetdata modelproeven Deltagoot (2009), DRO 5 en 7 (proef L2, blokken)
Figuur B.24	Meetdata modelproeven Deltagoot (2009), DRO 1 en 2 (proef L2, zuilen)
Figuur B.25	Meetdata modelproeven Deltagoot (2009), DRO 5 en 6 (proef L1, blokken)



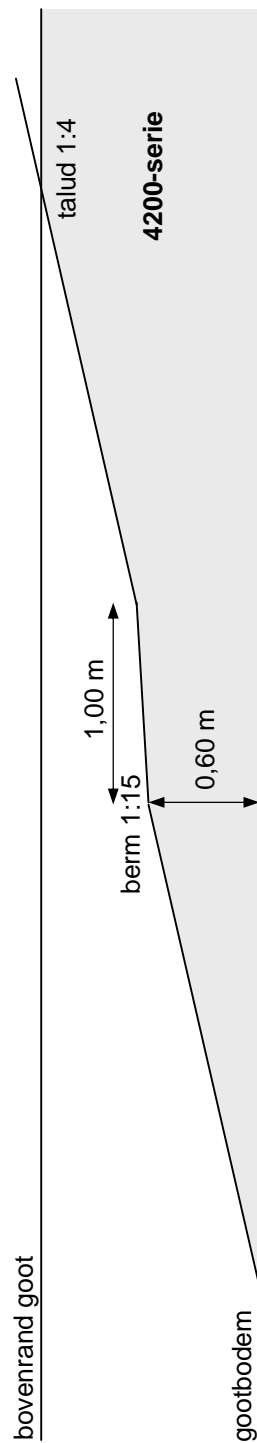
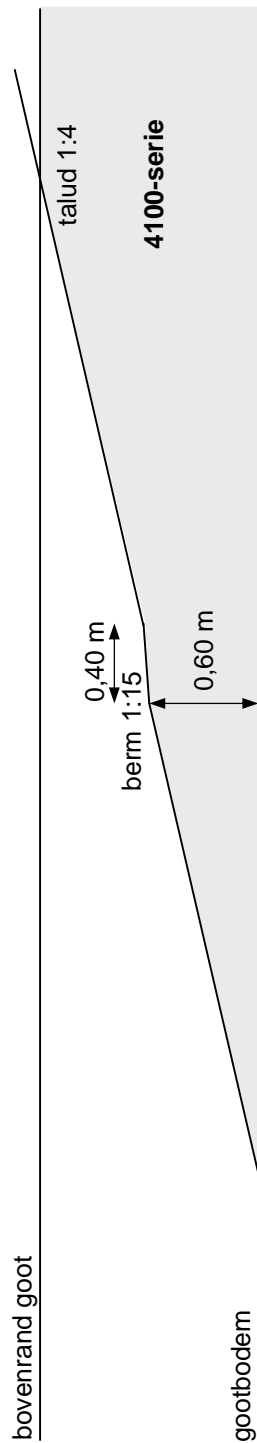
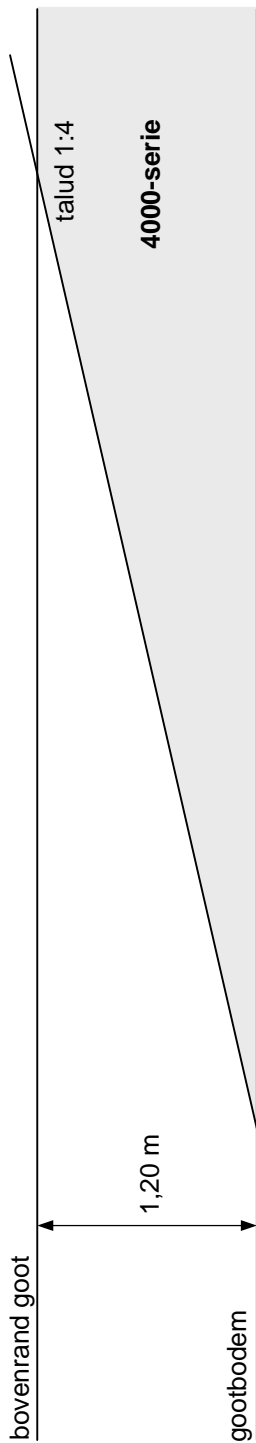
Geometrie modelopstelling
3000-, 3100- en 3200-serie

Talud 1:3

DELTARES

1202551-009

FIG B.1



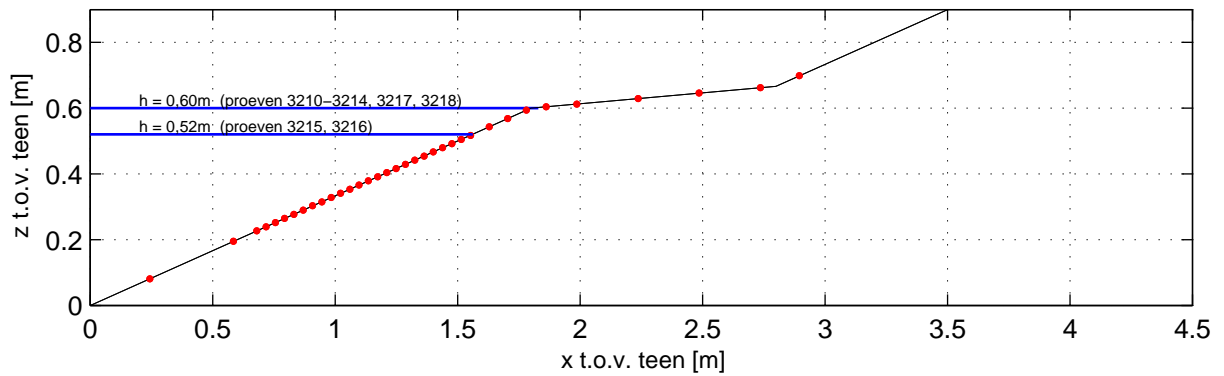
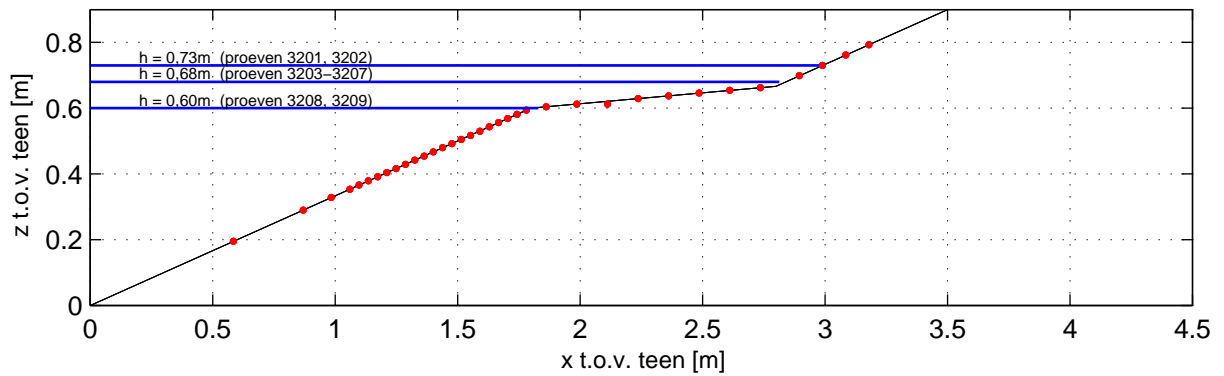
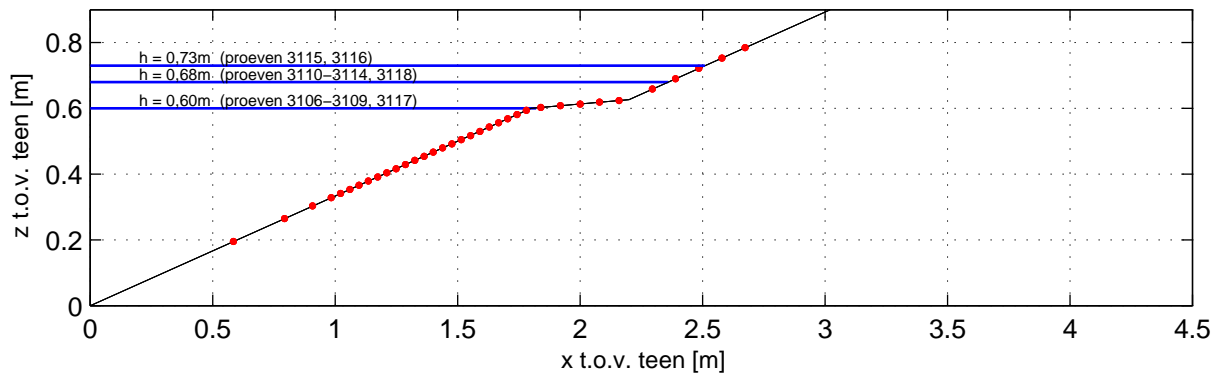
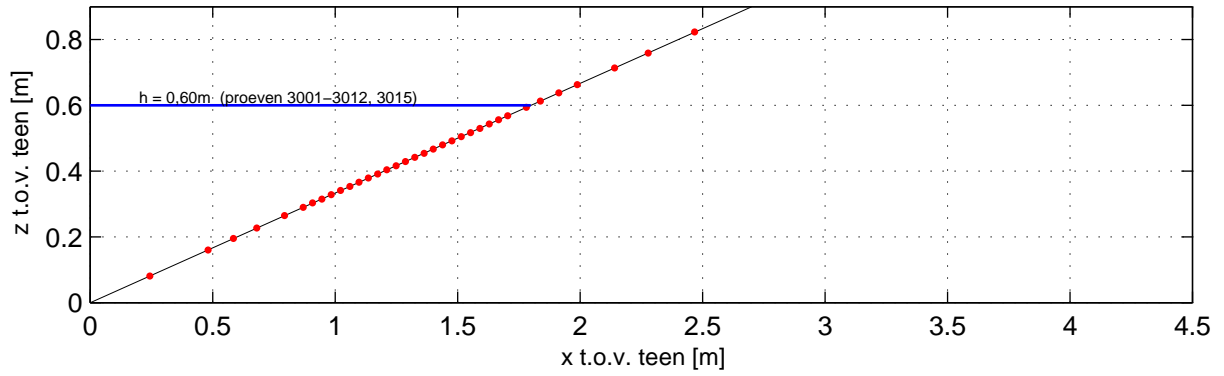
Geometrie modelopstelling
4000-, 4100- en 4200-serie

Talud 1:4

DELTARES

1202551-009

FIG B.2



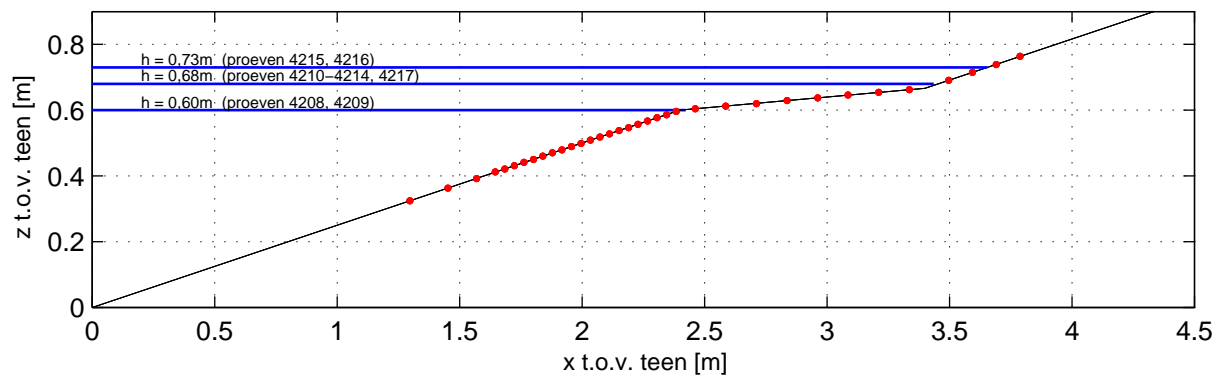
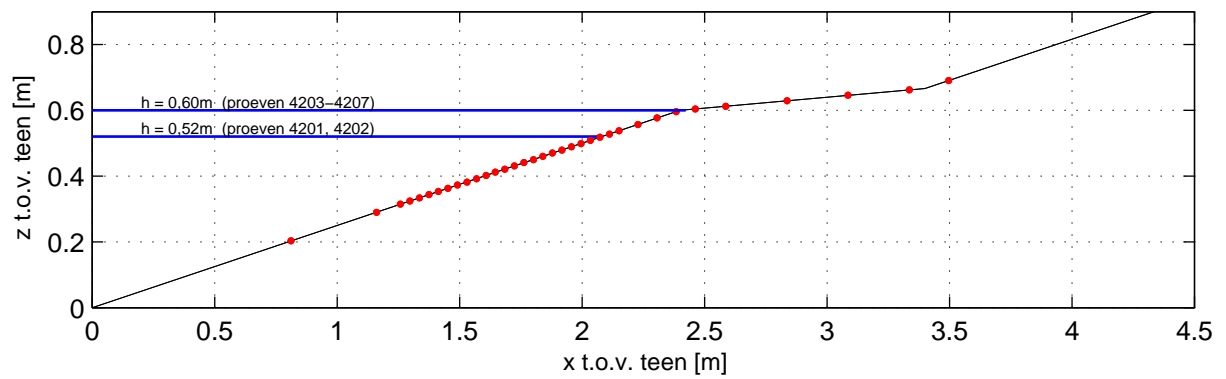
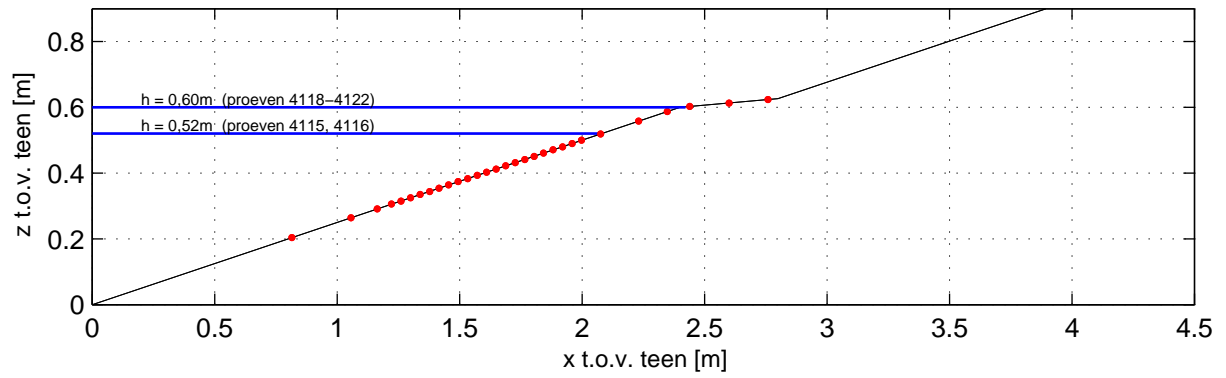
Locaties DRO's en niveau's SWL
3000-, 3100- en 3200-serie

Talud 1:3

DELTAIRES

1202551-009

FIG. B.3



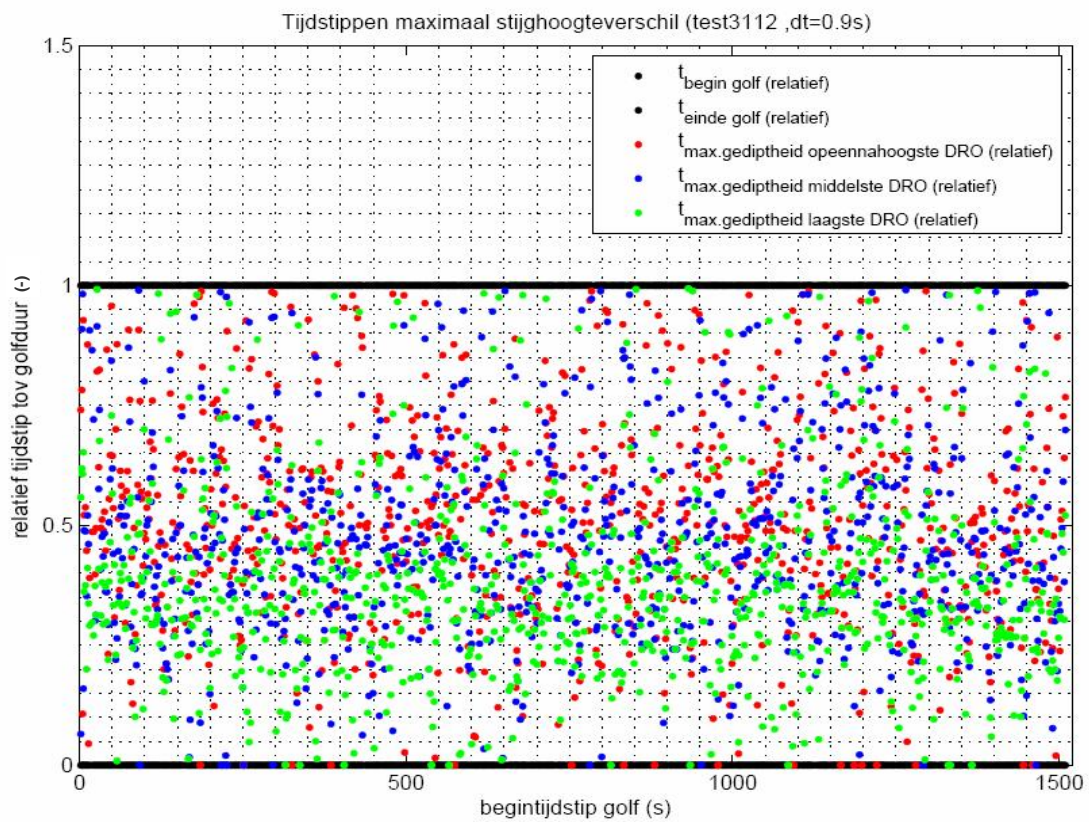
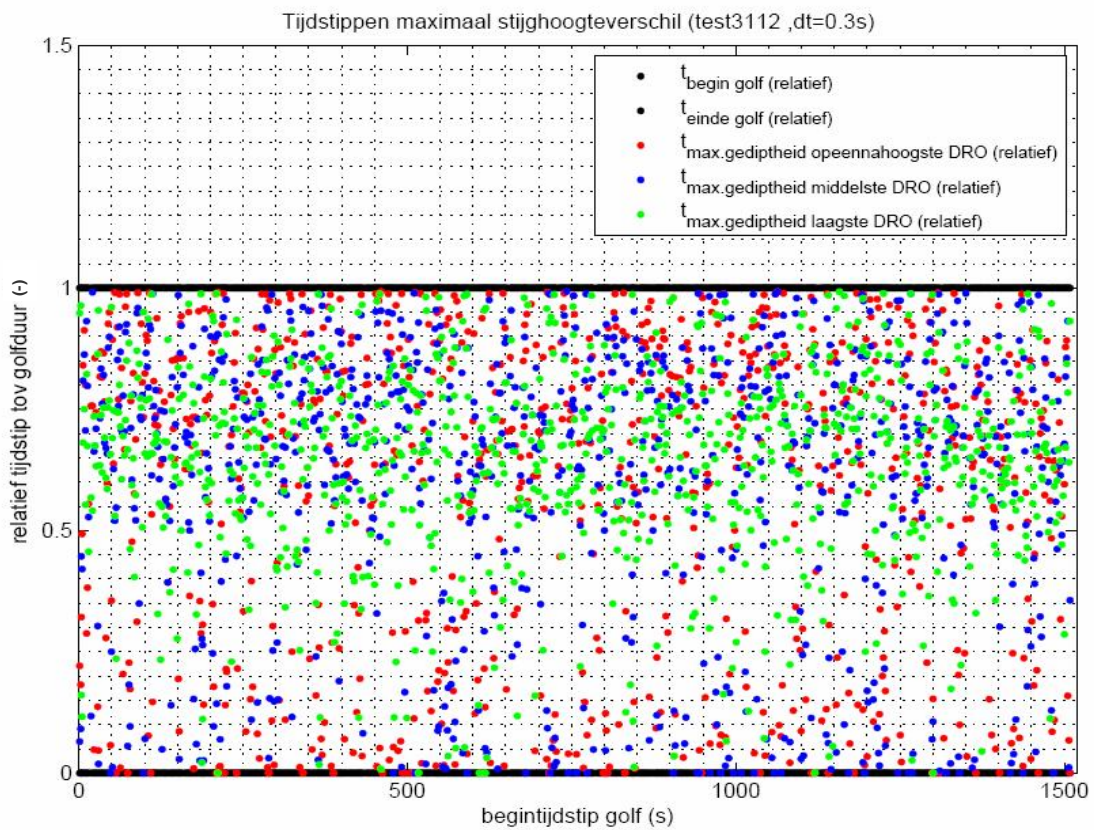
Locaties DRO's en niveau's SWL
4000-, 4100- en 4200-serie

Talud 1:4

DELTARES

1202551-009

FIG. B.4



Tijdstippen maximale gediptheid
voor dt=0,3 s (boven) en dt=0,9 s (onder)

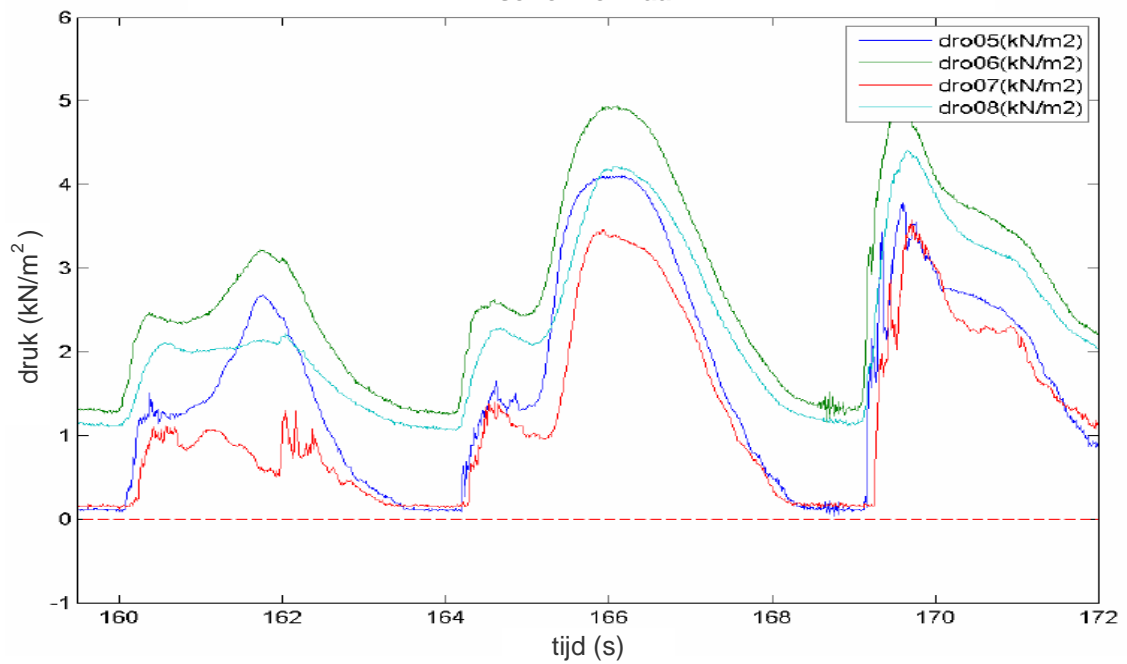
proef 3112

DELTARES

1202551-009

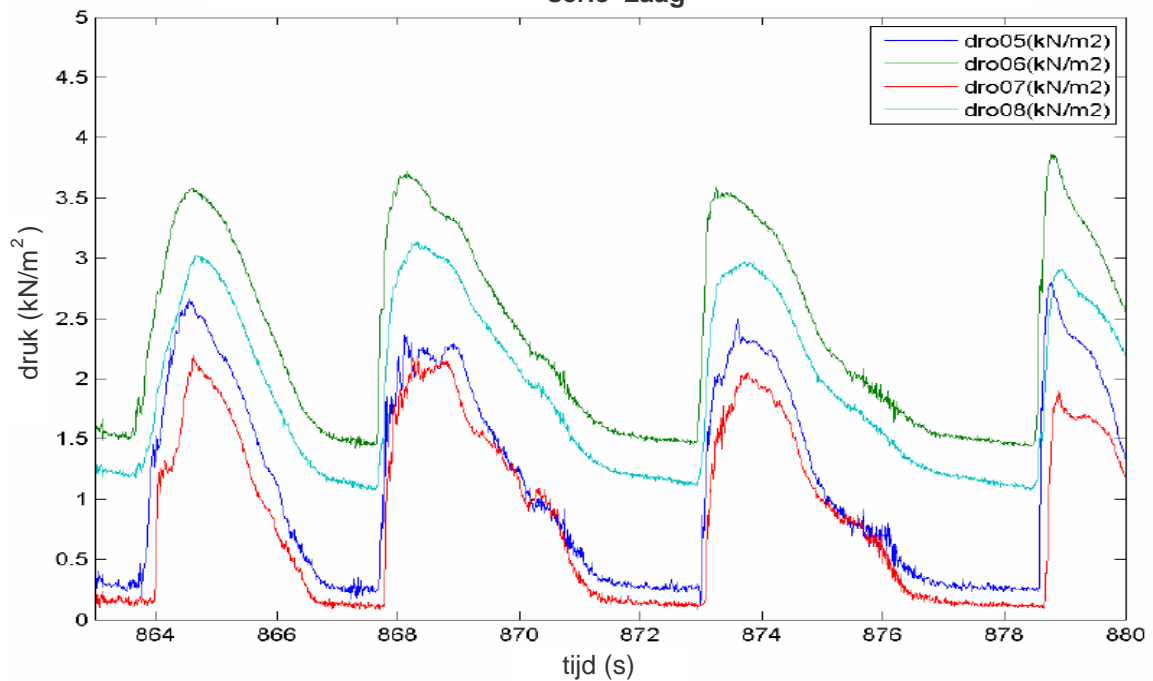
FIG B.5

Meetdata modelproeven Deltagoot (2009)
serie 'Normaal'



Serie Normaal (proef N1, $h = 0,008$ m t.o.v. DRO5)

Meetdata modelproeven Deltagoot (2009)
serie 'Laag'



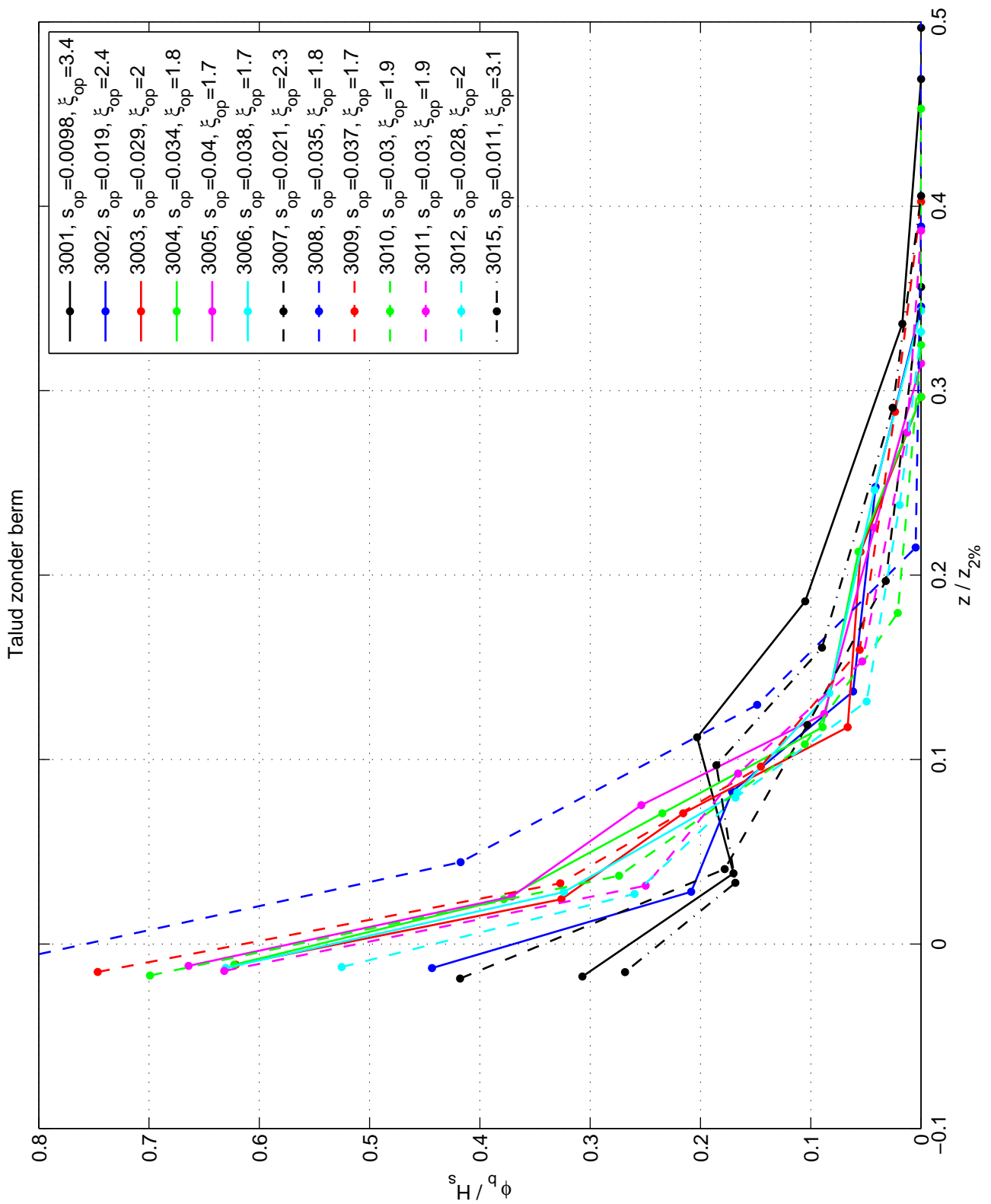
Serie Laag (proef L1, $h = -0,292$ m t.o.v. DRO5)

Meetdata modelproeven Deltagoot (2009)

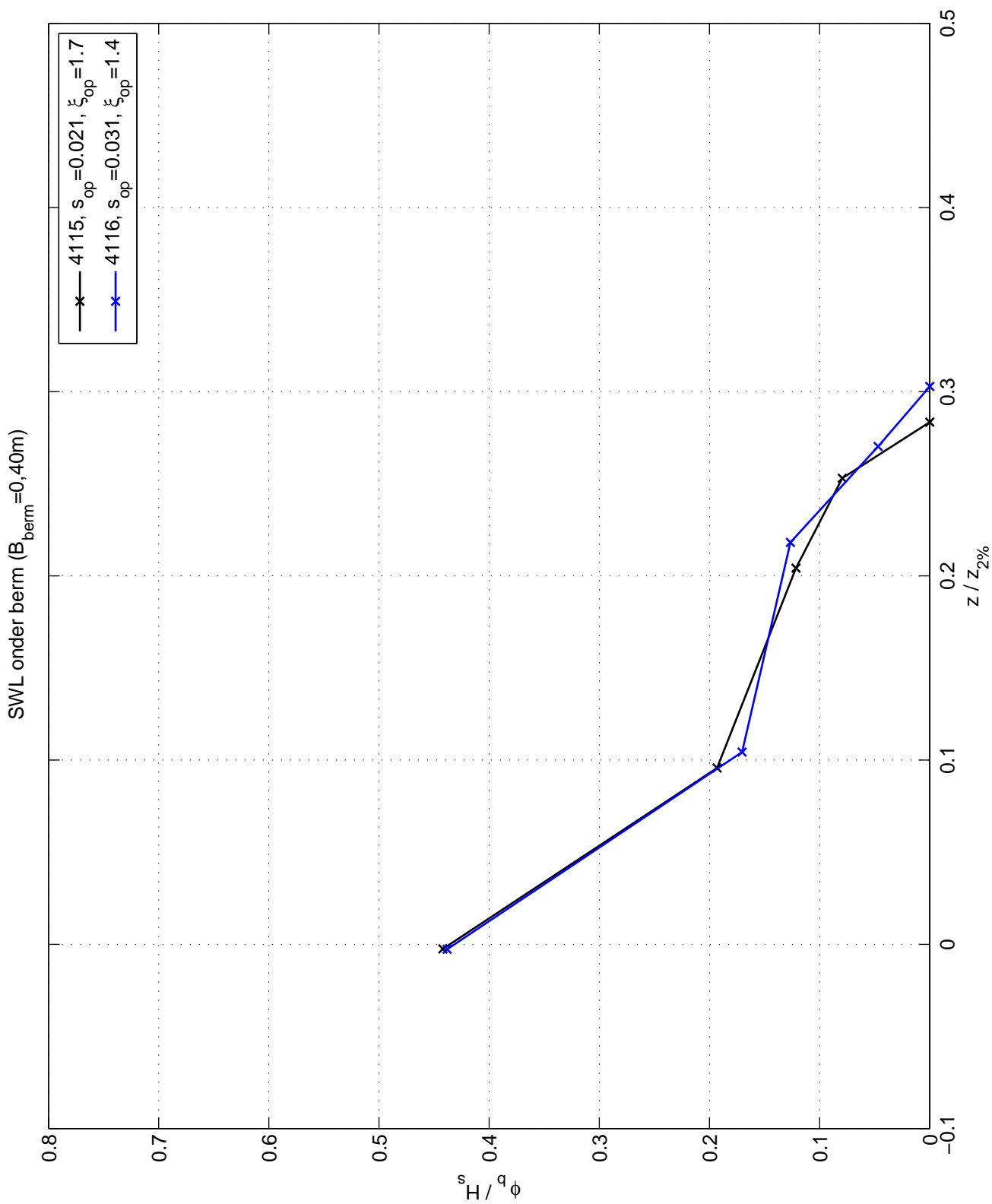
DELTAIRES

1202551-009

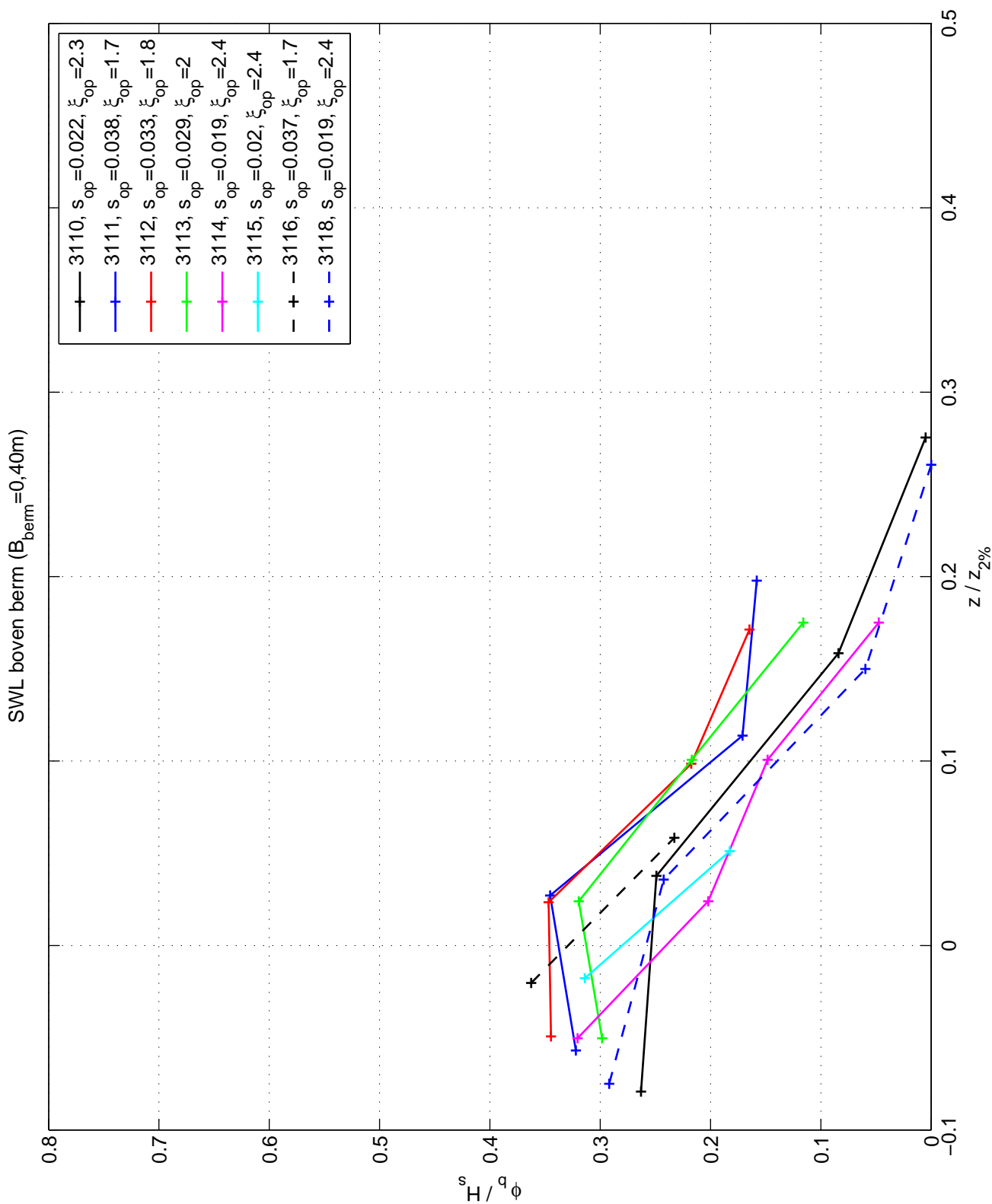
FIG B.6



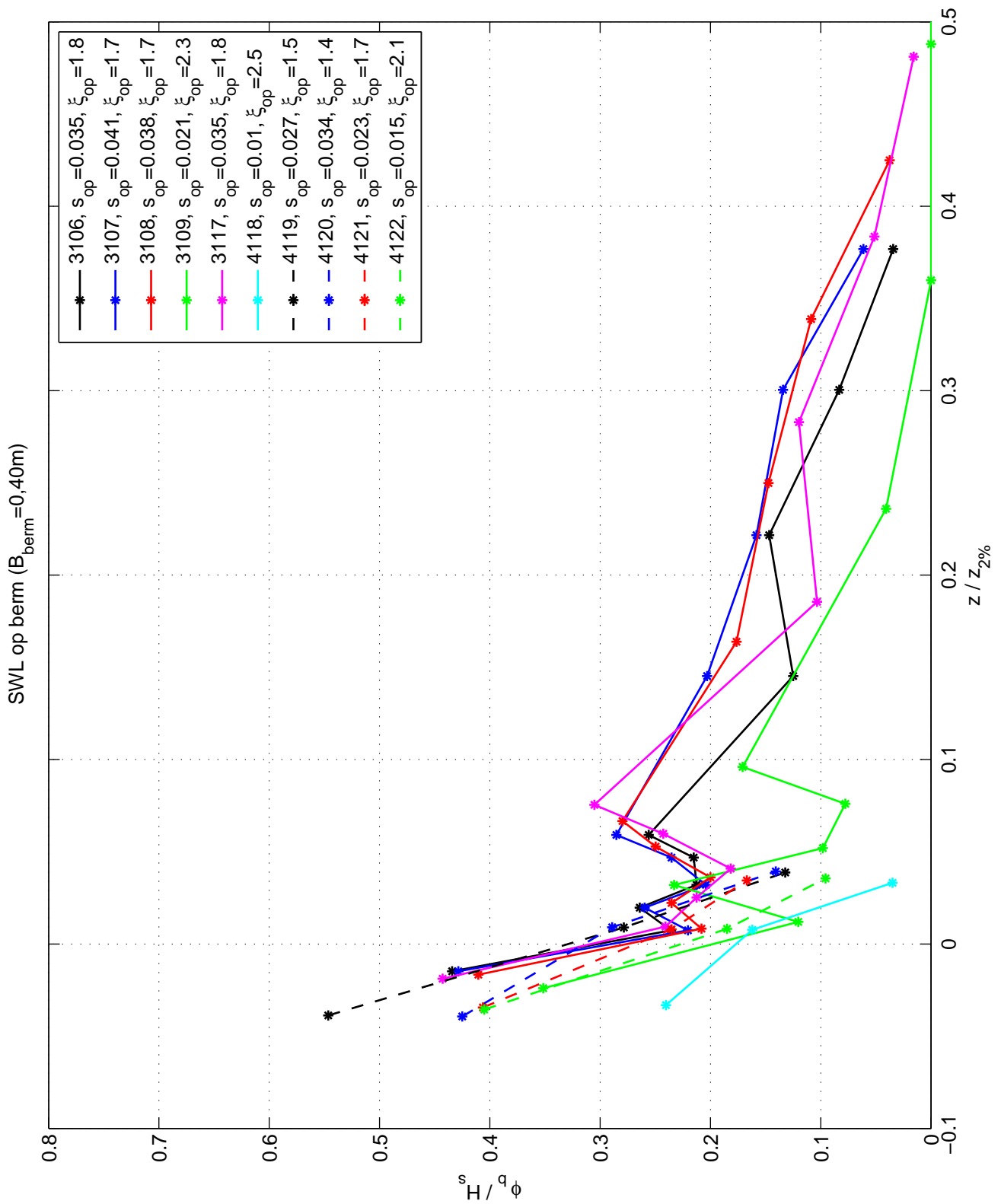
Resultaten: Talud zonder berm
 ϕ_b/H_s (-) uitgezet tegen $z/z_{2\%}$ (-)



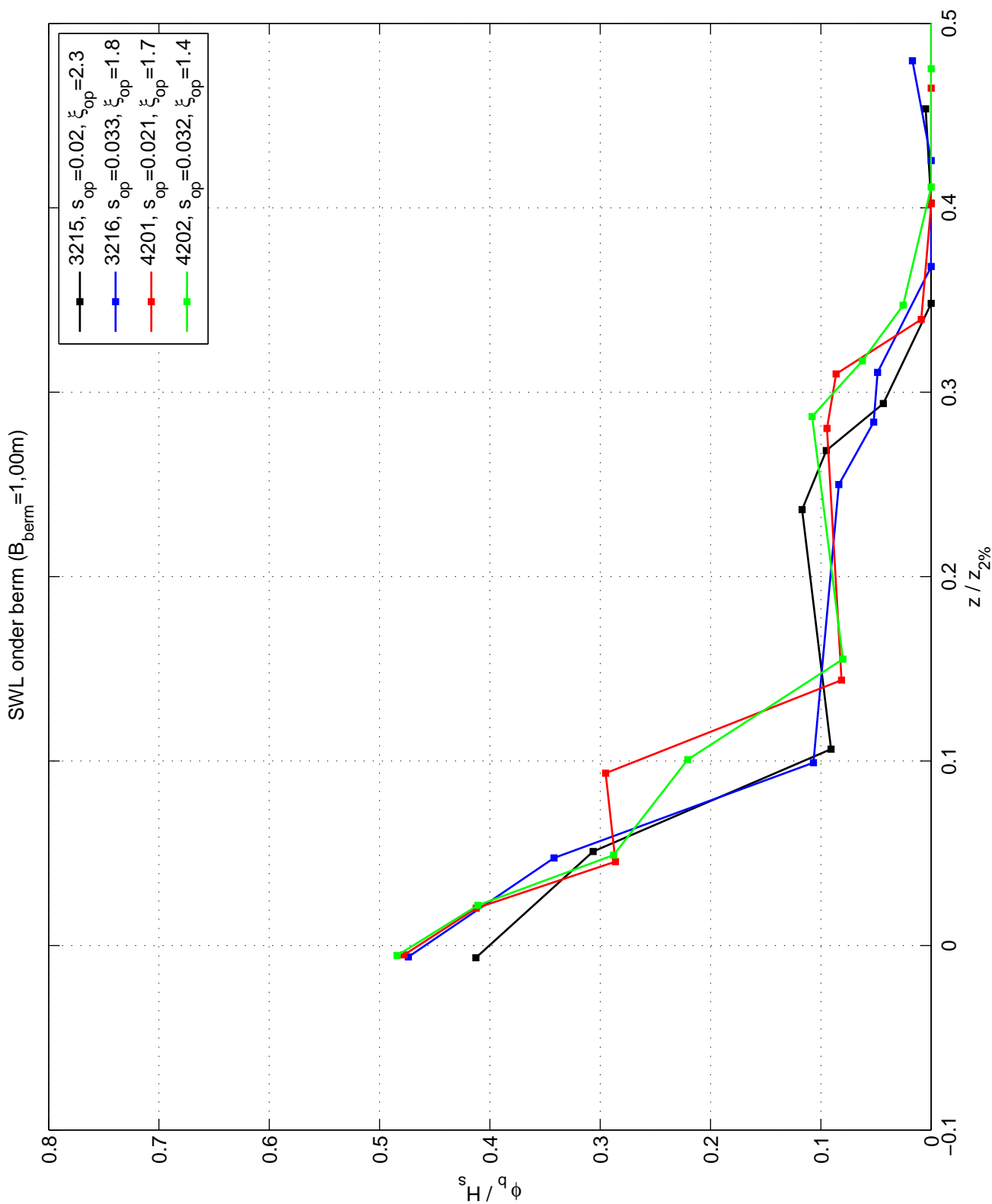
Resultaten: SWL onder berm ($B_{\text{berm}}=0,40\text{m}$)
 ϕ_b/H_s (-) uitgetzet tegen $z/z_{2\%}$ (-)



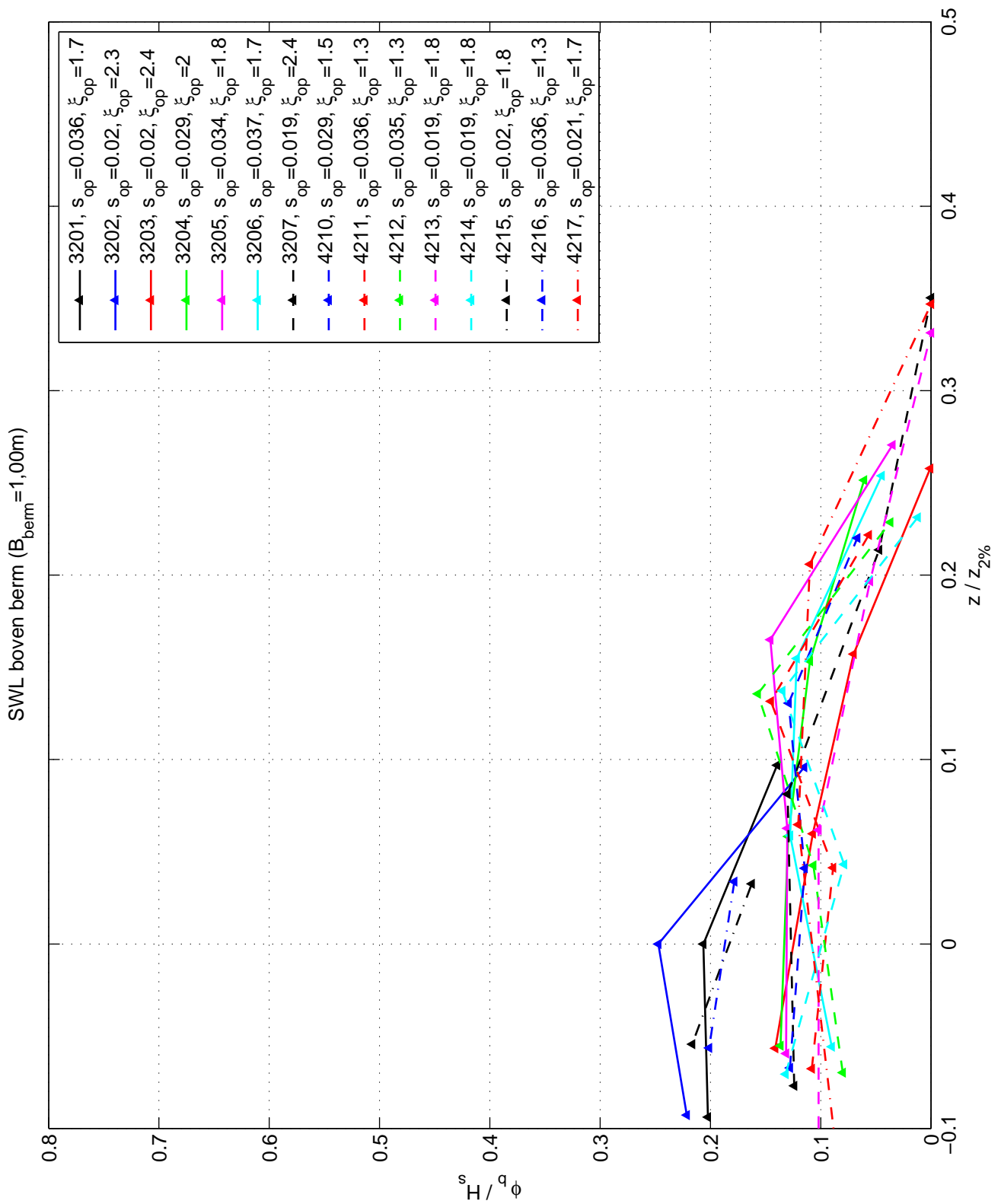
Resultaten: SWL boven berm ($B_{\text{berm}}=0,40\text{m}$)
 ϕ_b / H_s (-) uitgezet tegen $z / z_{2\%}$ (-)



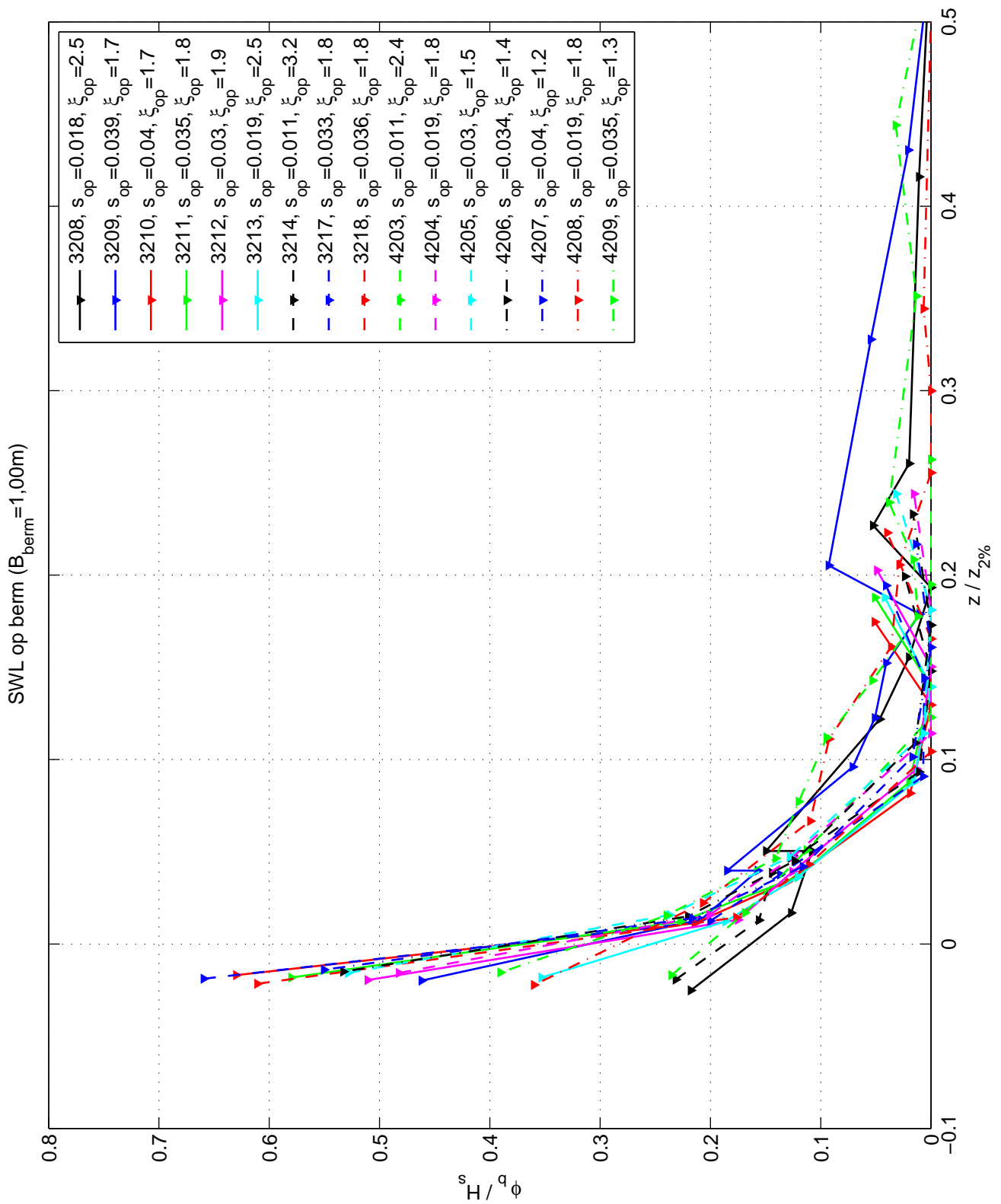
Resultaten: SWL op berm ($B_{\text{berm}}=0,40\text{m}$)
 ϕ_b / H_s (-) uitgezet tegen $z/z_{2\%}$ (-)



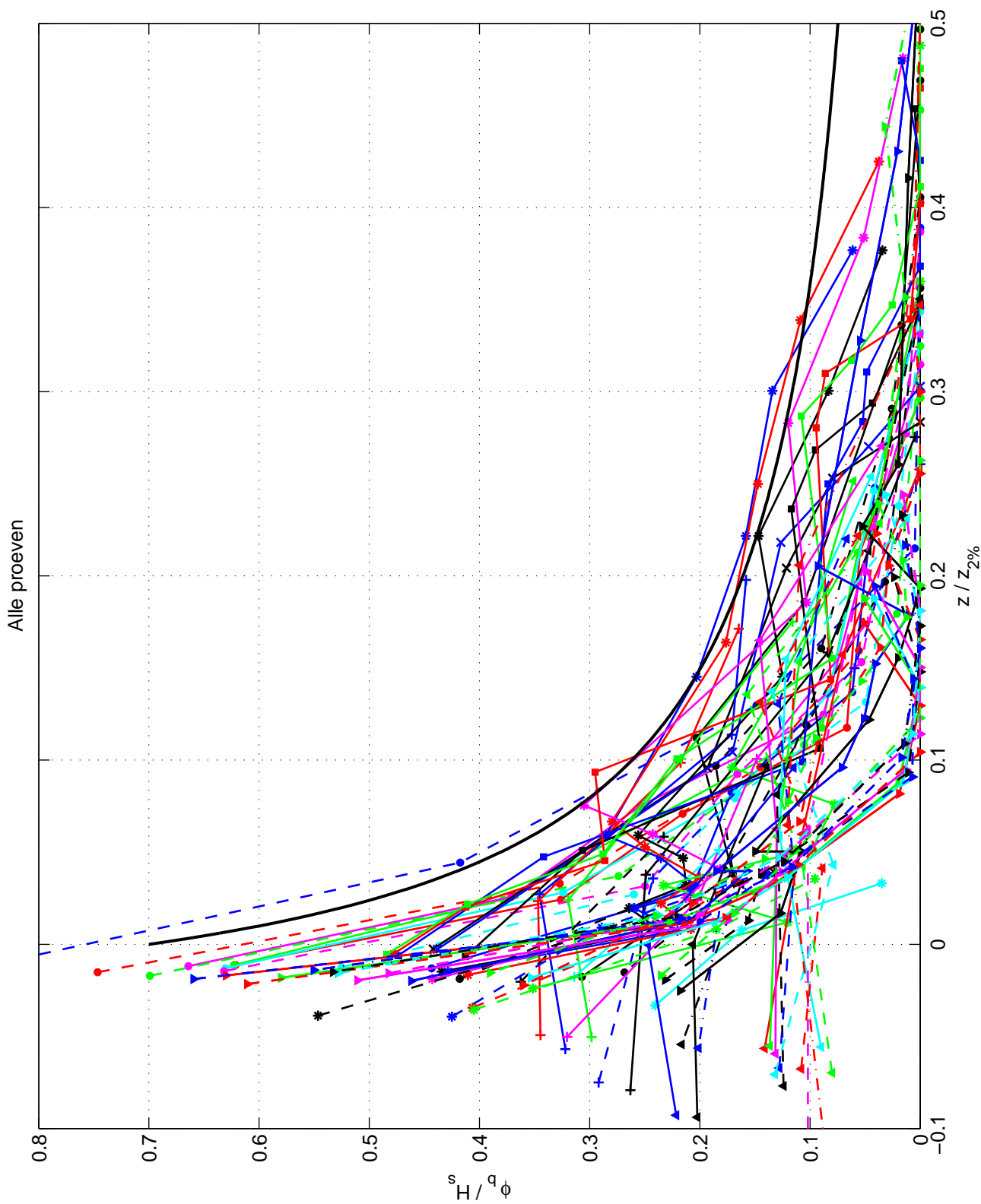
Resultaten: SWL onder berm ($B_{\text{berm}}=1,00\text{m}$)
 ϕ_b / H_s (-) uitgezet tegen $z / z_{2\%}$ (-)



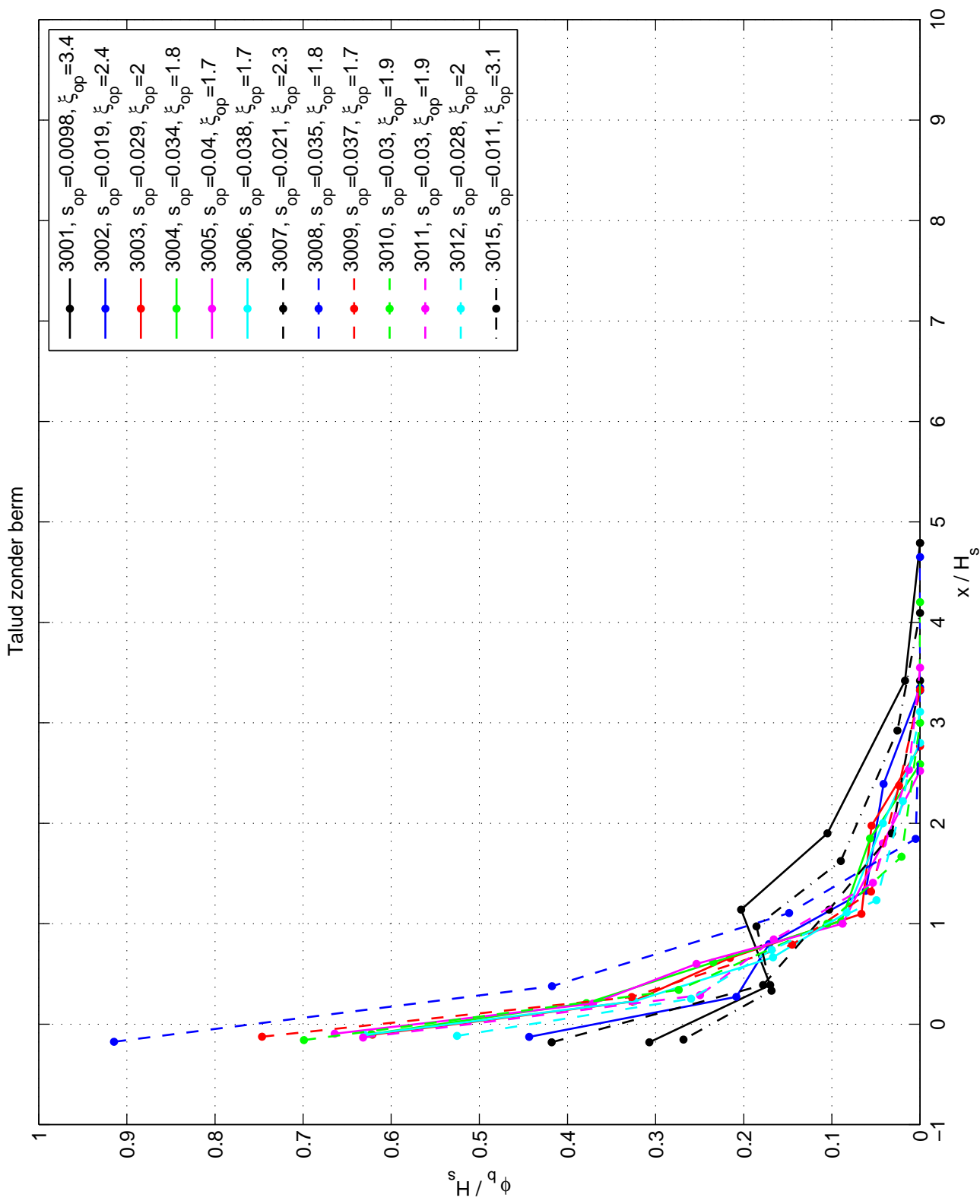
Resultaten: SWL boven berm ($B_{\text{berm}}=1,00\text{m}$)
 ϕ_b/H_s^3 (-) uitgezet tegen $z/z_{2\%}$ (-)



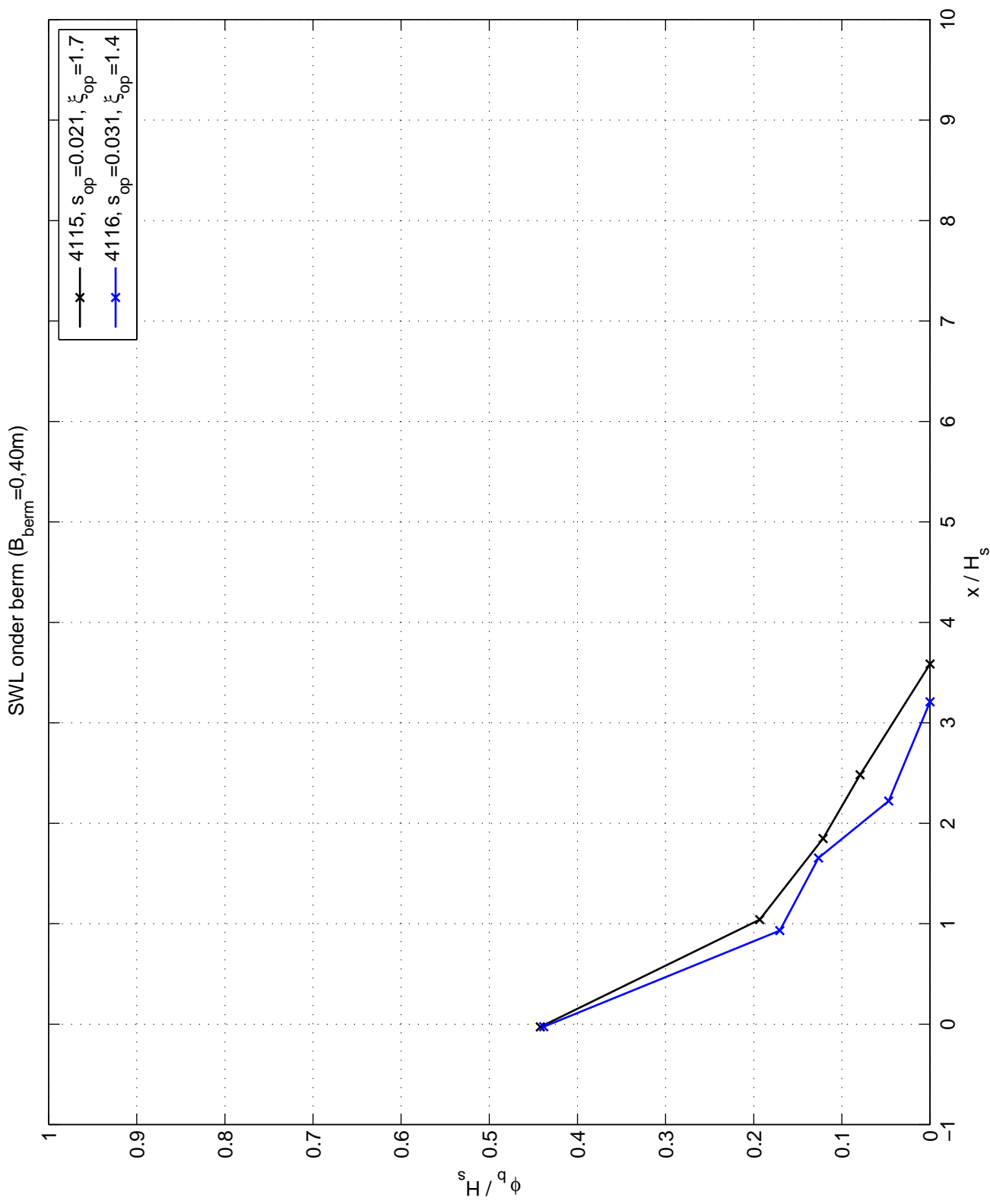
Resultaten: SWL op berm ($B_{\text{berm}}=1,00\text{m}$)
 ϕ_b / H_s (-) uitgezet tegen $z/z_{2\%}$ (-)



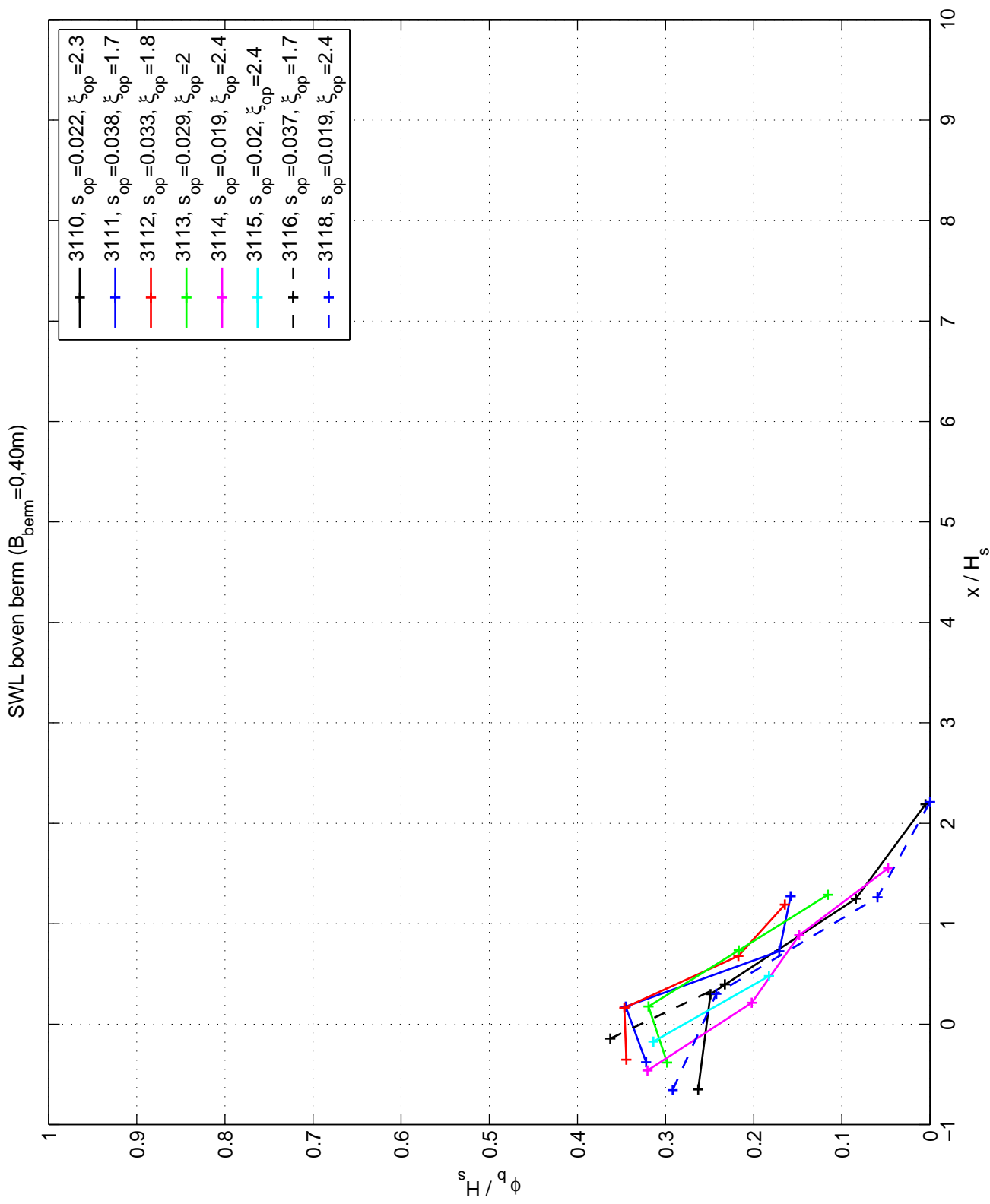
Resultaten: Alle proeven
 ϕ_b/H_s (-) uitgezet tegen $z/z_{2\%}$ (-)



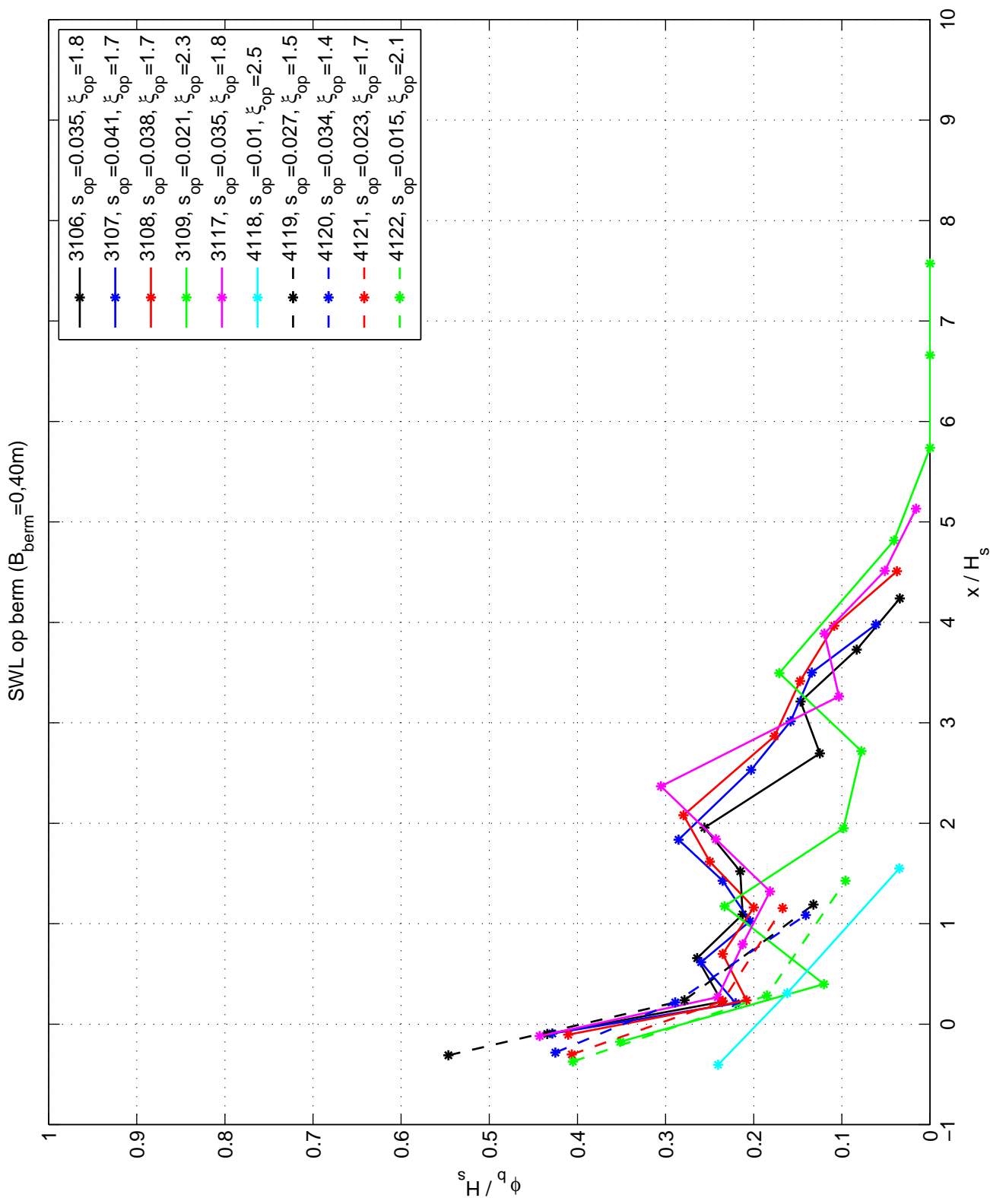
Resultaten: Talud zonder berm
 ϕ_p / H_s (-) uitgezet tegen x / H_s (-)



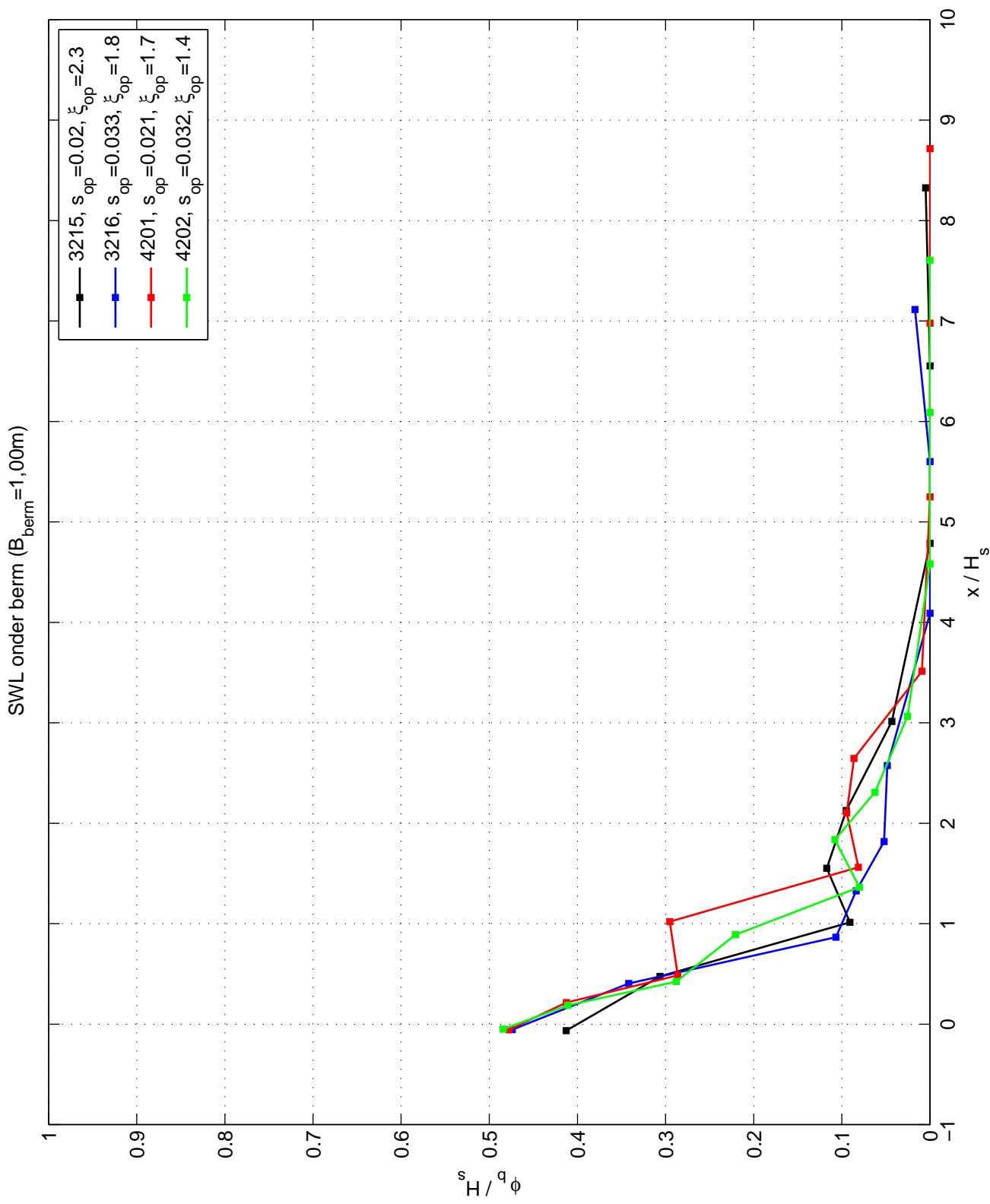
Resultaten: SWL onder berm ($B_{\text{berm}}=0,40\text{m}$)
 ϕ_b/H_s (-) uitgezet tegen x/H_s (-)



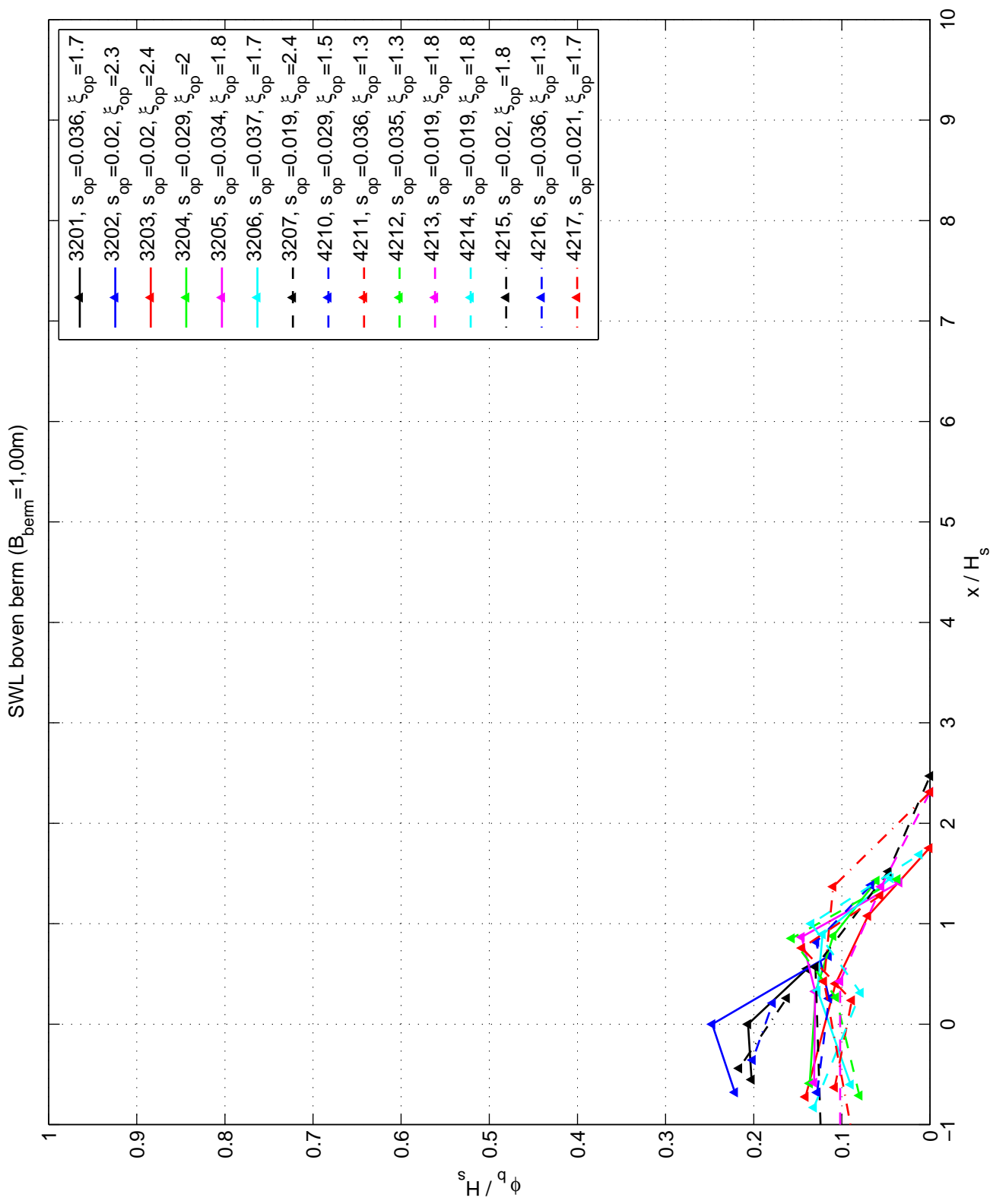
Resultaten: SWL boven berm ($B_{berm} = 0,40m$)
 ϕ_b/H_s (-) uitgezet tegen x/H_s (-)



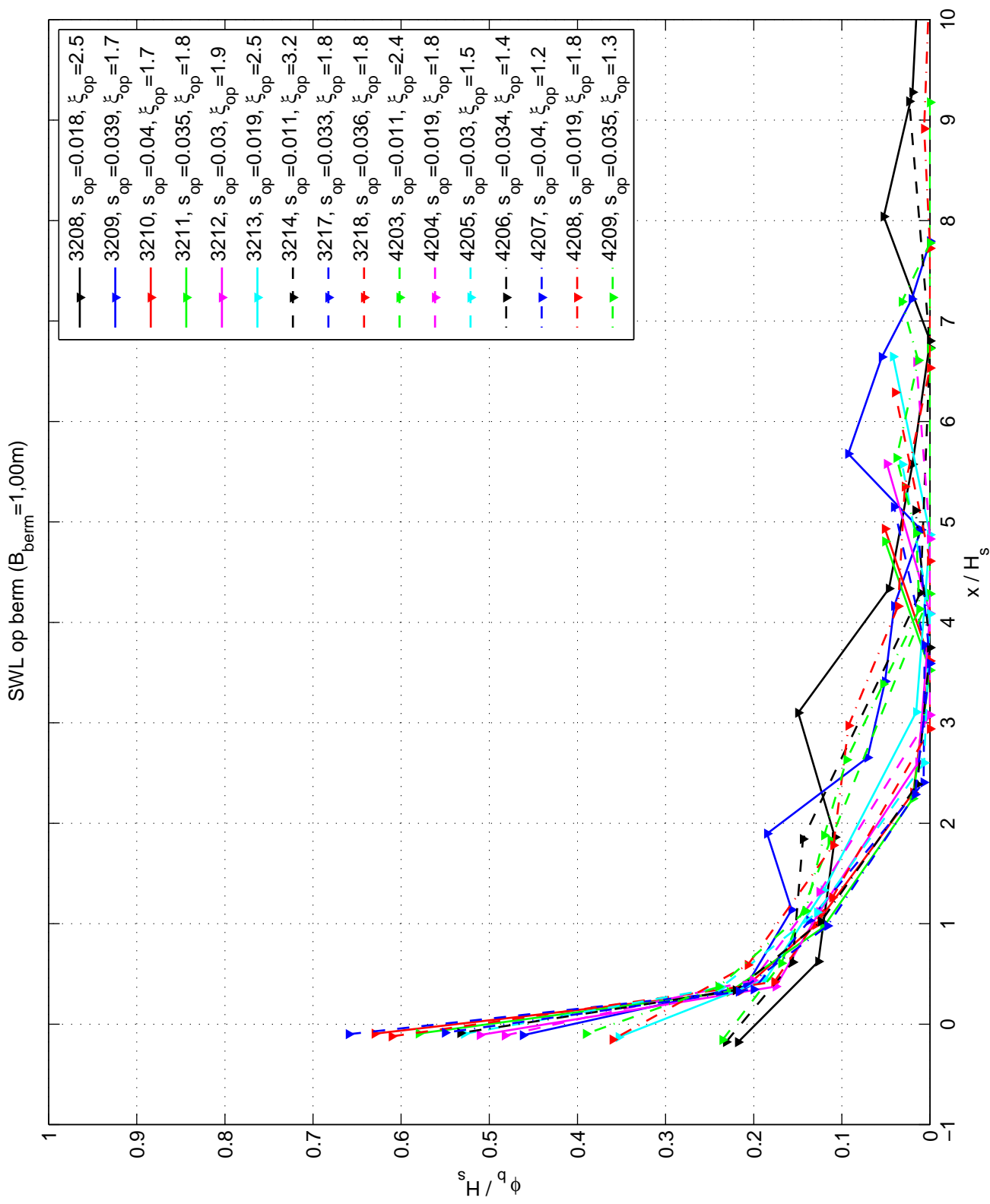
Resultaten: SWL op berm ($B_{\text{berm}}=0,40\text{m}$)
 ϕ_b/H_s (-) uitgezet tegen x/H_s (-)



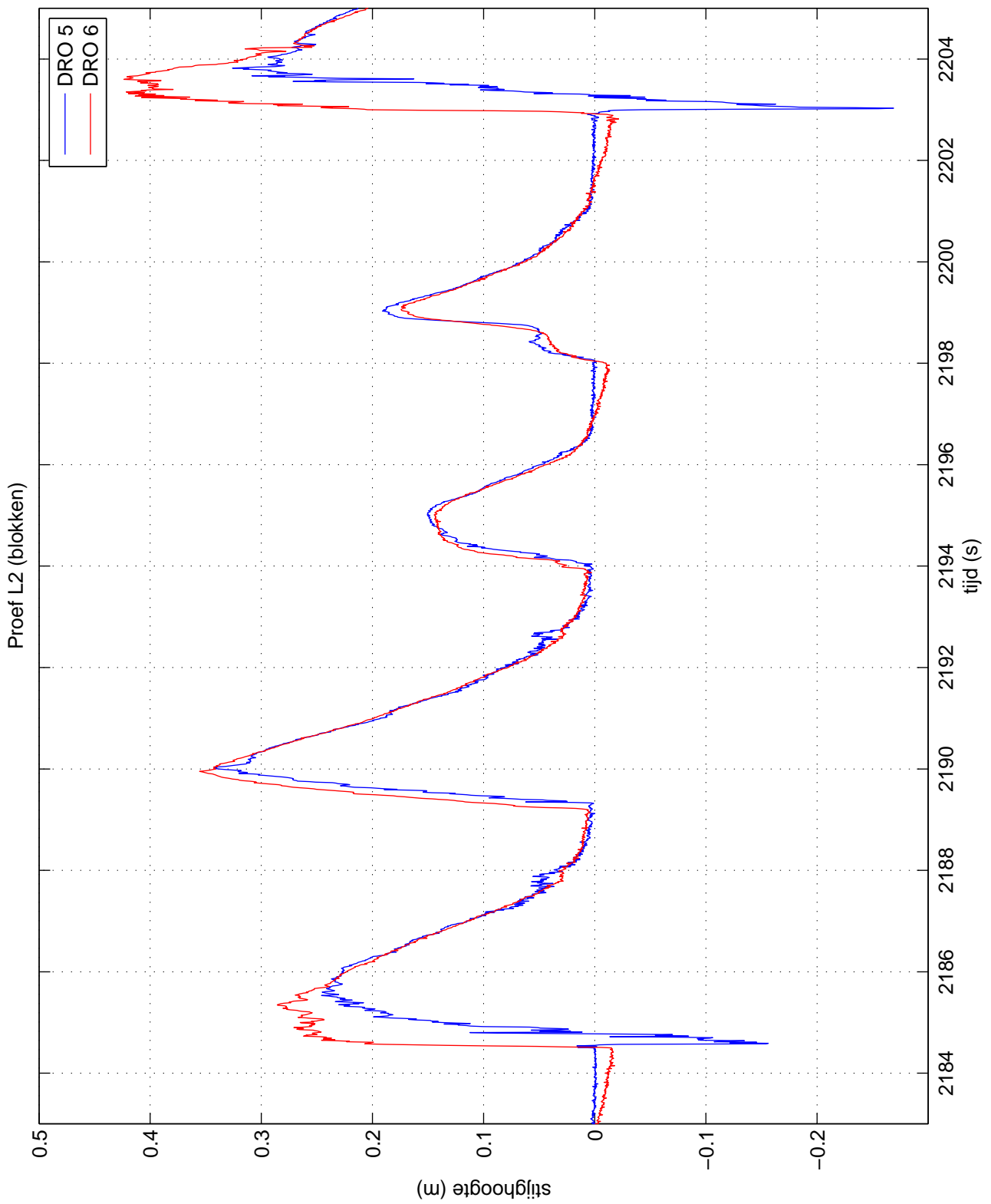
Resultaten: SWL onder berm ($B_{\text{berm}}=1,00\text{m}$)
 ϕ_b/H_s (-) uitgezet tegen x/H_s (-)



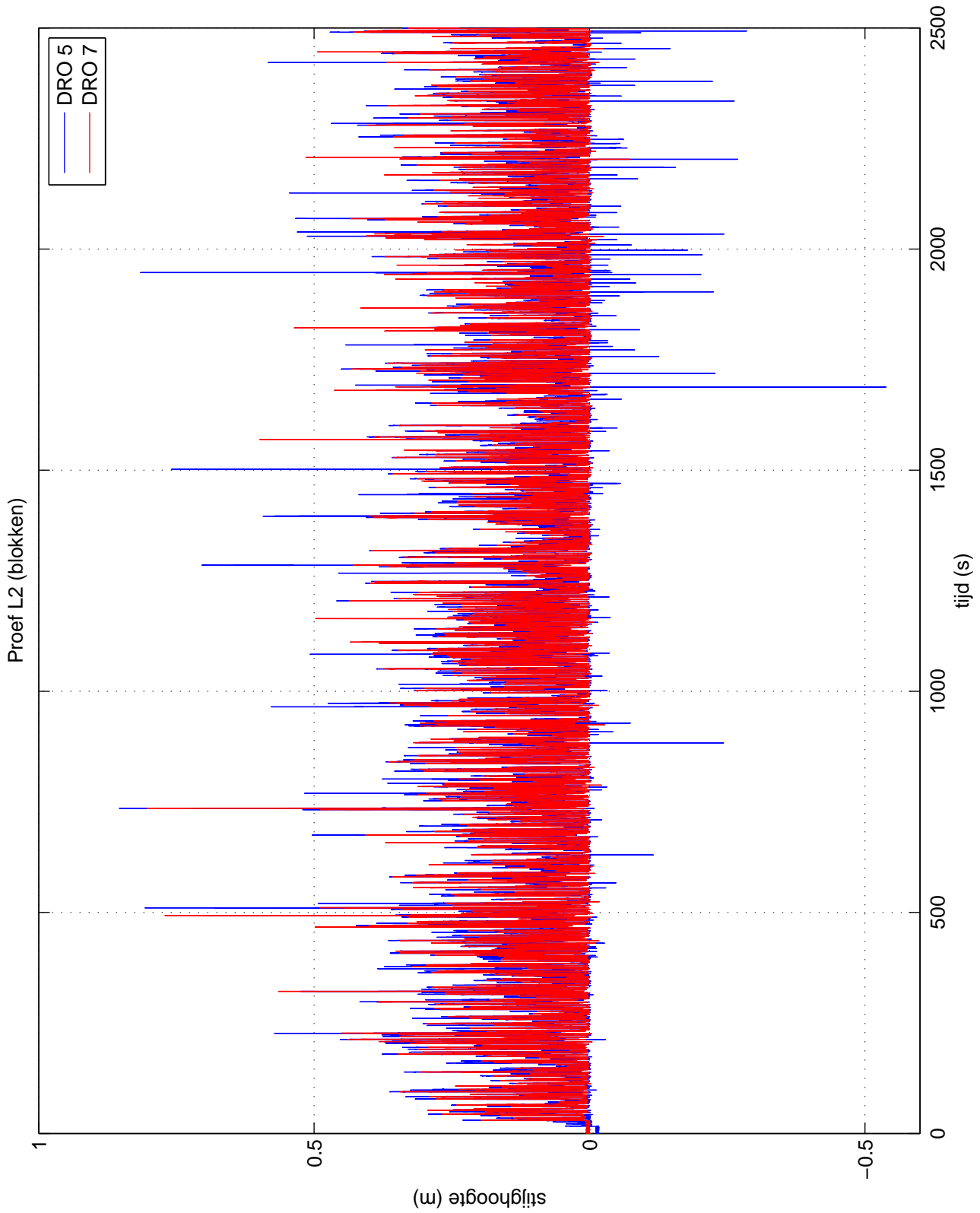
Resultaten: SWL boven berm ($B_{\text{berm}}=1,00\text{m}$)
 ϕ_b/H_s (-) uitgezet tegen x/H_s (-)



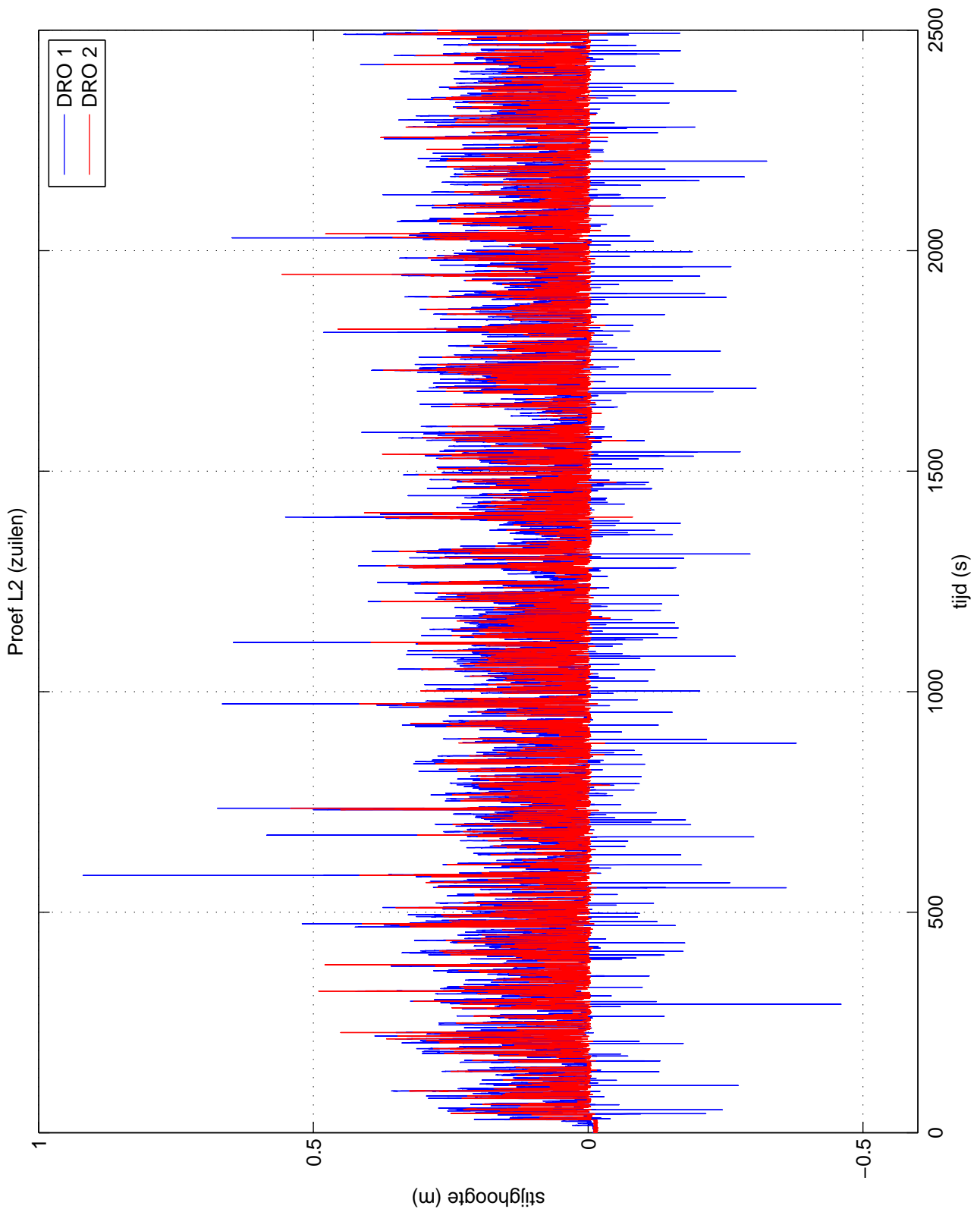
Resultaten: SWL op berm ($B_{\text{berm}}=1,00\text{m}$)
 ϕ_b/H_s (-) uitgezet tegen x/H_s (-)



Meetdata modelproeven Deltagoot (2009)
 stijghoogteverloop DRO 5 en 6 (Proef L2, testsectie blokken)

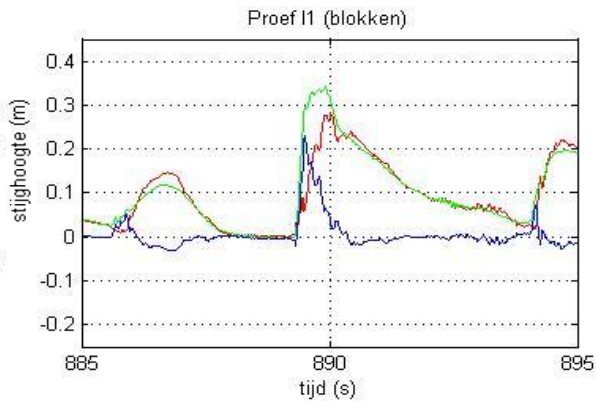


Meetdata modelproeven Deltagoot (2009)
 stijghoogtesignaal DRO 5 en 7 (Proef L2, testsectie blokken)

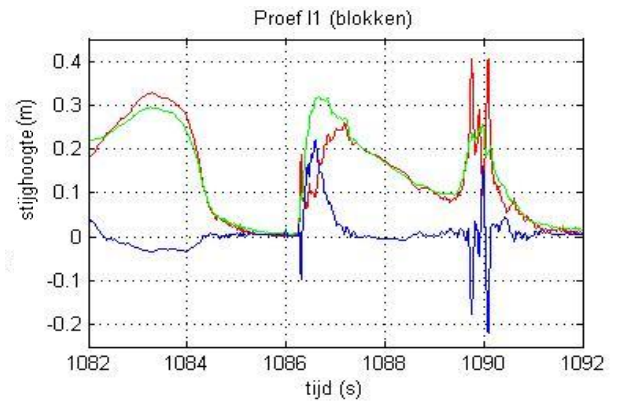


Meetdata modelproeven Deltagoot (2009)
 stijghoogtesignaal DRO 1 en 2 (Proef L2, testsectie zuilen)

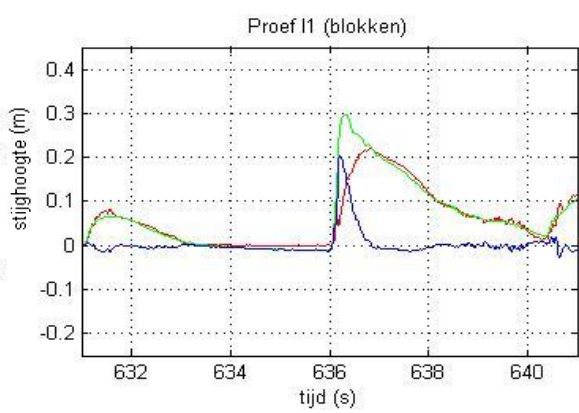
Golf 1



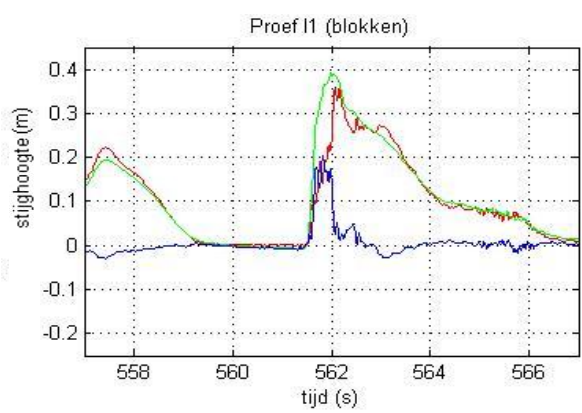
Golf 2



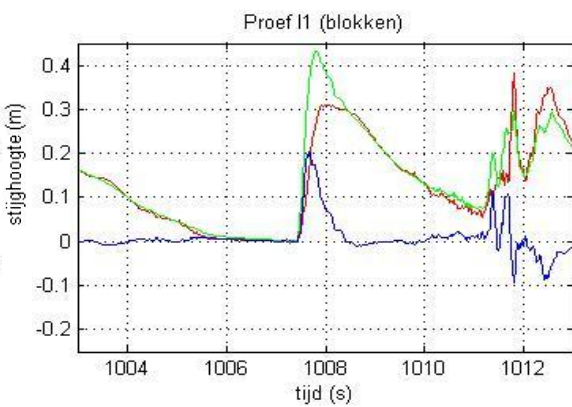
Golf 3



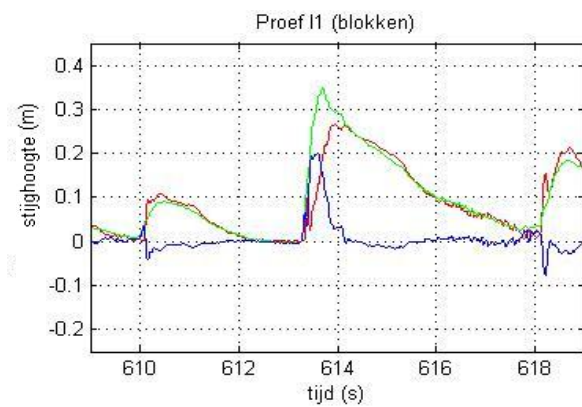
Golf 4



Golf 5



Golf 6



— stijghoogte toplaag (DRO 5)
— stijghoogte filter (DRO 6)
— stijghoogteverschil

Meetdata modelproeven Deltagoot (2009)
 Stijghoogteverloop DRO 5 en 6 (proef L1, testsectie blokken)

C Foto's

Foto C.1.1	Modelopstelling (overzicht testsecties)
Foto C.1.2	Modelopstelling (bovenaanzicht DRO's in testsectie blokken)
Foto C.2.1	Modelopstelling (bovenaanzicht DRO's in testsectie zuilen)
Foto C.2.2	Modelopstelling (detail bovenaanzicht DRO's in testsectie zuilen)
Foto C.3.1	Schade aan blok met DRO 5
Foto C.3.2	Metalen afdekstrip over blok met DRO 5
Foto C.4.1	Naderende golfklap met veel turbulentie rond kabels a.g.v. golfneerloop
Foto C.4.2	Golfoploop



Foto C.1.1: Modelopstelling (overzicht testsecties)

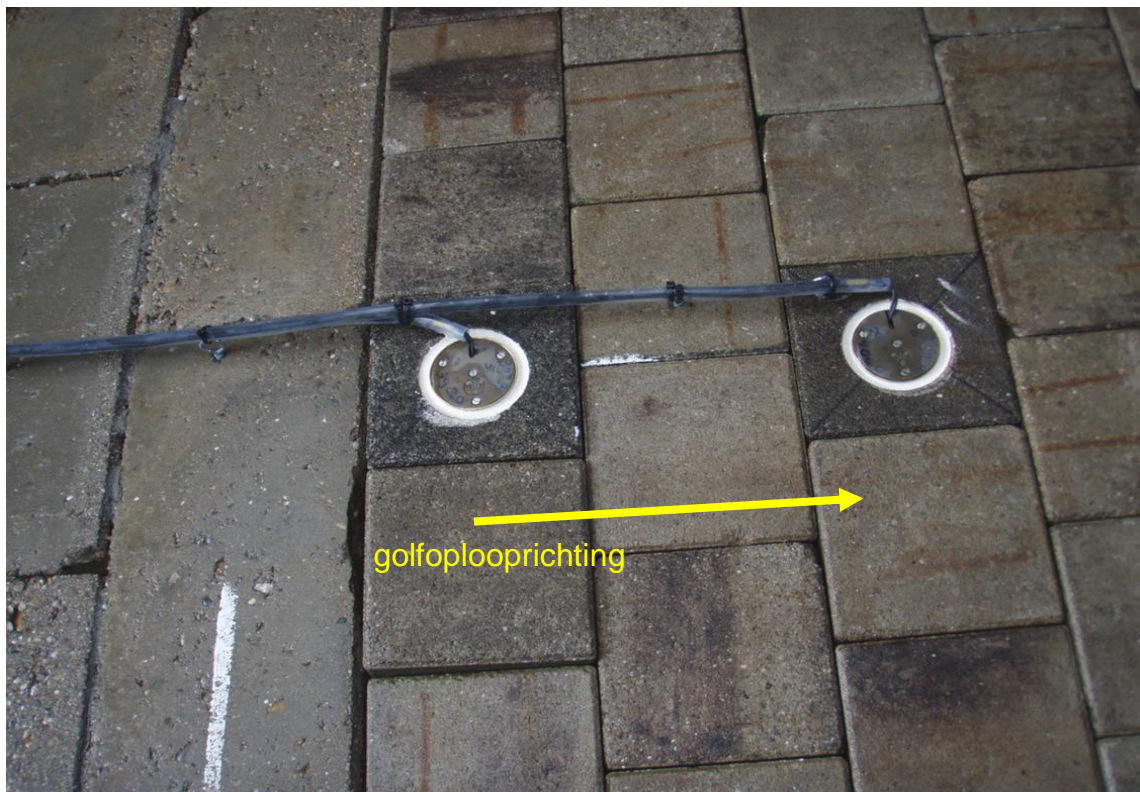


Foto C.1.2: Modelopstelling (bovenaanzicht DRO's in testsectie blokken)

Modelopstelling (overzicht testsecties)
 Modelopstelling (bovenaanzicht DRO's in testsectie blokken)

Foto C.1.1 en C.1.2

DELTARES

1202551-009

FIG C.1

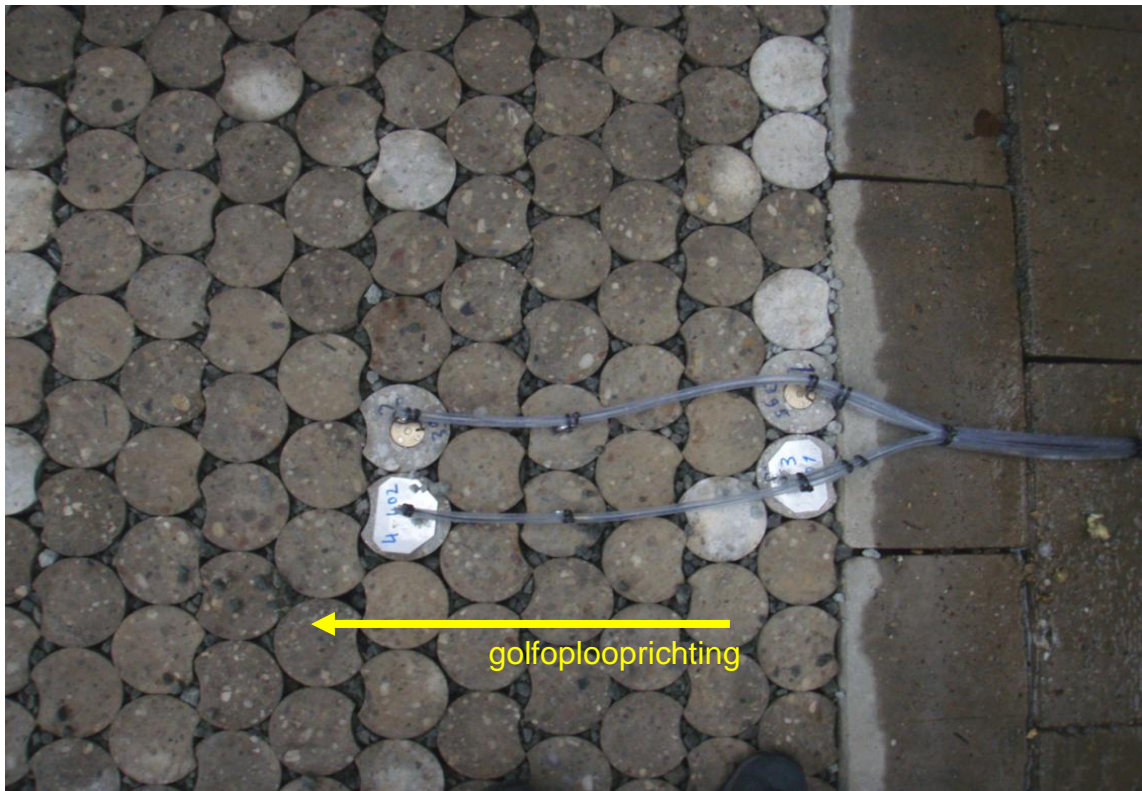


Foto C.2.1: Modelopstelling (bovenaanzicht DRO's in testsectie zuilen)

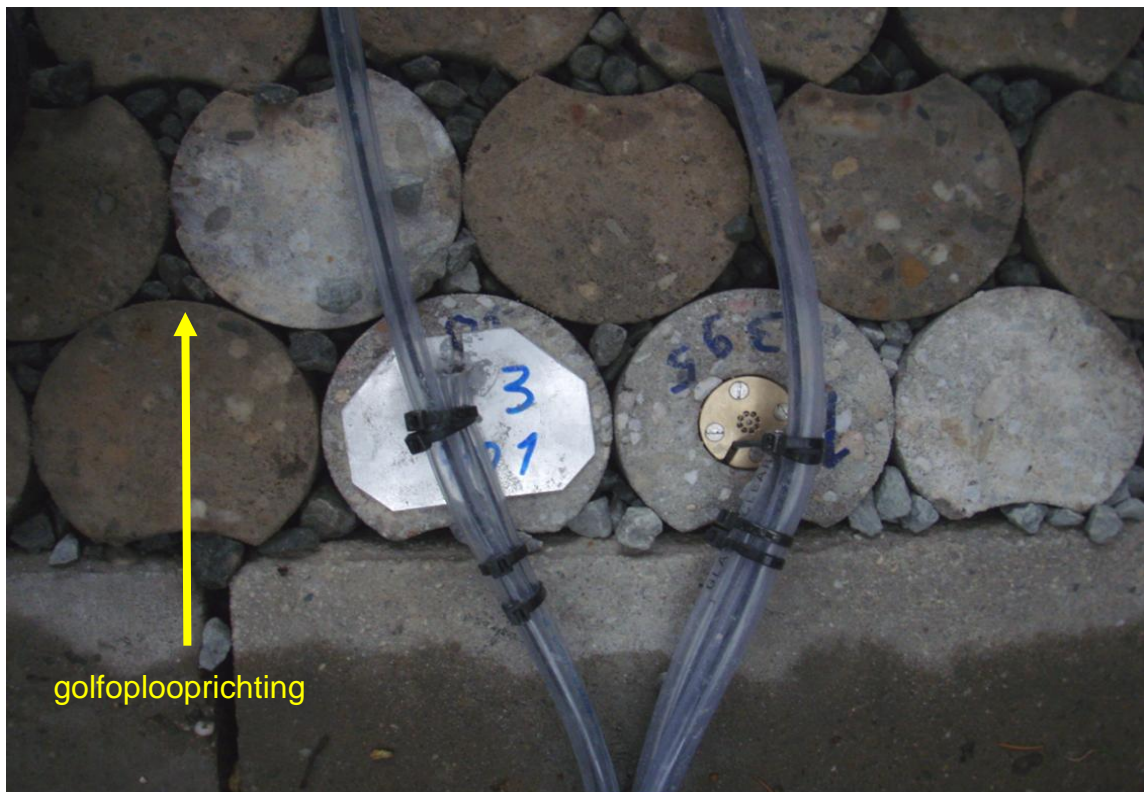


Foto C.2.2: Modelopstelling (detail bovenaanzicht DRO's in testsectie zuilen)

Modelopstelling (bovenaanzicht DRO's in testsectie zuilen)
 Modelopstelling (detail bovenaanzicht DRO's in testsectie zuilen)

Foto C.2.1 en C.2.2

DELTARES

1202551-009

FIG C.2

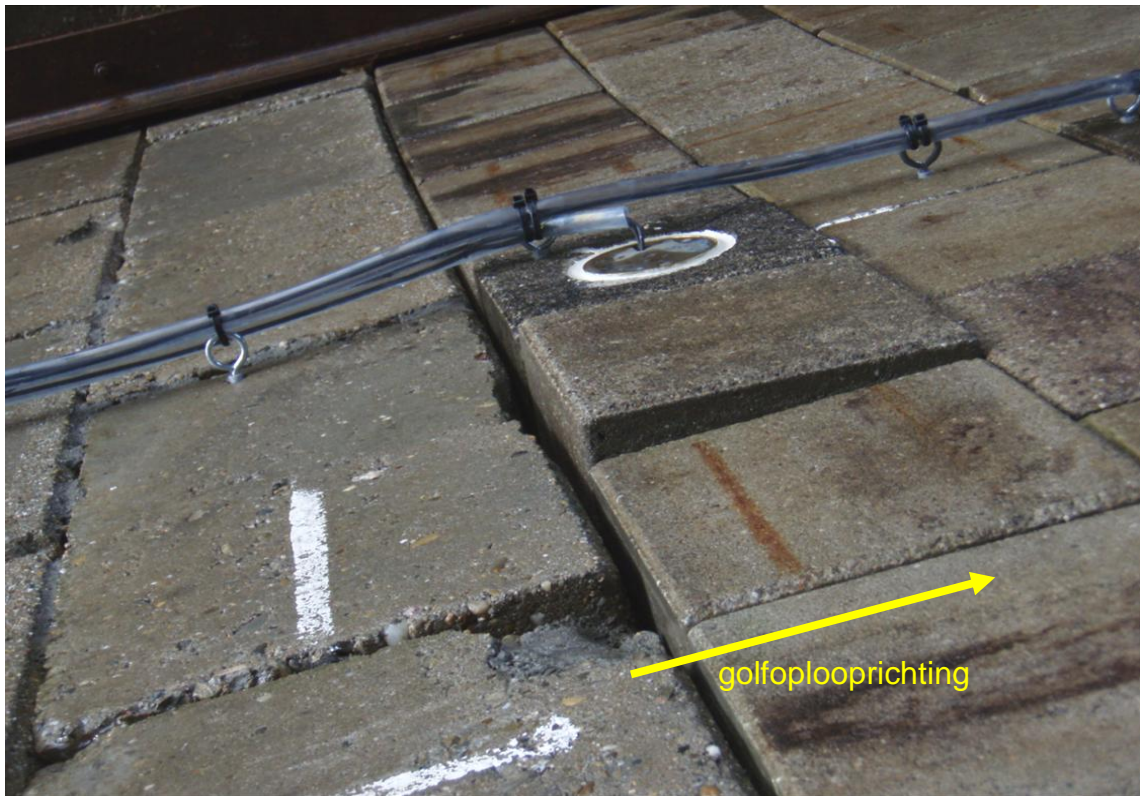


Foto C.3.1: Schade aan blok met DRO 5

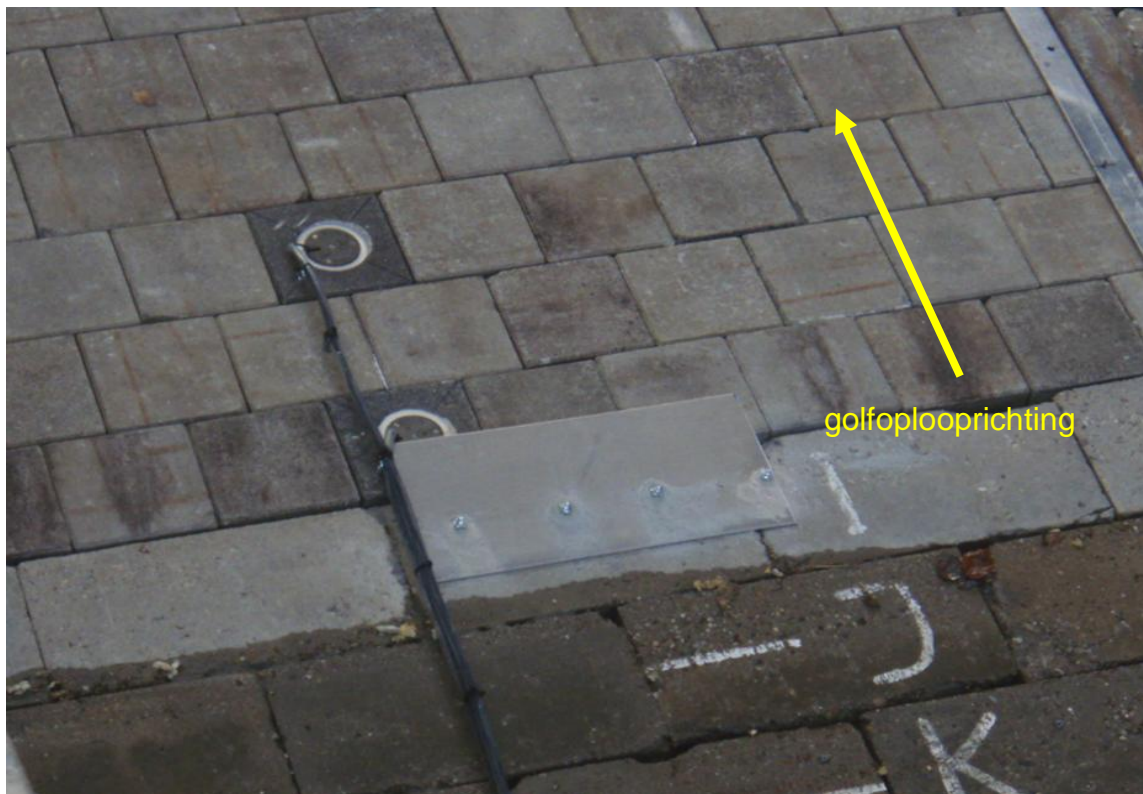


Foto C.3.2: Metalen afdekstrip voor blok met DRO 5

Schade aan blok met DRO 5
Metalen afdekstrip over blok met DRO 5

Foto C.3.1 en C.3.2

DELTARES

1202551-009

FIG C.3



Foto C.4.1: Naderende golfklap met veel turbulentie rond kabels a.g.v. golfneerloop



Foto C.4.2: Golfoploop

Naderende golfklap met veel turbulentie rond kabels a.g.v. golfneerloop
Golfoploop

Foto C.4.1 en C.4.2

DELTARES

1202551-009

FIG C.4