Deltares

Enabling Delta Life

Stabiliteit van RONA®ton steenzetting bij golfaanval

Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken



Deltares

Stabiliteit van RONA®ton steenzetting bij golfaanval

Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken

G.C. Mourik

1208618-011

© Deltares, 2016, B

Deltares

Titel
Stabiliteit van RONA®ton steenzetting bij golfaanval

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat WVL Altena Infra-materialen	1208618-011	1208618-011-HYE-0007	40

Trefwoorden
Steenzetting, RONA®ton, dijken, zetsteen, stabiliteit

Samenvatting
Het “Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken” is aan Deltares opgedragen door Rijkswaterstaat WVL, namens het Projectbureau Zeeweringen, het Project Afsluitdijk, het Corporate innovatieprogramma van RWS, de drie noordelijke waterschappen (Wetterskip Fryslân, Waterschap Noorderzijlvest en Waterschap Hunze en Aa’s, in het kader van een Projectoverstijgende Verkenning Waddenzeedijken van HWBP) en meerdere marktpartijen. Het doel van het onderzoek is het vaststellen van de stabiliteit bij golfaanval van een aantal moderne type steenzettingen voor toepassing op primaire waterkeringen in Nederland. Daarnaast wordt van enkele type steenzettingen ook de golfoploopremmende werking gemeten.

Het deel van het onderzoek dat in dit rapport wordt beschreven, betreft de stabiliteit van zetstenen van het type RONA®ton, waarvoor Altena Infra-materialen als marktpartij in het onderzoek participeert.
Dit rapport beschrijft de proeven met RONA®ton, die zijn gericht op het bepalen van de stabiliteit in golfaanval. Tegelijkertijd zijn golfoploopmetingen uitgevoerd, die als vergelijking kunnen dienen bij het bepalen van de golfoploopreducerende werking van andere typen steenzettingen.

Om de stabiliteit bij golfaanval van RONA®ton te bepalen is er grootschalig onderzoek uitgevoerd in de Deltagoot van Deltares. De schaal van dit onderzoek was 1:2. Alle maten die in dit rapport zijn gerapporteerd, betreffen de waarden op modelschaal, dus zoals ze aanwezig waren in de Deltagoot, tenzij nadrukkelijk anders is vermeld. De beproefde steenzetting had een toplaagdikte van circa 14,5 cm. Onder de RONA®ton was een filterlaag aangebracht van steenslag met daaronder geotextiel.

De steenzetting is beproefd met drie proevenseries:
- De eerste twee series bestonden uit korteduurproeven. Per serie met korteduurproeven werd de brekerparameter gelijk gehouden. De eerste serie werd uitgevoerd met een kleine golfsteilheid (lange golven), de tweede serie met een grote golfsteilheid (korte golven). De golfhoogte is na elke proef (circa 1000 golven) verhoogd totdat schade optrad, of totdat de maximaal op te wekken golfhoogte was bereikt.
- Tijdens de derde serie is een langeduurproef uitgevoerd. Deze proef, met gelijkblijvende golfcondities, is voortgezet totdat schade ontstond.

De op basis van de onderhavige proeven afgeleide stabiliteitsfactor voor RONA®ton is:
f_{stab} = 1,19. Deze factor is opgenomen in Steentoets2015.

Deltares

Titel
Stabiliteit van RONA®ton steenzetting bij golfaanval

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat WVL Altena Infra-materialen	1208618-011	1208618-011-HYE-0007	40

Referenties
Rijkswaterstaat: Opdracht voor het project "Vergelijkend Onderzoek Zetsteen", zaak 31087167, 29 november 2013.

Altena Infra-materialen: Akkoord voor offerte voor het project “Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken”, kenmerk, 1208618-006-HYE-0006, 28 januari 2014.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	sept. 2014	G.C. Mourik		M. Klein Breteler		M.R.A. van Gent	
1.1	feb. 2015	G.C. Mourik		M. Klein Breteler		M.R.A. van Gent	
1.2	mrt. 2015	G.C. Mourik		M. Klein Breteler		W.M.K. Tilmans	
2.0	okt. 2015	G.C. Mourik		M. Klein Breteler		M.R.A. van Gent	
3.0	mrt. 2016	G.C. Mourik		M. Klein Breteler		M.R.A. van Gent	

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding **1**
1.1 Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken 1
1.2 Steenzetting van RONA®ton (Altena Infra-materialen) 2
1.3 Opzet van het rapport 4

2 Schaling **5**
2.1 Faciliteit 5
2.2 Schaling 5
2.2.1 Algemeen 5
2.2.2 Schaling hydraulische randvoorwaarden 6
2.2.3 Schaling dimensieloze parameters 6
2.2.4 Schaling van stroming in de constructie 7

3 Modelopstelling en proevenprogramma **9**
3.1 Modelopstelling 9
3.1.1 Algemeen 9
3.1.2 Filterlaag 10
3.1.3 RONA®ton 11
3.1.4 Inwasmateriaal 14
3.1.5 Afwerking van de modelranden en aanbrengen markering 15
3.2 Metingen 15
3.2.1 Golfcondities 16
3.2.2 Profielmetingen 16
3.2.3 Uitspoeling inwasmateriaal 17
3.2.4 Golfoploopmetingen 17
3.3 Proevenprogramma 18

4 Proefresultaten en observaties **21**
4.1 Indeling in schadecategorieën 21
4.2 Serie 1: korteduurproeven, s_{op} = 0,02 (proeven P01 – P07A) 22
4.3 Serie 2: korteduurproeven, s_{op} = 0,04 (proeven P08 – P10) 25
4.4 Serie 3: langeduurproeven, s_{op} = 0,04 (proeven P11 – P13) 27

5 Analyse van de proefresultaten **29**
5.1 Uitspoeling van het inwasmateriaal 29
5.2 Stabiliteit van de steenzetting 31
5.3 Stabiliteitsfactor 34

6 Conclusies **37**

7 Referenties **39**

Bijlage(n)

A Tabellen **A-1**

B Figuren **B-1**

C Foto's **C-1**

D Procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor **D-1**
D.1 Inleiding D-1
D.2 Interpretatie van de proeven D-1
D.3 Bepaling stabiliteitsfactor D-2

1 Inleiding

1.1 Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken

Dit rapport beschrijft de proeven met RONA®ton, die zijn gericht op het bepalen van de stabiliteit in golfaanval. Tegelijkertijd zijn golfoploopmetingen uitgevoerd, die als vergelijking kunnen dienen bij het bepalen van de golfoploopreducerende werking van andere typen steenzettingen.

In het kader van het “Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken” onderzoeken Rijkswaterstaat, drie noordelijke waterschappen (in Project Overstijgende Verkenning Waddenzeedijken van het Hoogwaterbeschermingsprogramma HWBP) en enkele marktpartijen of zetstenen slimmer ingezet kunnen worden bij dijkversterkingen. Er zijn verschillende soorten zetstenen op de markt, waarvan uit eerder onderzoek al is gebleken dat ze voldoen aan alle (veiligheids)eisen. Doordat de zetstenen verschillen in vorm, hebben ze ieder specifieke kwaliteiten. Ze zijn bijvoorbeeld extra stabiel of remmen de golfoploop goed. Er is echter nog te weinig kennis over hun unieke eigenschappen om de stenen optimaal te kunnen benutten en te vergelijken. Daarom is Deltares gevraagd dit te onderzoeken.
Het onderzoek richt zich op twee eigenschappen van zetstenen: voor alle typen zetstenen wordt de stabiliteit bij hoge golven onderzocht en voor enkele typen wordt ook de golfoplooppremming onderzocht. Deltares onderzoekt deze eigenschappen op basis van grootschalige proeven in de Deltagoot. De zetstenen zijn daarvoor op schaal 1:2 getest.



Figuur 1.1 Golfaanval op RONA®ton in de Deltagoot (tijdens proef P10).

In de nabije toekomst wil Rijkswaterstaat het mogelijk maken om het onderscheid tussen de typen steenzettingen tot uiting te laten komen in het rekenmodel Steentoets. Daarvoor wordt een specifieke stabiliteitsfactor geïntroduceerd die voor elk type steenzetting verschillend is. Deze stabiliteitsfactor is afhankelijk van de prestaties van de steenzetting bij zware golfaanval in een grootschalige onderzoeksfaciliteit, ten opzichte van de verwachtingen op grond van berekeningen met Steentoets (met stabiliteitsfactor = 1). Naarmate de steenzetting beter presteert ten opzichte van Steentoets, krijgt het een hogere stabiliteitsfactor toebedeeld. Die stabiliteitsfactor wordt vervolgens gebruikt om het resultaat van Steentoets aan te passen, zodat de hiermee berekende stabiliteit beter overeenkomt met de gemeten stabiliteit.

Deze stabiliteitsfactor is de verhouding tussen de benodigde toplaagdikte die volgt uit de resultaten van het experimentele onderzoek en de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets (met stabiliteitsfactor = 1), rekening houdend met een veiligheidsmarge.

De stabiliteitsfactor kan niet gebaseerd worden op kleinschalige modelproeven (kleiner dan schaal 1:3), omdat bij steenzettingen sprake is van strijdige schaalregels. De stabiliteit op kleine schaal kan daardoor niet goed omgerekend worden naar de overeenkomstige stabiliteit op grote schaal. Daarom zijn de huidige proeven op grote schaal (schaal 1:2 ten opzichte van de werkelijkheid) uitgevoerd. De Deltagoot is bij uitstek geschikt om de stabiliteit van steenzettingen te beproeven, omdat hierin een dijk op bijna prototype-schaal kan worden ingebouwd en belast kan worden door grote golven. Door de grootte van deze golfgoot zijn er geen ongewenste schaaleffecten te verwachten.

Het onderzoek is in mei - juli 2014 uitgevoerd onder leiding van M. Klein Breteler en G.C. Mourik.

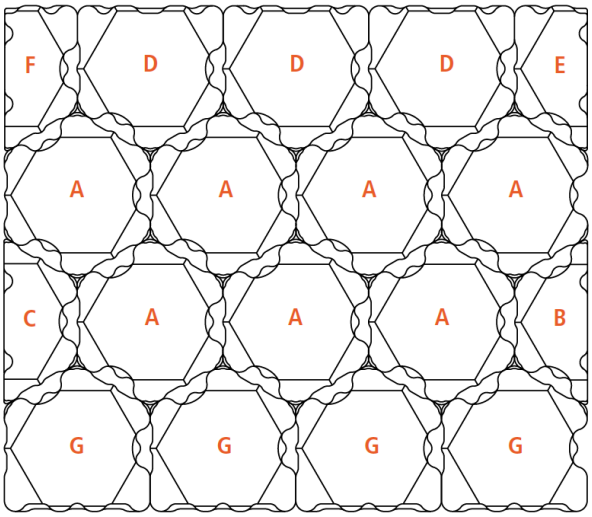
1.2 Steenzetting van RONA®ton (Altena Infra-materialen)

In dit derde deel van het vergelijkende steenzettingonderzoek is een steenzetting van het type RONA®ton (van Altena Infra-materialen) onderzocht. RONA®ton is een type steenzetting van beton, dat op een filterlaag wordt toegepast om dijken en oevers te beschermen tegen golfaanval en stromingsbelasting.

Voor de Deltagootproeven is gebruikgemaakt van zogenoemde machinale RONA®ton pakketten, zie Figuur 1.2. Deze pakketten hebben in werkelijkheid een oppervlakte van 1,0 x 1,2 m^2 en kunnen machinaal geplaatst worden. In de Deltagoot zijn de verschaalde pakketten, met een oppervlakte van circa 0,5 x 0,6 m^2, handmatig in het juiste patroon geplaatst. Een machinaal pakket bestaat uit 18 zuilen van 7 verschillende typen, zie Figuur 1.3.



Figuur 1.2 Een steenzetting van machinale RONA®ton pakketten op een dijk.



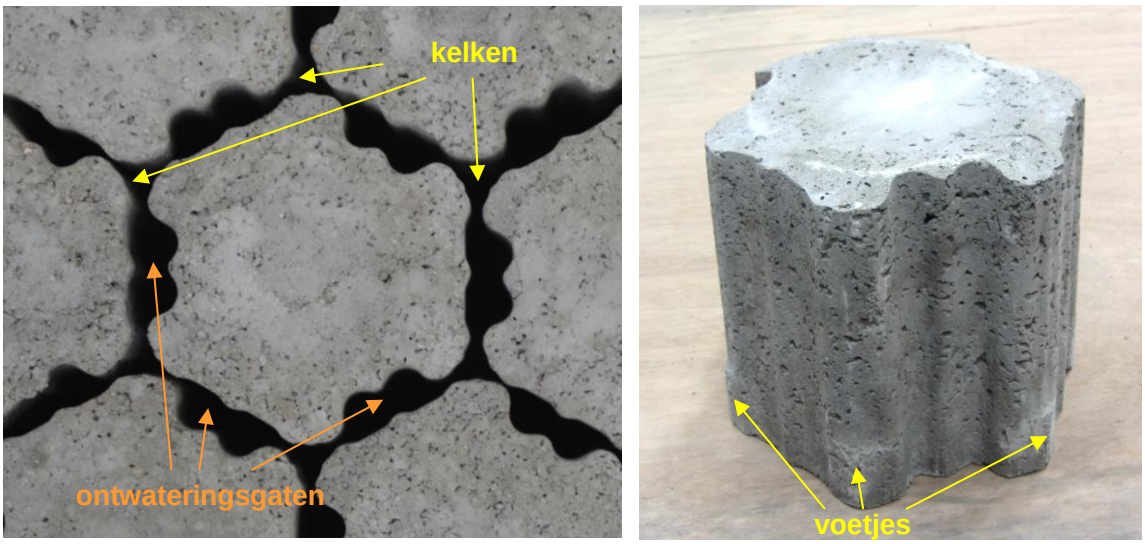
Samenstelling laag

A	standaard zuilen	7	stuks
B	paszuil Rechts	1	stuk
C	paszuil Links	1	stuk
D	bovenzuilen	3	stuks
E	Boven hoekzuil R	1	stuk
F	Boven hoekzuil L	1	stuk
G	Onderzuilen zuilen	4	stuks

Figuur 1.3 De samenstelling van een machinaal RONA®ton pakket.

Ten aanzien van de gaten tussen de zuilen wordt bij RONA®ton onderscheid gemaakt tussen ‘kelken’ (op de hoekpunten van de zuilen) en ‘ontwateringsgaten’ (langs de zijden van de zeshoekige zuilen), zie Figuur 1.4. De figuur toont ook de zijkant van een standaard RONA®ton zuil.
De ontwateringsgaten hebben als voornaamste functie water door de toplaag door te laten, in de richting loodrecht op het talud. De ontwateringsgaten hebben van de boven- tot de onderkant van de zuilen dezelfde vorm.
De kelken hebben daarentegen vooral als functie inwasmateriaal vast te houden en klemming tussen de zuilen te genereren. De hoeken van de zeshoekige zuilen worden naar beneden toe stapsgewijs iets breder en hebben onderaan een klein voetje. De kelken worden daardoor naar beneden toe stapsgewijs iets smaller, waardoor inwasmateriaal zich kan vastwiggen en naar verwachting moeilijk zal uitspoelen. Of het inwasmateriaal inderdaad minder makkelijk uitspoelt uit de kelken is tijdens de proeven onderzocht (zie paragraaf 5.1).

Verder zijn gemeten afmetingen, zoals van de tapsheid, in paragraaf 3.1.3 gegeven.



Figuur 1.4 Links: bovenaanzicht van een standaard RONA®ton zuil met de aanduiding van de kelken en ontwateringsgaten. Rechts: zijaanzicht van een zuil met de aanduiding van de voetjes aan de zuil.

1.3 Opzet van het rapport

Het onderhavige rapport beschrijft in hoofdstuk 2 de gebruikte golffaciliteit en de daaruit resulterende modelschaling. Hoofdstuk 3 beschrijft de modelopstelling en het proeven-programma. Hoofdstuk 4 beschrijft de proefresultaten en observaties. In hoofdstuk 5 worden de resultaten geanalyseerd, waarna in hoofdstuk 6 de conclusies zijn gegeven.

2 Schaling

Het onderhavige hoofdstuk beschrijft de gebruikte golffaciliteit en de daaruit resulterende modelschaling. De beschrijving van de modelopstelling zelf is gegeven in hoofdstuk 3.

2.1 Faciliteit

De proeven zijn uitgevoerd in de Deltagoot (Noordoostpolder) van Deltares. De Deltagoot heeft een lengte van 240 m, een breedte van 5 m en een diepte van 7 m. De gootwanden zijn lokaal nog verhoogd met 2,5 m hoge opzetstukken. De goot is voorzien van een golfschot waarmee zowel regelmatige als onregelmatige golven kunnen worden opgewekt. Tevens is het golfschot voorzien van een systeem dat gereflecteerde golven compenseert, zodat deze niet opnieuw bij het golfschot vandaan in de richting van de constructie reflecteren.

Afhankelijk van de waterdiepte en golfperiode kan het golfschot onregelmatige golven opwekken met een significante golfhoogte tot ongeveer H_s = 1,6 m. Met deze golfhoogte is het mogelijk de maximale golfcondities op beschutte locaties in estuaria en binnenwateren op volle schaal te reproduceren. Op veel plaatsen langs de Nederlandse kust zijn de maatgevende golven echter tot wel tweemaal zo hoog. Daarom is het onderhavige onderzoek uitgevoerd op schaal. Gekozen is voor een geometrische schaal van 1:2. Bij deze schaling komt de maximale significante golfhoogte die in de Deltagoot kan worden geproduceerd (H_s = 1,6 m) overeen met een significante golfhoogte in werkelijkheid van circa H_s = 3.2 m.

2.2 Schaling

2.2.1 Algemeen

Naarmate een modelopstelling kleiner is dan de werkelijkheid, wordt het moeilijker om proefresultaten te vertalen naar de werkelijkheid, vanwege strijdige schaalregels voor golven en voor stroming in het filter. Daarnaast is het in een kleinschalige modelopstelling moeilijk om de interactie tussen stenen goed weer te geven. Vanaf een schaal kleiner dan ongeveer 1:3 zijn proefresultaten met de huidige kennis niet meer voldoende nauwkeurig te vertalen, en bij een schaal van bijvoorbeeld 1:10 is het vooralsnog onmogelijk. Daarom wordt dit experimenteel onderzoek uitgevoerd op een zo groot mogelijke schaal, maar zodanig dat de maximale significante golfhoogte, die in de Deltagoot kan worden geproduceerd, na verschaling niet veel kleiner is dan de maximale significante golfhoogte in werkelijkheid. Er is gekozen voor een geometrische schaal van 1:2.

Een geometrische schaal van 1:2 houdt in dat de afmetingen van de zetstenen in de modelopstelling twee maal zo klein moeten zijn als in werkelijkheid. Dit geldt voor zowel verticale als horizontale afmetingen van de zetstenen (hoogte, lengte en breedte), met behoud van de vorm van de zetsteen. In vergelijking met proeven met RONA®ton in 2009 (Wolters, 2010) zijn in het onderhavige onderzoek de lengte en breedte van de RONA®ton zuilen dus wel verschaald in het model.
Voor het onderhavige onderzoek zijn RONA®ton zuilen als uitgangspunt genomen, die in werkelijkheid 30 cm hoog zijn. De zuilen zijn speciaal voor het onderzoek op schaal gemaakt door Altena Infra-materialen. Daarvoor zijn speciale mallen gemaakt, waarbij alle maten een

factor 2 kleiner zijn gekozen dan in werkelijkheid. Dit resulteerde in zuilen met een hoogte, die ongeveer de helft is van de werkelijke hoogte: de gemiddelde hoogte van de verschaalde zuilen is 14,5 cm.

In een schaalmodel met schaal 1:2 zijn ook de golven (golfhoogte en golflengte) twee maal zo klein als in werkelijkheid. De taludhelling is wel gelijk aan die in werkelijkheid, evenals de soortelijke massa van de zetstenen.

2.2.2 Schaling hydraulische randvoorwaarden

Bij het verschalen van steenzettingen dienen verschillende schaalregels in acht genomen te worden, voor zowel de stroming in de constructie (door en onder de toplaag) als voor de golven op het talud. Een nadeel is echter dat deze schaalregels strijdig met elkaar zijn.

Over het algemeen wordt voor het verschalen van waterbouwkundige constructies de zogenaamde Froude schaling toegepast. Deze schaling geldt voor processen waarin traagheid en zwaartekracht een dominante rol spelen, wat het geval is in dit model. De schaling schrijft voor dat het Froude getal in het schaalmodel hetzelfde is als in de werkelijke situatie. Het Froude getal wordt als volgt berekend:

$$Fr = \frac{u^2}{gL} \tag{2.1}$$

Met:
Fr = Froude getal (-)
u = snelheid (m/s)
g = versnelling van de zwaartekracht (m/s^2)
L = lengte (m)

In de onderhavige paragraaf is de schaling uitgewerkt voor een lengteschaal $n_L = L_{prototype} / L_{model} = 2$, zoals het geval is in het beproefde schaalmodel. Uit de bovenstaande Froude schaalregel zijn dan de volgende verbanden af te leiden:

- Tijdschaal (proefduur, golfperiode): $n_t = \sqrt{n_L}$, in dit geval dus: $n_t = \sqrt{2} \approx 1{,}41$
- Golfhoogte: $n_H = n_L$, in dit geval dus: $n_H = 2$
- Snelheid (voortplantingssnelheid van golven): $n_u = \sqrt{n_L}$, in dit geval dus: $n_u = \sqrt{2} \approx 1{,}41$

De Froude schaling is gebruikt om de hydraulische randvoorwaarden te bepalen.

2.2.3 Schaling dimensieloze parameters

Voor dimensieloze parameters geldt een schaal van 1:1. Voorbeelden daarvan zijn de taludhelling tanα en de relatieve soortelijke massa van de zetstenen Δ. De relatieve soortelijke massa van de zetstenen is beschreven met de volgende formule:

$$\Delta = \frac{(\rho_s - \rho_w)}{\rho_w} \tag{2.2}$$

Met:
Δ = relatieve soortelijke massa van de zetstenen ten opzichte van het water (-)
ρ_s = soortelijke massa van de zetstenen (kg/m^3)
ρ_w = soortelijke massa van het water (kg/m^3)

Uit formule (2.2) volgt dat, vanwege de gelijkblijvende Δ en ρ_w, ook de soortelijke massa van de zetstenen ρ_s niet wordt verschaald.

Een andere belangrijke dimensieloze parameter in het onderzoek is de belastingparameter, welke is gedefinieerd als $H_s/(\Delta D)$. De belastingparameter $H_s/(\Delta D)$ kan worden gezien als de verhouding tussen de belasting (de golfhoogte H_s) en de sterkte (relatieve soortelijke massa Δ en dikte D). In de belastingparameter wordt gebruik gemaakt van de volgende symbolen:

H_s = significante golfhoogte (m)
Δ = relatieve soortelijke massa van de zetstenen ten opzichte van het water (-)
D = dikte van de RONA®ton toplaag, gedefinieerd als de afstand tussen de boven- en onderzijde van de zuilen, loodrecht op het talud gemeten (m)

In de belastingparameter is Δ dimensieloos en worden H_s en D uitgedrukt in lengte-eenheden. De belastingparameter is daardoor dimensieloos en is in het schaalmodel dus gelijk aan de belastingparameter in de werkelijke situatie (schaal 1:1).

2.2.4 Schaling van stroming in de constructie

Behalve de waterbeweging op het talud, waarvoor het Froude getal wordt gebruikt, is ook de stroming in het filter van belang voor de stabiliteit. Daarvoor dient het Reynolds getal in de modelopstelling en in de werkelijke situatie hetzelfde te zijn. Het Reynolds getal wordt als volgt gedefinieerd:

$$\mathrm{Re} = \frac{Lu}{\nu} \tag{2.3}$$

Met:
Re = Reynolds getal (-)
L = lengte (m)
u = snelheid of doorlatendheid (m/s)
v = kinematische viscositeit (voor water: ca. $1{,}2\cdot10^{-6}$) (m^2/s)

Het gelijktijdig voldoen aan de Reynolds schaal en de Froude schaal is in een kleinschalig model niet mogelijk. Daarom dient het onderzoek op een zo groot mogelijke schaal te worden uitgevoerd. Tot n_L = 3 (Bezuijen, Burger en Klein Breteler, 1990) is de invloed van schaaleffecten verwaarloosbaar. Het huidige onderzoek (n_L = 2) voldoet hier dus ruimschoots aan.

Voor de schaling van het filter dient gekeken te worden naar de leklengte:

$$\Lambda = \sqrt{\frac{kbD}{k'}} \tag{2.4}$$

Met:
Λ = leklengte (m)
b = dikte van de filterlaag (m)
k = doorlatendheid van de filterlaag (m/s)
D = effectieve dikte van de toplaag (m)
k' = doorlatendheid van de toplaag (m/s)

De leklengte heeft de dimensie m en schaalt met de lengteschaal: $n_\Lambda = n_L = 2$. Met het rekenmodel Steentoets is de leklengte in prototype-omstandigheden en in het schaalmodel berekend. Voor deze berekeningen is gebruikgemaakt van Steentoets2014 versie v14.1.2.1 (Klein Breteler, 2014). In de berekeningen is uitgegaan van inwasmateriaal met korrelgrootte D_{f15} = 11 mm in het schaalmodel en D_{f15} = 22 mm in prototype.
Uit de berekeningen is, uitgaand van de gehanteerde schaal van 1:2, gebleken dat in de modelopstelling een filterlaag met laagdikte b van ongeveer 7 cm en korrelgrootte D_{f15} = 10 à 13 mm goed overeenkomt met onder andere de volgende filterlaagdiktes en korrelgroottes van steenzettingen in de werkelijkheid: b = 15 cm in combinatie met D_{f15} = 15 à 22 mm, of met D_{f15} = 18 mm in combinatie met b = 13,5 à 16,5 cm.

In Tabel 2.1 is ter illustratie voor prototype- en schaalmodelomstandigheden weergegeven welke combinatie van parameters resulteren in een vergelijkbare leklengte, uitgaande van verschaling van de leklengte met de lengteschaal $n_L = 2$. Opgemerkt wordt dat een iets andere combinatie van parameters kan resulteren in dezelfde leklengte.

Parameter	Symbool	Eenheid	Waarde op ware grootte	Waarde op schaal (indicatief)
dikte van de toplaag	D	(m)	0,29	0,145
open oppervlak	Ω	(%)	10	10
filterlaagdikte	B	(m)	0,15	0,075
korrelgrootte filter	D_{f15}	(mm)	18	11
korrelgrootte inwasmateriaal	D_{i15}	(mm)	22	11
toplaagdoorlatendheid	k'	(mm/s)	77	56
leklengte	Λ	(m)	0,34	0,17

Tabel 2.1 Parameters met betrekking tot de stroming in de steenzetting met de waarden op ware grootte en overeenkomstige waarden op schaal (indicatief).

Omdat in de werkelijkheid diverse soorten filtermateriaal en diverse filterlaagdiktes worden toegepast, kunnen in het schaalmodel binnen bepaalde grenzen ook andere waarden gebruikt worden.

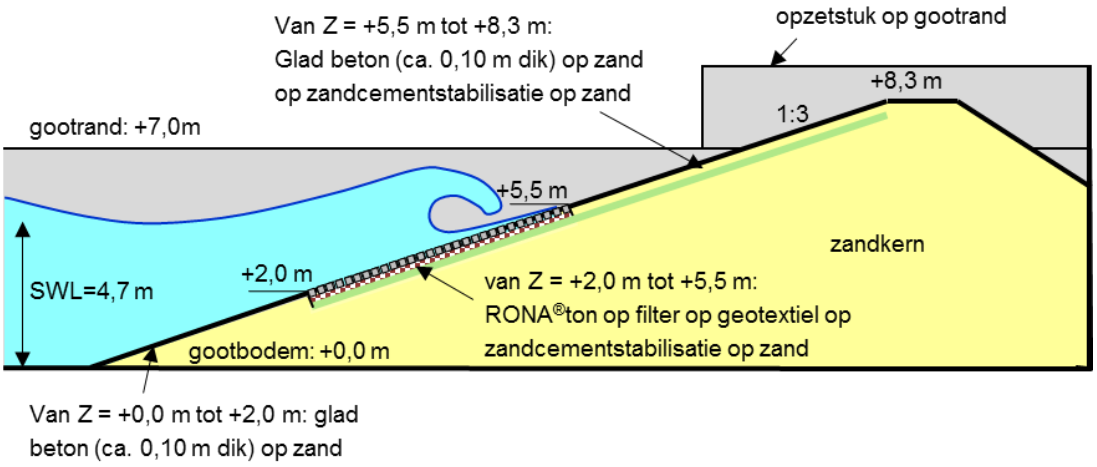
3 Modelopstelling en proevenprogramma

3.1 Modelopstelling

3.1.1 Algemeen

Voor het onderhavige onderzoek is in de Deltagoot een dijk opgebouwd met een steenzetting van RONA®ton. De schaal van de modelopstelling was 1:2, zie hoofdstuk 2. Alle maten die in dit rapport zijn gerapporteerd, betreffen waarden op modelschaal, dus zoals aanwezig in de Deltagoot, tenzij nadrukkelijk anders is vermeld. Een schematische doorsnede van de beproefde modelopstelling met RONA®ton is weergegeven in Figuur 3.1.

De steenzetting is beproefd met drie proevenseries: eerst twee proevenseries met korteduurproeven, waarna tijdens de derde proevenserie een langeduurproef is uitgevoerd.



Figuur 3.1 Schematische lengtedoorsnede van de beproefde modelopstelling met RONA®ton.

De dijk had een hoogte van 8,3 m boven de gootbodem. Om deze 8,3 m hoge dijk in de Deltagoot te kunnen bouwen, zijn de gootwanden bij de kruin van de dijk plaatselijk verhoogd met 2,5 m hoge opzetstukken. Het dijklichaam was tevens voorzien van drainage bij de teen, zodat eventuele snelle waterstandswisselingen in de goot niet zouden leiden tot het opbarsten van de dichte betonnen teen. Het dijklichaam bestaat uit een kern van zand en heeft een talud van 1:3. Op het talud zijn drie verschillende secties aangelegd (met Z = verticale afstand tot de gootbodem):

- Van Z = 0,0 m – 2,0 m: dummy sectie bestaande uit beton op zand.
- Van Z = 2,0 m – 5,5 m: testsectie bestaande uit RONA®ton op een filterlaag op geotextiel op zandcementstabilisatie op zand.
- Van Z = 5,5 m – 8,3 m: dummy sectie bestaande uit beton op zand.

De testsectie bestaat uit een steenzetting van RONA®ton op een filterlaag op geotextiel. Onder het geotextiel bevindt zich een laag zandcementstabilisatie. Die simuleert de slecht waterdoorlatende, erosiebestendige kleilaag, die gewoonlijk onder steenzettingen op dijken aanwezig is. Het geotextiel is aangebracht om uitspoeling van eventueel losgekomen zand te voorkomen.

Het niveau van het talud van de testsectie kan worden uitgedrukt als functie van de horizontale locatie. De lijn over het talud in de testsectie heeft de volgende functie:

$$Z = \frac{X - 174{,}855}{2{,}996} \tag{3.1}$$

Met:
Z = verticale afstand tot de gootbodem (m)
X = horizontale afstand tot het golfschot (m)

Een overzicht met de belangrijkste eigenschappen van de testsectie (van Z = 2,0 m – 5,5 m) is onderstaand gegeven. De eigenschappen van de testsectie worden in de volgende paragrafen gedetailleerder beschreven.

- Hoogte van de dijk t.o.v. de gootbodem: 8,3 m
- Taludhelling: 1:3
- RONA®ton:
  - Gemiddelde zuilhoogte: D = 14,5 cm
  - Soortelijke massa: gemiddeld ρ_s = 2112 kg/m^3
  - Open oppervlak (bij voet van de zuilen, inclusief voetjes): Ω = 10%
- Filterlaag:
  - Gemiddelde dikte: serie 1 en 2: b = 7,5 cm; serie 3: b = 7,4 cm
  - Gradering: serie 1 en 2: D_{f15} = 10,9 mm, D_{f50} = 18,5 mm en D_{f90} = 35,2 mm; serie 3: D_{f15} = 11,1 mm, D_{f50} = 18,1 mm en D_{f90} = 32,4 mm
- Inwasmateriaal: serie 1, 2 en 3: Noors graniet, D_{i15} = 10,4 mm, D_{i50} = 13,1 mm en D_{i90} = 16,1 mm

3.1.2 Filterlaag

Filterlaagdikte:
Tijdens het onderzoek is tweemaal een nieuwe filterlaag aangebracht (zie Figuur 3.2, links). Uiteraard is eerst bij aanvang van de proevenseries, voorafgaand aan serie 1, een nieuw filter aangebracht. Omdat serie 1 en 2 gelijk achter elkaar zijn uitgevoerd (want geen schade na serie 1), zijn deze twee series met exact hetzelfde filtermateriaal uitgevoerd. Na serie 2 moest een grote schade hersteld worden en is vers filtermateriaal aangebracht, waarbij beoogd werd dezelfde korrelverdeling te verkrijgen.
Van beide filterlagen is de dikte gemeten op 24 locaties. Daarvan zijn de meeste metingen uitgevoerd in de zone waarin de meeste schade aan het talud werd verwacht. De filterlaagdikte is gedefinieerd als de afstand loodrecht op het talud, tussen het geotextiel en de onderzijde van de zuilen. De filterlaagdikte was tijdens de proevenseries 1 en 2 gemiddeld b = 7,5 cm en tijdens proevenserie 3 gemiddeld b = 7,4 cm.

Gradering:
Van het gebruikte filtermateriaal is een zeefkromme gemaakt en weergeven in bijlage B.2. Het filtermateriaal heeft een brede gradering en is samengesteld door meerdere standaard steensorteringen te mengen, zodanig dat de beoogde gradering werd verkregen. De zeefkromme is gemaakt van een hoeveelheid filtermateriaal met exact deze mengverhouding, waardoor de zeefkromme beschouwd kan worden als een gemiddelde van de grote hoeveelheid filtermateriaal in de goot.

Het gebruikte filtermateriaal had de volgende karakteristieke waarden:
serie 1 en 2: D_{f15} = 10,9 mm, D_{f50} = 18,5 mm en D_{f90} = 35,2 mm
serie 3: D_{f15} = 11,1 mm, D_{f50} = 18,1 mm en D_{f90} = 32,4 mm

3.1.3 RONA®ton

Toplaagdikte:
De testsectie heeft een toplaag van machinale RONA®ton pakketten met een gemiddelde dikte D = 14,5 cm. De gemiddelde zuilhoogte van 14,5 cm is bepaald op basis van 24 zuilen, waarvan de individuele hoogte varieerde tussen 13,8 cm tot 14,8 cm. Tijdens het plaatsen van de RONA®ton (zie Figuur 3.2, rechts) zijn enkele duidelijk lage zuilen, beschadigde zuilen en enkele zuilen met enigszins bolle zijkanten verwijderd. Deze afwijkende zuilen zijn overduidelijk het gevolg van de ad-hoc productiemethode die gebruikt is voor het produceren van deze zuiltjes op schaal. De productie op ware grootte voor echte dijken is veel beter geborgd, waardoor deze problemen niet optreden.



Figuur 3.2 Links: aanbrengen van de filterlaag op geotextiel. Rechts: plaatsen van de RONA®ton zuilen.

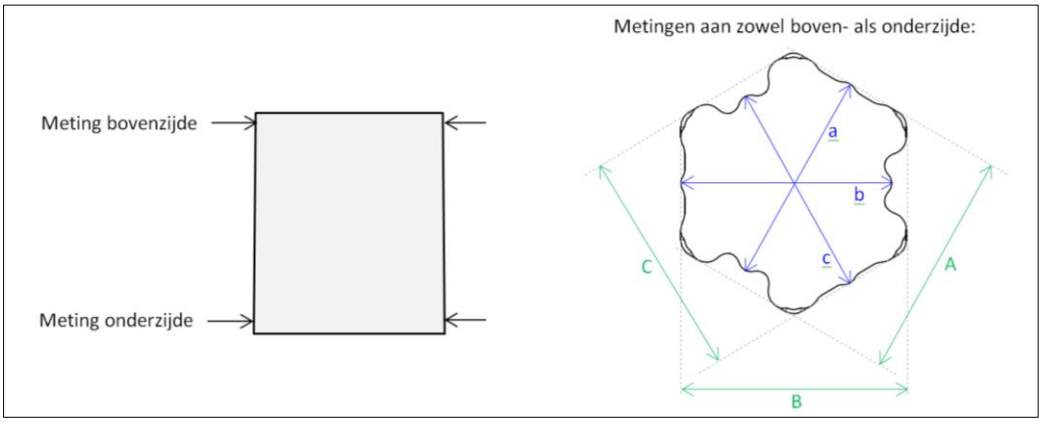
Soortelijke massa:
De soortelijke massa van het beton van de zuilen is bepaald op basis van 10 zuilen. Daarvan is de gemiddelde soortelijke massa ρ_s = 2112 kg/m^3 (met $\rho_{s,min}$ = 2097 kg/m^3 en $\rho_{s,max}$ = 2128 kg/m^3). De soortelijke massa is bepaald door de zuilen boven water en onder water te wegen. De dichtheid kan daaruit afgeleid worden met de volgende formule:

$$\rho_s = \frac{M_{boven}}{\left(M_{boven} - M_{onder}\right)} \cdot 1000 \qquad (3.2)$$

Met:
ρ_s = soortelijke massa van de zetstenen (kg/m^3)
M_{boven} = massa van de zetstenen boven water (kg)
M_{onder} = massa van de zetstenen onder water (kg)

Tapsheid:
Van de zuilen is de tapsheid gemeten, door zowel aan de boven- als onderzijde van de zuilen op 6 locaties de breedte van de zuil te meten, zie Figuur 3.3. Daarbij is opgelet dat de voetjes

bij de hoeken van de zuilen en kleine uitsteekseltjes in het beton niet zijn beschouwd. Het verschil tussen de boven- en onderzijde van 10 zuilen is gemiddeld 2,9 mm. De tapsheid bedraagt dus (1,45 mm/145 mm)*100 = 1%.



Figuur 3.3 Tapsheidmetingen per zuil.

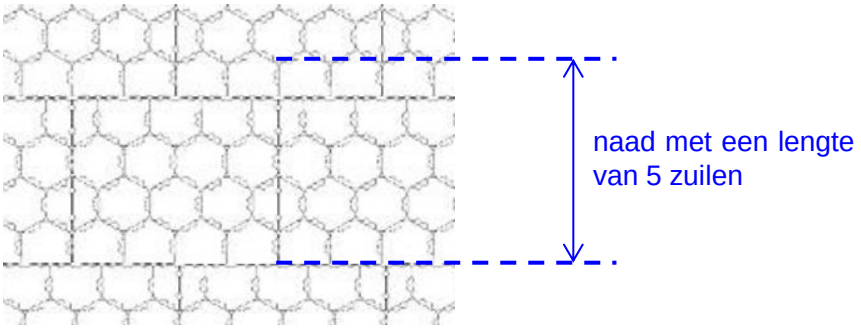
Open oppervlak:
Vanwege de voetjes aan de zuilen en de tapsheid van de zuilen is het open oppervlak aan de onderzijde van de zuilen anders dan aan de bovenzijde. Omdat het kleinste open oppervlak maatgevend is voor de doorstroming van het water, is het open oppervlak bepaald op basis van het oppervlak van de onderzijde van de zuilen. De open oppervlakte van een totaal RONA®ton pakket is gemiddeld Ω = 10%.

Wrijvingscoëfficiënt:
De zuilen zijn vervaardigd van iets lichter beton dan in werkelijkheid gebruikt wordt. Om te controleren of dat invloed heeft op de ruwheid van het betonoppervlak is de wrijvingscoëfficiënt gemeten. Uit 32 metingen volgde een gemiddelde wrijvingscoëfficiënt van 0,69.

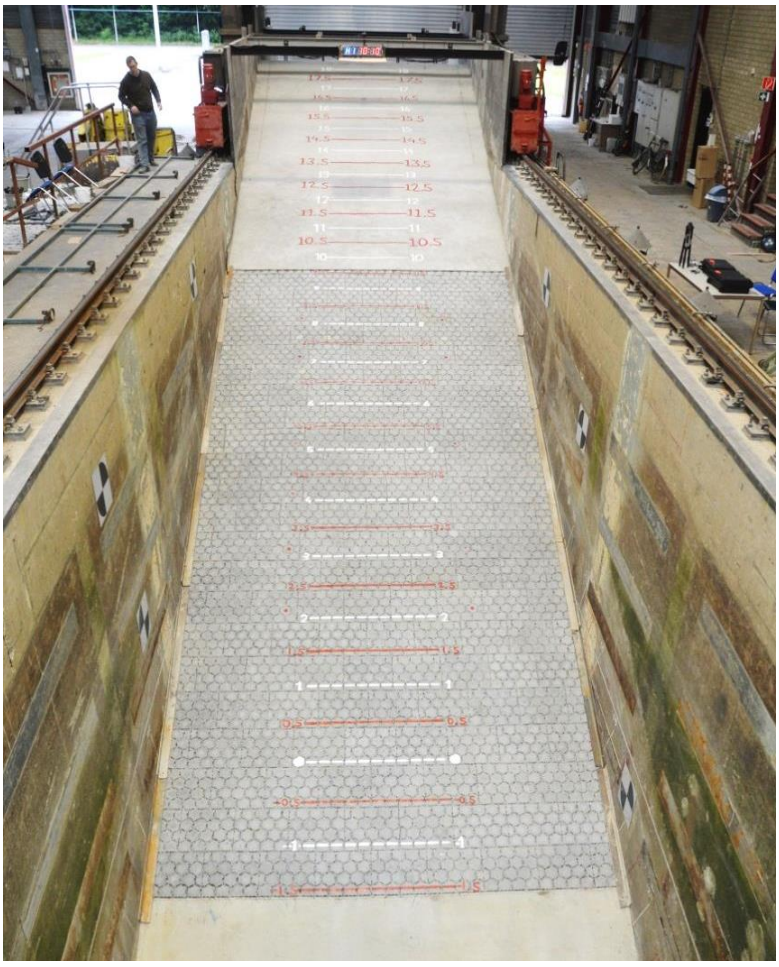
De wrijvingsproeven zijn uitgevoerd door een zuil op een plank vast te maken en een andere zuil daarop te leggen met de zijkanten van de zuilen tegen elkaar. Vervolgens is de helling van de plank vergroot totdat de bovenste zuil van de onderste afschoof en is de hoek tussen de plank en de grond genoteerd. De tangens van deze hoek is de wrijvingscoëfficiënt. Omdat de zuilen enigszins taps zijn, en het contactvlak tussen de zuilen dus niet exact evenwijdig is aan de plank, is voor die tapsheid gecorrigeerd. De wrijvingsproef is uitgevoerd voor 12 contactvlakken. Het contactvlak bestond steeds uit een set van een holle zuilzijde (zijde met ontwateringsgat) en een relatief vlakke zuilzijde (zijde zonder ontwateringsgat), zoals ook in de steenzetting het geval is.
Per contactvlak is de wrijvingsproef achtereenvolgens uitgevoerd met extra gewichten van 0 kg (dus zonder extra gewicht), 10 kg en 20 kg bovenop de bovenste zuil. De verschillende extra gewichten hebben, zoals te verwachten is, geen noemenswaardige invloed op de wrijvingscoëfficiënt.

Plaatsing:
De RONA®ton zuilen zijn met de hand geplaatst conform het patroon van de machinale pakketten (zie Figuur 1.3). Omdat de pakketten in werkelijkheid doorgaans versprongen geplaatst worden, zijn de pakketten in de modelopstelling ook versprongen geplaatst: elke bovenliggende rij is met een heel pakket begonnen bij de andere gootwand. Dit leverde een halfsteensverband op. In bijlage B.1 is een plattegrond van de testsectie weergegeven met

het exacte plaatsingspatroon van de RONA®ton pakketten en de belijning op het talud. In Figuur 3.5 is een overzicht van de testsectie te zien.
Vanwege het halfsteensverband zijn in de modelopstelling veel naden in de lengterichting aanwezig met een lengte van vijf zuilen (zie Figuur 3.4). Slechts wanneer de sets niet exact in halfsteensverband liggen (bijvoorbeeld door geringe maatafwijkingen), hebben de naden een lengte van vier zuilen.



Figuur 3.4 In de lengterichting hebben veel naden een lengte van vijf zuilen.



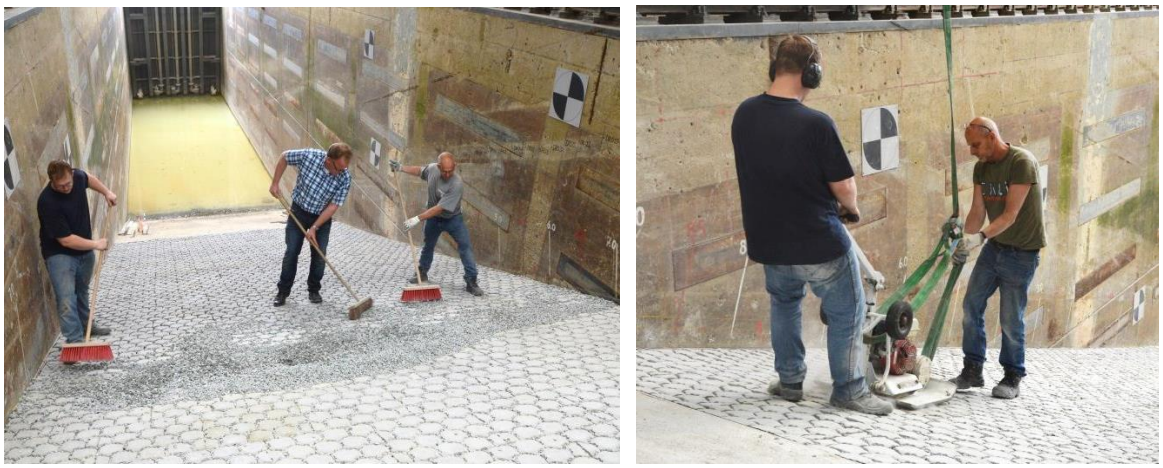
Figuur 3.5 Overzicht van de testsectie met RONA®ton zuilen.

3.1.4 Inwasmateriaal

De zuilen zijn ingewassen met Noors graniet (gebroken steenslag, hoekig). Het inwassen van de RONA®ton (zie Figuur 3.6, links) zuilen is gedaan in meerdere stappen. Omdat de blokjes enigszins taps zijn, is in de gaten eerst een kleine hoeveelheid inwasmateriaal aangebracht van de standaard sortering 8-11 mm. De spleten zijn daarna volledig aangevuld met inwasmateriaal van de standaard sortering 11-16 mm en aangetrild met een trilplaat (zie Figuur 3.6, rechts). Dat aanvullen en trillen is meerdere keren gedaan, omdat tijdens het trillen de steenslag vrij diep in de gaten zakte. Vervolgens is eerst en ingolfproef uitgevoerd, en daarna pas het reguliere proevenprogramma.

Deze bijzondere wijze van werken, die afwijkt van de werkwijze in de praktijk, is uitgevoerd omdat de steenzetting volledig nieuw is en in de Deltagoot gelijk zwaar belast wordt door golven. In werkelijkheid ligt het inwasmateriaal na een paar jaar veel vaster en daarom hebben we extra ons best gedaan om een situatie te creëren zoals op een echte dijk na enkele jaren. Daar zal het inwasmateriaal in de loop der tijd door temperatuurvariaties en weer & wind steeds vaster in de bekleding komen te zitten. We hebben dit proces in onderling overleg gesimuleerd door met een trilplaat over de bekleding te gaan om alles goed vast te trillen en een ingolfproef uit te voeren met kleine golven. De intentie was dus om een situatie te creëren zoals over een paar jaar op een echte dijk, en niet om een recept vast te leggen zoals in werkelijkheid het inwasmateriaal aangebracht moet worden.

De gemeten zeefkrommes van de standaard sorteringen 8-11 mm en 11-16 mm zijn weergegeven in bijlage B.3, zie de blauwe en groene stippellijn.
Tijdens het inwassen van de RONA®ton zuilen is bijgehouden hoeveel volumeprocent van beide sorteringen is gebruikt: circa 14% van 8-11 mm en circa 86% van 11-16 mm. Wanneer de zeefkrommes van de twee afzonderlijke sorteringen in deze verhouding theoretisch gemengd worden, volgt daaruit een indicatie van de totale korrelverdeling, zie de rode lijn in bijlage B.3. De eigenschappen van het theoretische mengsel van het inwasmateriaal zijn gebruikt voor het berekenen van de stabiliteitsfactor in paragraaf 5.3. Het theoretische mengsel van het inwasmateriaal heeft de volgende karakteristieke waarden: D_{i15} = 10,4 mm, D_{i50} = 13,1 mm en D_{i90} = 16,1 mm.
Deze karakteristieke waarden, die betrekking hebben op het schaalmodel, kunnen vertaald worden naar prototype-omstandigheden, door deze te verschalen met de lengteschaal n_L = 2.



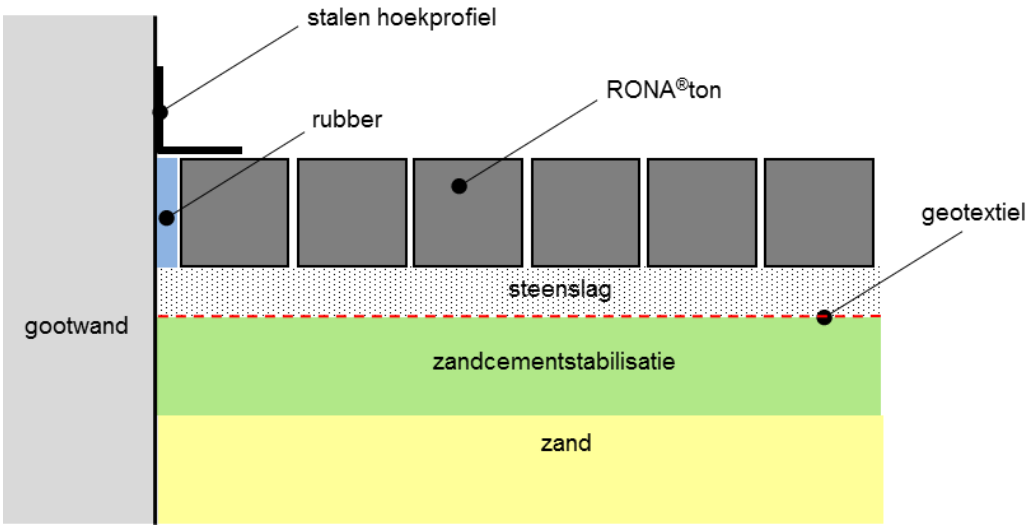
Figuur 3.6 Links: invegen van het inwasmateriaal. Rechts: aantrillen van de ingewassen steenzetting.

3.1.5 Afwerking van de modelranden en aanbrengen markering

Tussen de gootwand en de bekleding is een strook rubber aangebracht, zie Figuur 3.7. Dat is gebruikelijk bij het beproeven van steenzettingen. Het voorkomt dat de steenzetting zich klemwigt tussen de starre gootwanden, waardoor een overschatting van de stabiliteit verkregen zou kunnen worden.
Langs de gootwanden is op de steenzetting een stalen hoekprofiel bevestigd, wat ervoor zorgt dat er geen randeffecten optreden als gevolg van de overgang van de zuilen naar het rubber en van het rubber naar de gootwanden.

Zoals is te zien in Figuur 3.5, is op het talud belijning aangebracht ten behoeve van het uitvoeren van golfoploopmetingen (zie paragraaf 3.2.4) en ten behoeve van het vastleggen van de proefresultaten. De lijnen zijn op het talud geschilderd met een onderlinge afstand van 0,5 m, gemeten langs het talud (dit komt neer op een hoogteverschil tussen de lijnen van circa 15,8 cm). Locaties op het talud, in de lengterichting van de goot, worden in dit rapport soms uitgedrukt als x'-coördinaat, waarbij de waarde van x' correspondeert met het lijnnummer, bijvoorbeeld: lijn 8,5 komt overeen met x' = 8,5 m. Merk op dat de teenzijde van de testsectie niet begint bij lijn 0. Dat komt doordat de belijning van voorgaande Deltagootproeven is aangehouden. Een plattegrond van de testsectie met de belijning is weergegeven in bijlage B.1. Voor de posities van de lijnen wordt verwezen naar bijlage A.2.

Tijdens het onderzoek zijn proeven uitgevoerd bij twee waterstanden: h = 4,55 m en h = 4,70 m (zie paragraaf 3.3). Bij een waterstand h = 4,70 m snijdt de stilwaterlijn het oorspronkelijke taludoppervlak bij x' = 7,08 m. Bij waterstand h = 4,55 m snijdt de stilwaterlijn het oorspronkelijke taludoppervlak bij x' = 6,60 m.



Figuur 3.7 Aansluiting van de steenzetting tegen de gootwand (schematische dwarsdoorsnede).

3.2 Metingen

Gedurende het onderzoek zijn de volgende metingen uitgevoerd:

- Golfcondities
- Profielmetingen
- Uitspoeling inwasmateriaal

- Golfoploopmetingen
- Drukmetingen

Bovengenoemde metingen worden in de onderstaande paragrafen toegelicht.

3.2.1 Golfcondities

De golven zijn gemeten met drie golfhoogtemeters. Deze golfhoogtemeters (weerstandstype) bestaan uit twee parallel aan elkaar, verticaal gespannen draden, waarvan de onderlinge elektrische weerstand verandert met de oppervlakte-uitwijking van de waterspiegel. De golfhoogtemeters (WHM's) waren bevestigd tegen de gootwand, op respectievelijk 80 m, 85 m en 87 m vanaf het golfschot.

Door het toepassen van drie golfhoogtemeters op bepaalde afstanden van elkaar kunnen de inkomende en de door de constructie gereflecteerde golven worden bepaald met de methode van Mansard en Funke (1980). Dit gebeurt met het standaard Deltares software pakket voor golfanalyse: AUKE-PC. De uitwerking daarvan geeft aan welke golfcondities tijdens de proef zijn opgetreden. De overschrijdingskrommen van de inkomende golven zijn bepaald door de gemiddelde waarden van de totale overschrijdingskromme per golfhoogtemeter te nemen en deze te corrigeren met de gemeten reflectiecoëfficiënt C_r:

$$H_i = \frac{H_t}{\sqrt{1+C_r^2}} \tag{3.3}$$

Met:
H_i = inkomende golfhoogte (m)
H_t = totale golfhoogte (m)
C_r = reflectiecoëfficiënt (-)

Voor de golfhoogtemeters is een bemonsteringsfrequentie van 200 Hz gebruikt.

3.2.2 Profielmetingen

Het niveau van het taludoppervlak is gemeten met een 3D laserscanner (*FARO Focus^{3D} Multi Sensor Laser Scanner*) in combinatie met de software *SCENE 5.0*. Met behulp van de 3D laserscanner wordt een compleet 3D beeld van het talud gemaakt. De resulterende figuur is een verzameling van miljoenen ingemeten punten welke een digitale reproductie van het werkelijke taludoppervlak vormen. De laserscanner hangt tijdens de meting boven de goot (zie Figuur 3.8) en projecteert een laserstraal vanuit een draaiende spiegel richting de in te meten oppervlakte. Na terugkaatsing via het talud wordt de straal weer opgevangen door de scanner. Vervolgens kunnen de afstand tot het talud en de relatieve verticale en horizontale hoeken worden berekend. Deze data wordt vastgelegd ten behoeve van het genereren van een 3D profiel.



Figuur 3.8 De laserscanner hangt tijdens de meting boven het midden van de goot.

De laserscans zijn standaard uitgevoerd vanaf twee locaties boven de testsectie (X = 184,20 m en X = 187,73 m vanaf het golfschot, in het hart van de goot), waarna de resultaten van beide 3D scans zijn gecombineerd. Dit vergroot de nauwkeurigheid. Voorafgaand aan elke meting is op het talud liggend uitgespoeld inwasmateriaal eerst zoveel mogelijk verwijderd.
De 3D resultaten van de laserscans zijn per proef weergegeven in de bijlagen B.12 t/m B.15.

3.2.3 Uitspoeling inwasmateriaal

De uitspoeling van het inwasmateriaal is gemeten door na elke test met behulp van een duimstok de afstand vanaf de bovenzijde van meerdere RONA®ton zuilen tot ‘de bodem’ van de omringende gaten te meten.
Standaard is de uitspoeldiepte gemeten rondom 18 vooraf gemarkeerde RONA®ton zuilen van het type ‘standaard zuil’. In bijlage B.1 zijn deze zuilen gemarkeerd op de plattegrond van de testsectie. De zuilen bevonden zich langs 3 raaien in de lengterichting van de goot (raaien op +1,17 m, 0,00 m en -1,17 m ten opzichte van het hart van de goot). Langs elke raai zijn 6 vooraf gemarkeerde stenen ingemeten. Indien elders op het talud opmerkelijk veel uitspoeling geconstateerd werd, is soms rondom extra zuilen de uitspoeldiepte gemeten.
Bij het meten van de uitspoeldiepte is onderscheid gemaakt tussen de kelken en de ontwateringsgaten. Per RONA®ton zuil zijn 6 kelken en 6 ontwateringsgaten ingemeten. De analyse van de resultaten is beschreven in paragraaf 5.1.

3.2.4 Golfoploopmetingen

Tijdens elke test zijn er golfoploopmetingen uitgevoerd. Deze golfoploopmetingen worden als referentie gebruikt voor andere steenzettingen binnen het onderzoeksprogramma “Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken”. De analyse van de golfoploopmetingen is daarom niet uitgewerkt in het onderhavige rapport.

3.3 Proevenprogramma

Het proevenprogramma bestaat uit drie testseries. De eerste twee proevenseries bestaan uit korteduurproeven van maximaal circa 1000 golven, waarvan de eerste serie is uitgevoerd met relatief lange golven (golfsteilheid van 2%) en de tweede serie met relatief korte golven (golfsteilheid van 4%). Binnen deze series wordt bij elke volgende proef de golfhoogte steeds een stukje opgehoogd totdat de bekleding bezwijkt.
Tijdens de derde proevenserie is een langeduurproef uitgevoerd. Deze proef, met gelijkblijvende golfcondities, is voortgezet totdat schade ontstond. Deze serie geeft inzicht in de langeduursterkte van de bekleding. De langeduurproef van de serie 3 is uitgevoerd met golfcondities die tijdens serie 2 (met dezelfde golfsteilheid) nog net geen schade hadden opgeleverd.

Na serie 1 was de schade aan het talud dermate gering dat in overleg met de opdrachtgevers was besloten om op dezelfde bekleding direct door te gaan met serie 2. Na serie 2 was wel schade ontstaan en was het talud eerst grotendeels gerepareerd voordat serie 3 startte.
Na elke proef van de series 1 en 2 is het uitgespoelde inwasmateriaal weer aangevuld en aangetrild met een trilplaat, zodat de afzonderlijke proeven als onafhankelijk van elkaar kunnen worden beschouwd. Vervormingen van het taludoppervlak (S-profiel) zijn tijdens de proevenseries niet hersteld. Tijdens serie 3 is de bekleding niet tussentijds ingewassen (langeduurproef).

Aan het begin van de proevenseries 1 en 3 zijn op de nieuw aangelegde steenzetting eerst ingolfproeven uitgevoerd. De tweede ingolfproef van serie 3 is uitgevoerd om extra drukmetingen te verkrijgen bij een lage golfhoogte met steile golven.
Tijdens deze ingolfproeven was de waterstand 4,55 m boven de gootbodem. Tijdens alle andere proeven is een waterstand aangehouden van 4,70 m boven de gootbodem. Na afloop van elke proef is de waterstand verlaagd en de bekleding geïnspecteerd om te zien of er al schade was ontstaan.

De proeven zijn uitgevoerd met onregelmatige golven. De golfcondities van de proeven worden gekarakteriseerd door de significante golfhoogte (H_s), de spectrale golfperiode ($T_{m-1,0}$) en de piekperiode (T_p). Alle proeven zijn uitgevoerd met een Jonswap spectrum. Dit spectrum is karakteristiek voor de golfcondities langs de Nederlandse kust.
In Tabel 3.1 en bijlage A.1 zijn de gerealiseerde golfcondities (in modelwaarden) weergegeven. Merk op dat waar in de tabel de significante golfhoogte H_s genoemd wordt, het in werkelijkheid de op het golfspectrum gebaseerde H_{m0} betreft. Beide komen echter sterk overeen. De golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra van de uitgevoerde proeven zijn weergegeven in de bijlagen B.4 t/m B.7.

Een proef werd gestopt zodra er schade was ontstaan of zodra de vooraf gestelde duur was bereikt. Een serie proeven is beëindigd bij het optreden van schade tijdens een proef, of als de capaciteit van de Deltagoot het niet toelaat om grotere golven te maken. De genoemde waarden in Tabel 3.1 betreffen de condities zoals gemeten in de Deltagoot (schaal 1:2). De overeenkomstige belastingduur is in werkelijkheid dus $\sqrt{2}$ groter.

Serie	Proef	h [m]	H_s [m]	T_p [s]	$T_{m-1,0}$ [s]	s_{op} [-]	ξ_{op} [-]	ξ_{om} [-]	N [-]	duur [h]	$H_s/(\Delta D)$ [-]
1	P01	4,55	0,60	4,41	4,01	0,020	2,37	2,16	497	0,50	3,71
	P02	4,70	0,69	4,71	4,36	0,020	2,35	2,18	1054	1,11	4,30
	P03	4,70	0,83	5,23	4,82	0,019	2,40	2,21	998	1,18	5,12
	P04	4,70	1,00	5,64	5,30	0,020	2,35	2,21	1022	1,28	6,18
	P05	4,70	1,20	6,21	5,74	0,020	2,36	2,18	1019	1,40	7,45
	P06	4,70	1,40	6,72	6,24	0,020	2,36	2,19	1007	1,50	8,70
	P07	4,70	1,50	6,94	6,38	0,020	2,36	2,17	591	0,85	9,31
	P07A	4,70	1,51	6,99	6,35	0,020	2,37	2,15	464	0,70	9,34
2	P08	4,70	0,95	3,99	3,76	0,038	1,70	1,60	1007	0,99	5,92
	P09	4,70	1,19	4,39	4,20	0,040	1,67	1,60	1042	1,08	7,41
	P10	4,70	1,39	4,78	4,54	0,039	1,69	1,60	643	0,74	8,62
3	P11	4,55	0,62	3,29	3,07	0,037	1,74	1,63	604	0,50	3,85
	P12	4,55	0,78	3,56	3,39	0,039	1,68	1,60	550	0,50	4,82
	P13	4,70	1,07	4,17	4,02	0,039	1,68	1,62	1826	1,86	6,61

Tabel 3.1 Proevenprogramma met de gerealiseerde golfcondities.

In de tabel zijn de volgende parameters gebruikt:

h = waterstand (m, t.o.v. de gootbodem)
H_s = significante golfhoogte (m)
T_p = golfperiode bij de piek van het spectrum (s)
$T_{m-1,0}$ = spectrale golfperiode (s)
ξ_{op} = brekerparameter op basis van de piekperiode: $\xi_{op} = \tan(\alpha)/\sqrt{(s_{op})}$ (-)
ξ_{om} = brekerparameter op basis van de spectrale golfperiode: $\xi_{om} = \tan(\alpha)/\sqrt{(s_{om})}$ (-)
s_{op} = golfsteilheid op basis van de piekperiode: $s_{op} = H_{m0}/((g/2\pi)\cdot T_p^2)$ (-)
s_{om} = golfsteilheid op basis van de spectrale golfperiode: $s_{om} = H_{m0}/((g/2\pi)\cdot T_{m-1,0}^2)$ (-)
g = versnelling van de zwaartekracht (m/s^2)
α = taludhelling (°)
N = aantal golven (-)
$H_s/(\Delta D)$ = belastingparameter (-)

Proef P07 is tussentijds korte tijd stilgelegd om over de kruin geslagen water terug te pompen naar de goot. Het tweede deel van de proef is aangeduid als proef P07A. De golfcondities van de twee afzonderlijke proefdelen P07 en P07A kunnen met de onderstaande formules bij elkaar worden opgeteld op basis van het gewogen gemiddelde van de energie (energie maal aantal golven). Het resultaat hiervan is weergegeven in Tabel 3.2.

$$T_{m-1,0,N} = \frac{m_{-1}}{m_0} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(N_i m_{-1i}\right)}{\sum_{i=1}^{n}\left(N_i m_{0i}\right)} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(N_i H_{si}^2 T_{m-1,0,i}\right)}{H_{sN}^2 \sum_{i=1}^{n} N_i} \tag{3.4}$$

$$H_{sN} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(N_i H_{si}^2\right)}{\sum_{i=1}^{n} N_i}} \tag{3.5}$$

$$T_{pN} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(N_i H_{si}^2 T_{pi}\right)}{H_{sN}^2 \sum_{i=1}^{n} N_i} \qquad (3.6)$$

Met:

$T_{m-1,0,i}$ = spectrale golfperiode in proef i (s)
$T_{m-1,0,N}$ = spectrale golfperiode, gemiddeld over de beschouwde proeven (s)
m_0 = $\int f^0 \cdot E(f)\, df$ = nulde moment van de energiedichtheid (oppervlak onder het spectrum) (m^2)
m_{-1} = $\int f^{-1} \cdot E(f)\, df$ (m^2)
$E(f)$ = energiedichtheid als functie van f (grafiek van het spectrum) (m^2s)
f = golffrequentie = 1/T (Hz)
n = aantal proeven (-)
N_i = aantal golven in proef i (-)
H_{si} = significante golfhoogte in proef i (m)
H_{sN} = significante golfhoogte, gemiddeld over de beschouwde proeven (m)
T_{pi} = de golfperiode bij de piek van het spectrum in proef i (s)
T_{pN} = de golfperiode bij de piek van het spectrum, gemiddeld over de beschouwde proeven (s)

Serie	**Proef**	**h** [m]	**H_s** [m]	**T_p** [s]	**$T_{m-1,0}$** [s]	**s_{op}** [-]	**ξ_{op}** [-]	**ξ_{om}** [-]	**N** [-]	**duur** [h]	**$H_s/(\Delta D)$** [-]
1	P01	4,55	0,60	4,41	4,01	0,020	2,37	2,16	497	0,50	3,71
	P02	4,70	0,69	4,71	4,36	0,020	2,35	2,18	1054	1,11	4,30
	P03	4,70	0,83	5,23	4,82	0,019	2,40	2,21	998	1,18	5,12
	P04	4,70	1,00	5,64	5,30	0,020	2,35	2,21	1022	1,28	6,18
	P05	4,70	1,20	6,21	5,74	0,020	2,36	2,18	1019	1,40	7,45
	P06	4,70	1,40	6,72	6,24	0,020	2,36	2,19	1007	1,50	8,70
	P07+P07A	4,70	1,50	6,96	6,37	0,020	2,36	2,16	1055	1,55	9,32
2	P08	4,70	0,95	3,99	3,76	0,038	1,70	1,60	1007	0,99	5,92
	P09	4,70	1,19	4,39	4,20	0,040	1,67	1,60	1042	1,08	7,41
	P10	4,70	1,39	4,78	4,54	0,039	1,69	1,60	643	0,74	8,62
3	P11	4,55	0,62	3,29	3,07	0,037	1,74	1,63	604	0,50	3,85
	P12	4,55	0,78	3,56	3,39	0,039	1,68	1,60	550	0,50	4,82
	P13	4,70	1,07	4,17	4,02	0,039	1,68	1,62	1826	1,86	6,61

Tabel 3.2 Proevenprogramma met de gerealiseerde golfcondities, waarin de proefdelen P07 en P07A bij elkaar zijn opgeteld tot proef P07+P07A.

4 Proefresultaten en observaties

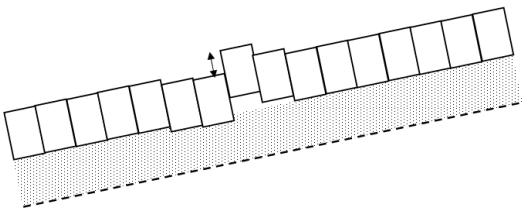
4.1 Indeling in schadecategorieën

In de volgende paragrafen worden de proefresultaten besproken. Hiervoor wordt schade aan de steenzetting gekarakteriseerd volgens de volgende schadecategorieën (categorie a t/m d):

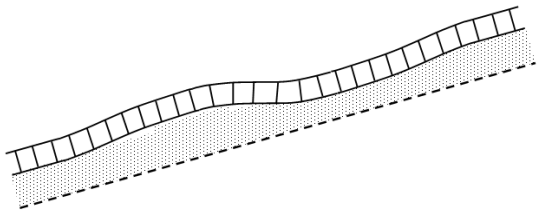
a) De verplaatsing van een zetsteen ten opzichte van een naastliggend zetsteen is kleiner dan 10 % van de dikte van de toplaag (0,1·D, met D = toplaagdikte) (zie Figuur 4.1), of de amplitude van de vervorming (S-vormig taludoppervlak, zie Figuur 4.2) is kleiner dan 20% van de toplaagdikte. In de praktijk is dan doorgaans nog geen waarneembare schade aanwezig.
b) De verplaatsing van een zetsteen ten opzichte van een naastliggend zetsteen is tussen 10% en 20% van de dikte van de toplaag, of de amplitude van de vervorming (S-vormig taludoppervlak) is 20% à 30% van de toplaagdikte.
c) Aan één van de volgende voorwaarden is voldaan:
   – de verplaatsing van een zetsteen ten opzichte van een naastliggend zetsteen is tussen 20% en 50% van de dikte van de toplaag, of
   – de amplitude van de vervorming (S-vormig taludoppervlak) is 30% à 50% van de toplaagdikte, of
   – er is zoveel filtermateriaal gemigreerd dat de toplaag over een lengte langs het talud van 8·D tot 15·D (in het dwarsprofiel) net zoveel verzakt is als de dikte van de filterlaag, of
   – er is een zetsteen gebroken (mits de betonkwaliteit goed op schaal is).
d) Aan één van de volgende voorwaarden is voldaan:
   – de verplaatsing van een zetsteen ten opzichte van een naastliggend zetsteen is meer dan 50% van de dikte van de toplaag, of
   – de amplitude van de vervorming (S-vormig taludoppervlak) is meer dan 50% van de toplaagdikte, of
   – er is zoveel filtermateriaal gemigreerd dat de toplaag over een lengte langs het talud van tenminste 15D (in het dwarsprofiel) net zoveel verzakt is als de dikte van de filterlaag, of
   – er zijn meerdere zetstenen gebroken (mits de betonkwaliteit goed op schaal is).

   Meestal zijn dan één of meer zetstenen geheel en al uit de steenzetting verdwenen.

De steenzetting wordt als bezweken beschouwd als schade van de categorie c of d is opgetreden.



Figuur 4.1 Verplaatsing van zetstenen ten opzichte van naastgelegen zetstenen.



Figuur 4.2 Vervorming tot S-profiel.

4.2 Serie 1: korteduurproeven, s_{op} = 0,02 (proeven P01 – P07A)

Proef P01 (ingolfproef, H_s = 0,60 m, N = 497 golven)
Tijdens deze ingolfproef is geen schade opgetreden (schadecategorie a). Er zijn geen kattenrug en hoogteverschillen tussen naast elkaar gelegen zuilen waargenomen. Zie de bijlagen B.12 t/m B.15 voor de 3D laserscans van het taludoppervlak.
Direct na het starten van de proef bewoog veel inwasmateriaal zich mee met de golfoploop en golfneerloop over het talud, loodrecht op de waterlijn. Aanvankelijk was deze beweging zichtbaar over de gehele breedte van het talud, maar vanaf enige tijd verplaatste dit zich naar de goothelft aan de meetcabinezijde.
Na de proef was dit verschil ook zichtbaar in de mate van uitspoeling van het inwasmateriaal. Aan de halzijde was de gemiddelde uitspoeldiepte van het inwasmateriaal per ingemeten zuil maximaal 3 à 4 cm (maximum van het eerder genoemde gemiddelde), terwijl aan de meetcabinezijde nauwelijks uitspoeling van inwasmateriaal werd geconstateerd. Het lijkt erop dat tijdens de proef het op en neer gaande inwasmateriaal langzaam naar de meetcabinezijde is gemigreerd, waar het talud zichzelf bleef inwassen. De meeste uitspoeling van het inwasmateriaal vond plaats rond en boven lijn 5. Onder lijn 2 was geen uitspoeling van het inwasmateriaal zichtbaar. Zie de bijlagen B.8 t/m B.11 voor de resultaten van de uitspoeldieptemetingen van het inwasmateriaal. Een deel van het inwasmateriaal had zich opgehoopt op het talud aan de meetcabinezijde tussen de lijnen 1 en 2 en tussen de lijnen 4,5 en 5,5 (zie Foto C.4.a in bijlage C). Na de proef is het inwasmateriaal opnieuw aangebracht en is de halzijde van de steenzetting aangetrild tussen de lijnen 4 en 8.

Proef P02 (H_s = 0,69 m, N = 1054 golven)
Tijdens deze proef is geen schade opgetreden (schadecategorie a). Er zijn geen hoogteverschillen tussen naast elkaar gelegen zuilen waargenomen. In het talud is ongeveer in het midden van de goot rond lijn 5 een lichte verzakking geconstateerd en rond lijn 4 een lichte bolling met een maximaal hoogteverschil van circa 1 cm. Tijdens de proef is geconstateerd dat de meeste golfklappen op het talud komen rond lijn 5,5.
Tijdens de proef viel opdat het inwasmateriaal, in tegenstelling tot proef P01, eerst lange tijd op een neer bleef bewegen over de gehele breedte van het talud. Pas vanaf circa 40 minuten ging er aan de halzijde meer inwasmateriaal op en neer dan aan de meetcabinezijde (spiegelbeeld van proef P01).
Na de proef bleek de uitspoeldiepte van het inwasmateriaal over de hele breedte van de goot vergelijkbaar. De gemiddelde uitspoeldiepte (gemiddeld over de breedte van de goot) was maximaal circa 3 cm (maximum van het eerder genoemde gemiddelde). Vlak onder lijn 5 was circa 0,5 m uit de meetcabinezijde echter een ontwateringsgat volledig leeggespoeld en leek een steentje van het filtermateriaal verdwenen. Een deel van het uitgespoelde inwasmateriaal had zich opgehoopt op het talud in het midden van de goot tussen de lijnen 0 en 1,5 (zie Foto C.4.b). Na de proef is het inwasmateriaal opnieuw aangebracht en is de steenzetting aangetrild tussen de lijnen 4 en 8,5.

Om onbekende reden stopte drukopnemer DRO02 in de loop van de proef met meten. Tijdens navolgende proeven functioneerde de drukopnemer wel weer naar behoren.

Proef P03 (H_s = 0,83 m, N = 998 golven)
Tijdens deze proef is geen schade opgetreden (schadecategorie a). Er zijn geen hoogteverschillen tussen naast elkaar gelegen zuilen waargenomen. De lichte vervorming rond de lijnen 4 en 5 heeft een maximaal hoogteverschil van circa 1,5 cm (zie Foto C.5.a).
Na de proef bleek aan de halzijde de gemiddelde uitspoeldiepte van het inwasmateriaal maximaal 1 à 2 cm, terwijl de gemiddelde uitspoeldiepte van het inwasmateriaal aan de meetcabinezijde maximaal 3 à 4 cm was. Een deel van het inwasmateriaal had zich opgehoopt op het talud aan de halzijde tussen de lijnen -0,5 en 0,5. Na de proef is het inwasmateriaal opnieuw aangebracht en is de steenzetting aangetrild tussen de lijnen 3 en 8,5.

Proef P04 (H_s = 1,00 m, N = 1022 golven)
Tijdens deze proef is geen schade opgetreden (schadecategorie a). Er zijn geen hoogteverschillen tussen naast elkaar gelegen zuilen waargenomen. De lichte vervorming rond de lijnen 4 en 5 is enigszins duidelijker geworden en heeft een maximaal hoogteverschil van circa 2 cm.
Direct na het starten van de proef bewoog veel inwasmateriaal zich over de gehele gootbreedte op en neer over het talud, maar vanaf ongeveer 15 minuten gebeurde dit aan de halzijde in sterkere mate dan aan de meetcabinezijde.
Na de proef bleek de gemiddelde uitspoeldiepte van het inwasmateriaal in goothelft aan de meetcabinezijde enkele centimeters meer te zijn dan in de goothelft aan de halzijde. Het inwasmateriaal had zich opgehoopt bij de teen van de dijk. Na de proef is het inwasmateriaal opnieuw aangebracht en is ongeveer de bovenste helft van de steenzetting aangetrild.

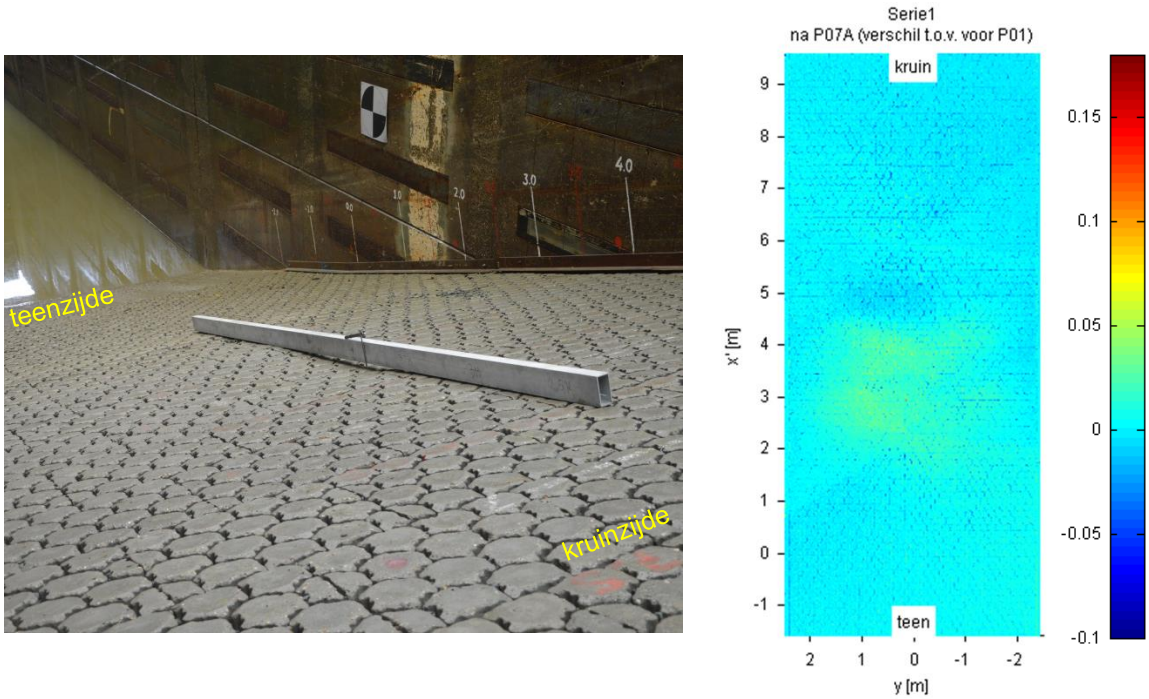
Proef P05 (H_s = 1,20 m, N = 1019 golven)
Tijdens deze proef is geen schade opgetreden (schadecategorie a). Er zijn geen hoogteverschillen tussen naast elkaar gelegen zuilen waargenomen. De lichte vervorming rond de lijnen 4 en 5 heeft een maximaal hoogteverschil van circa 2,5 cm.
Tijdens de proef bewoog het inwasmateriaal zich over het talud op en neer over de gehele gootbreedte. Desondanks bleek na de proef dat aan de meetcabinezijde iets meer inwasmateriaal was uitgespoeld dan aan de halzijde. Na de proef is het inwasmateriaal opnieuw aangebracht en is ongeveer de bovenste helft van de steenzetting aangetrild.

Proef P06 (H_s = 1,40 m, N = 1007 golven)
Tijdens deze proef is geen schade opgetreden (schadecategorie a). Er zijn geen hoogteverschillen tussen naast elkaar gelegen zuilen waargenomen. De lichte vervorming rond de lijnen 4 en 5 heeft een maximaal hoogteverschil van circa 2,5 cm (zie Foto C.5.b).
Na de proef bleek dat aan de meetcabinezijde iets meer inwasmateriaal was uitgespoeld dan aan de halzijde. Langs de gootwanden was weer meer inwasmateriaal uitgespoeld dan over de rest van de gootbreedte. In die stroken werden tussen de lijnen 1 en 5 meerdere ontwateringsgaten gevonden met uitspoeldieptes van 10 à 13 cm. In het midden van de goot werden diverse ontwateringsgaten met uitspoeldieptes van 7 à 8 cm gevonden. Een deel van het inwasmateriaal had zich opgehoopt op het talud in het midden van de goot tussen de lijnen 2 en 4,5. Na de proef is het inwasmateriaal opnieuw aangebracht en is ongeveer de bovenste helft van de steenzetting aangetrild.

Proef P07 (H_s = 1,50 m, N = 591 golven) + P07A (H_s = 1,51 m, N = 464 golven)
Deze proef is uitgevoerd in twee delen (P07 en P07A), doordat achter de kruin de hoeveelheid overgeslagen water sneller toenam dan dat het weggepompt kon worden. Er was besloten de proef enige tijd stil te leggen, zodat het water terug in de goot gepompt kon worden.
Tijdens de totale proef is geen schade opgetreden (schadecategorie a). Er zijn geen hoogteverschillen tussen naast elkaar gelegen zuilen waargenomen. De lichte vervorming rond de lijnen 4 en 5 is iets duidelijker geworden en heeft nu een maximaal hoogteverschil van circa 3,5 cm (zie Figuur 4.3 en Foto C.7.a).
Na de proef bleek dat aan de meetcabinezijde iets meer inwasmateriaal was uitgespoeld dan aan de halzijde. Langs de gootwanden was weer meer inwasmateriaal uitgespoeld dan over de rest van de gootbreedte.

Na afloop van proef P07A bleek dat enkele markerplaten, die gebruikt worden voor de laserscanmetingen, zeer licht verbogen waren en dat één markerplaat zelfs van de gootwand was geslagen door de invloed van de hoge golven. Twee markerplaten zijn opnieuw bevestigd, en twee extra markerplaten zijn er nieuw bij geplaatst. Dit heeft geen relevante invloed op de nauwkeurigheid van de laserscans.

Omdat de vervorming van het talud gering is en de schade aan de steenzetting derhalve binnen de grens van schadecategorie a bleef, is besloten om serie 2 voort te zetten op dezelfde steenzetting. De steenzetting is daarom opnieuw ingewassen en ongeveer de bovenste helft van de steenzetting is aangetrild.



Figuur 4.3 Links: na proef P07 was slechts een geringe vervorming van het talud zichtbaar. Rechts: 3D laserscan van de testsectie (verschilmeting t.o.v. de situatie voor proef P01).

4.3 Serie 2: korteduurproeven, s_{op} = 0,04 (proeven P08 – P10)

Proef P08 (H_s = 0,95 m, N = 1007 golven)
Tijdens deze proef is geen schade opgetreden (schadecategorie a). Er zijn geen hoogteverschillen tussen naast elkaar gelegen zuilen waargenomen. De lichte verzakking rond lijn 5 lijkt verdwenen, maar in plaats daarvan is een nieuwe verzakking geconstateerd rond lijn 6 (zie Figuur 4.5). De bolling rond lijn 4 lijkt niet veranderd. Het maximale hoogteverschil van de vervorming is circa 4 cm. De verplaatsing van de vervorming is vermoedelijk veroorzaakt door de steilere golven waarmee de proef is uitgevoerd. De zwaarste belasting komt daardoor gemiddeld mogelijk op een iets andere locatie op het talud terecht.
Tijdens de proef werd geconstateerd dat de korte golven tot meer golfklappen leiden dan de lange golven van serie 1. De golfklappen kwamen tijdens deze proef op een constantere locatie op het talud terecht (rond de lijnen 5,5 à 6) dan tijdens serie 1.
Tijdens de proef bleef het inwasmateriaal zich over de gehele gootbreedte op en neer bewegen over het talud gedurende de eerste 30 minuten. Daarna werd nauwelijks heen en weer spoelend inwasmateriaal meer gezien. Na de proef bleek dat aan de halzijde iets meer inwasmateriaal was uitgespoeld dan aan de meetcabinezijde. De hoeveelheid uitspoeling was duidelijk groter dan tijdens serie 1, ondanks dat de golfhoogte beduidend kleiner was dan de maximale golfhoogte van serie 1. Vooral tussen de 'lijnen' 4,8 en 6,5 was veel inwasmateriaal uitgespoeld. In deze zone waren meerdere ontwateringsgaten uitgespoeld tot op het filter en bij enkele ontwateringsgaten was mogelijk een steentje uit het filter verdwenen. In deze zone waren de ontwateringsgaten gemiddeld bijna 2 keer zo diep uitgespoeld als de kelken. Onder lijn 4,8 was nauwelijks inwasmateriaal verdwenen en ook boven lijn 6,5 was de uitspoeling gering. Na de proef is de steenzetting opnieuw ingewassen en aangetrild tussen de lijnen 4 en 8,5.

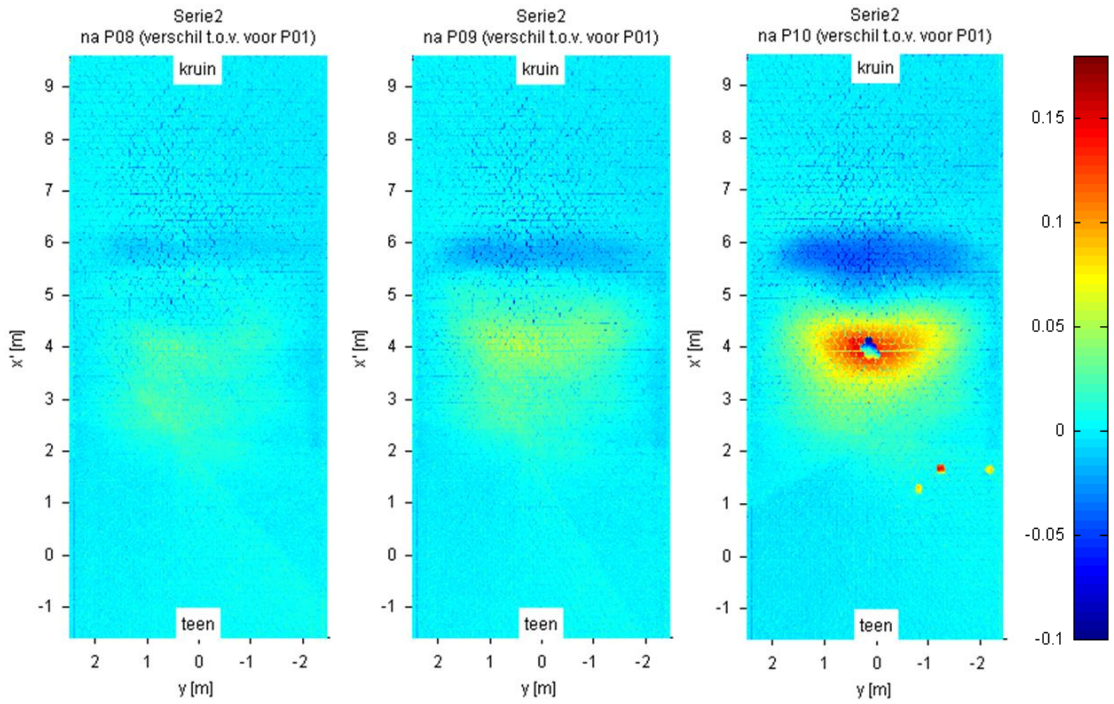
Proef P09 (H_s = 1,19 m, N = 1042 golven)
Tijdens deze proef zijn geen hoogteverschillen tussen naast elkaar gelegen zuilen ontstaan. Wel is de vervorming van het talud duidelijker geworden: de verzakking rond lijn 6 is iets dieper geworden en de bolling rond lijn 4 is iets hoger geworden (zie Figuur 4.5 en Foto's C.7.b en C.8.a). Het maximale hoogteverschil van de vervorming is nu circa 7 cm. De amplitude van deze kattenrug is circa 3,5 cm en ligt daarmee tussen 20% en 30% van de toplaagdikte (schadecategorie b). Dit wordt echter nog niet tot schade gerekend.
Tijdens de proef bleef het inwasmateriaal zich over de gehele gootbreedte op en neer bewegen over het talud gedurende de eerste 20 minuten. Daarna werd nauwelijks heen en weer spoelend inwasmateriaal meer gezien. De totale hoeveelheid uitgespoeld inwasmateriaal was ongeveer anderhalf keer zoveel als tijdens proef P08. Vooral tussen de 'lijnen' 4,2 en 6,5 was veel inwasmateriaal uitgespoeld. De diepste gaten bevonden zich tussen de lijnen 5 en 6. Daar waren meerdere ontwateringsgaten uitgespoeld tot op het filter en leken enkele steentjes uit het filter te zijn verdwenen. Zelfs enkele kelken waren leeg. In deze zone waren de ontwateringsgaten gemiddeld bijna 2 keer zo diep uitgespoeld als de kelken. Na de proef is de steenzetting opnieuw ingewassen en aangetrild tussen de lijnen 4 en 8,5.

Proef P10 (H_s = 1,39 m, N = 643 golven)
Tijdens deze proef is de steenzetting bezweken (schadecategorie d). De kattenrug is in de loop van de proef beduidend groter geworden (maximaal hoogteverschil van circa 16,5 cm) en ongeveer 44 minuten na het starten van de proef zijn 6 zuilen uit de bult van de kattenrug geslagen (zie Figuur 4.4, Figuur 4.5 en Foto's C.9.b t/m C.11.b). De zuilen sloegen uit de bekleding bij lijn 4, in het midden van de goot. Het gat ontstond op een hoekpunt van 3 RONA®ton pakketten en betreft 1 standaard zuil, 2 onderzuilen, 2 halve hoekzuilen, en 1

bovenzuil (zie Figuur 1.3). Een aantal van deze zuilen bleef elders op de testsectie liggen. Ter plaatse van de bult zijn de naden tussen de pakketten (parallel aan de waterlijn) enigszins open gaan staan naarmate de bult groeide. Tijdens deze proef zijn op het talud verder geen hoogteverschillen tussen naast elkaar gelegen zuilen waargenomen.
Het golfschot is zo snel mogelijk na het bezwijken van de steenzetting gestopt om verdere schade te voorkomen en de situatie ten tijde van het bezwijken zo goed mogelijk te kunnen vastleggen. Desondanks was tijdens de laatste golven een hoeveelheid filtermateriaal door het gat uit de bekleding gespoeld. Onder de zuilen rondom het gat ontstond daardoor een lege ruimte. De zuilen waren echter goed geklemd en behielden hun verband, waardoor de steenzetting als het ware zweefde over een oppervlakte van bijna 1 m^2.



Figuur 4.4 Tijdens proef P10 is de kattenrug aanzienlijk duidelijker geworden en zijn enkele zuilen uit de bult van de kattenrug geslagen.



Figuur 4.5 3D laserscan van de testsectie na de proeven P08, P09 en P10 (verschilmeting t.o.v. de situatie voor proef P01). De gele en rode stippen tussen x' = 1 m en x' = 2 m (proef P10) betreffen uit het talud geslagen zuilen.

De uitspoeling van het inwasmateriaal was vrij gelijkmatig verdeeld over de breedte van het talud en was gemiddeld 1 à 2 cm meer dan tijdens proef P09. Relatief veel ontwateringsgaten waren uitgespoeld tot op het filter, waarbij ook steentjes uit het filter zelf waren verdwenen.

In de loop van de proevenseries is geconstateerd dat de naden tussen de sets, evenwijdig aan de waterlijn, niet helemaal recht zijn (zie onder andere Foto C.10.b). Aan de hand van foto's en 3D laserscans is geconstateerd dat dit geen betrekking heeft op verzakking, maar al aanwezig was voor het begin van serie 1. Dit komt waarschijnlijk door kleine maatafwijkingen in de zuilen, die steeds duidelijker worden, naarmate meer rijen zuilen in de modelopstelling ingebouwd worden.

De steenzetting en het filter zijn verwijderd en opnieuw ingebouwd vanaf lijn 0 tot aan de bovenkant van de testsectie. Onder lijn 0 was immers geen enkele vorm van schade en vervorming zichtbaar. Er is gebruikgemaakt van de zuilen uit de voorgaande series, die al enigszins aan slijtage onderhevig waren door het over het talud bewegende inwasmateriaal.

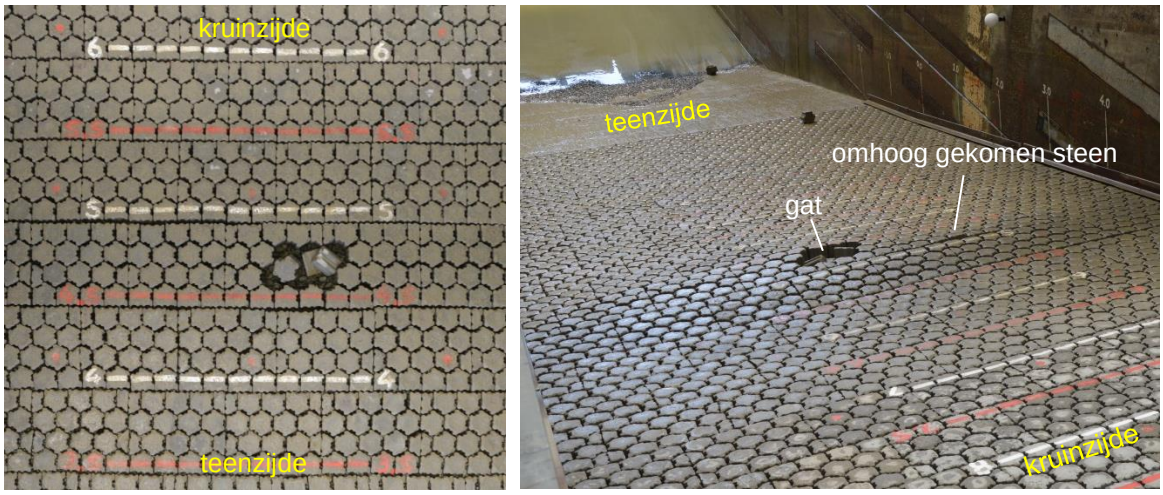
4.4 Serie 3: langeduurproeven, s_{op} = 0,04 (proeven P11 – P13)

Proef P11 (ingolfproef, H_s = 0,62 m, N = 604 golven)
Tijdens deze ingolfproef is geen schade opgetreden (schadecategorie a). Er zijn geen kattenrug en hoogteverschillen tussen naast elkaar gelegen zuilen waargenomen (zie Figuur 4.7).
Tijdens de proef bewoog het inwasmateriaal zich over het talud op en neer over de gehele gootbreedte. Desondanks bleek na de proef dat in het midden van de goot iets minder inwasmateriaal was uitgespoeld dan aan de hal- en meetcabinezijde. De maximale gemiddelde uitspoeldiepte was 2,5 à 3 cm. Een deel van het inwasmateriaal heeft zich opgehoopt op het talud tussen de lijnen -1,5 en 1. Omdat de proef een ingolfproef betreft, is na de proef opnieuw ingewassen en is de steenzetting aangetrild tussen de lijnen 3 en 8,5.

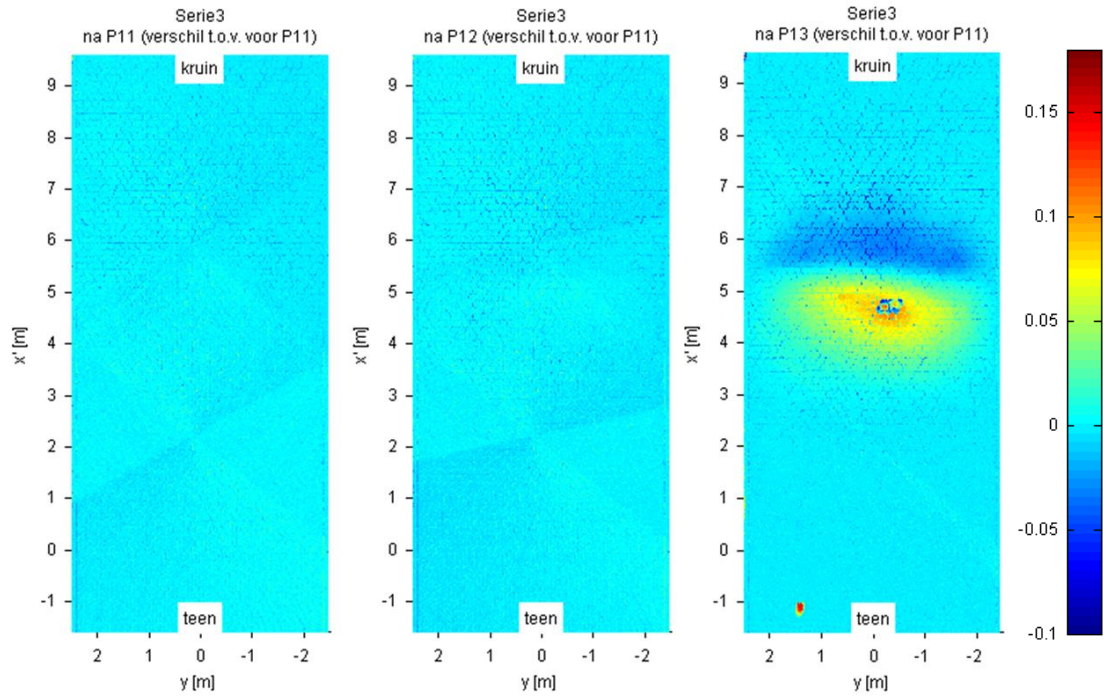
Proef P12 (ingolfproef, H_s = 0,78 m, N = 550 golven)
Tijdens deze tweede ingolfproef is geen schade opgetreden (schadecategorie a). Er zijn geen kattenrug en hoogteverschillen tussen naast elkaar gelegen zuilen waargenomen (zie Figuur 4.7).
Na de proef bleek dat aan de halzijde iets meer inwasmateriaal was uitgespoeld dan aan de meetcabinezijde. De maximale gemiddelde uitspoeldiepte was 3 à 3,5 cm. Een deel van het inwasmateriaal heeft zich opgehoopt op het talud rond lijn 4 en tussen de lijnen -1,5 en -0,5. Omdat de proef een ingolfproef betreft, is na de proef opnieuw ingewassen en is ongeveer de bovenste helft van de steenzetting aangetrild.
Deze tweede ingolfproef is uitgevoerd om extra drukmetingen te verkrijgen bij een lage golfhoogte met steile golven.

Proef P13 (H_s = 1,07 m, N = 1826 golven)
Tijdens deze langeduurproef is de steenzetting bezweken (schadecategorie d). In de loop van de proef is een duidelijke kattenrug ontstaan (maximaal hoogteverschil van circa 13,5 cm) in het midden van de goot met de maximale bolling tussen de lijnen 4,5 en 5 en de maximale verzakking rond lijn 6 (zie Figuur 4.6, Figuur 4.7 en Foto's C.13.a t/m C.15.b). Ongeveer 1 uur en 51 minuten na het starten van de proef zijn 7 zuilen uit de bult van de kattenrug geslagen. Dat gebeurde net boven lijn 4,5, ongeveer in het midden van de goot. Het gat ontstond op de rand van 2 naast elkaar gelegen RONA®ton pakketten en betreft 5 standaard zuilen en 2 halve paszuilen. Drie van deze zuilen lagen nog los in het gat, terwijl de andere zuilen elders

op het talud lagen. Ter plaatse van de bult zijn de naden tussen de pakketten (parallel aan de waterlijn) enigszins open gaan staan naarmate de bult groeide. Tijdens deze proef is vlak onder lijn 5 ook een individuele steen 1 à 2 cm omhoog gekomen ten opzichte van omringende stenen (zie Figuur 4.6).
Het golfschot is zo snel mogelijk na het bezwijken van de steenzetting gestopt om verdere schade te voorkomen en de situatie ten tijde van het bezwijken zo goed mogelijk te kunnen vastleggen.
De uitspoeling van het inwasmateriaal was vrij gelijkmatig verdeeld over de breedte van het talud en was gemiddeld enkele centimeters meer dan tijdens proef P10. Relatief veel ontwateringsgaten en zelfs enkele kelken waren uitgespoeld tot op het filter, waarbij ook steentjes uit het filter zelf waren verdwenen.



Figuur 4.6 Tijdens proef P13 is een duidelijke kattenrug ontstaan en zijn enkele zuilen uit de bult van de kattenrug geslagen. Vlak onder lijn 5 is een individuele steen 1 à 2 cm omhoog gekomen ten opzichte van omringende stenen.

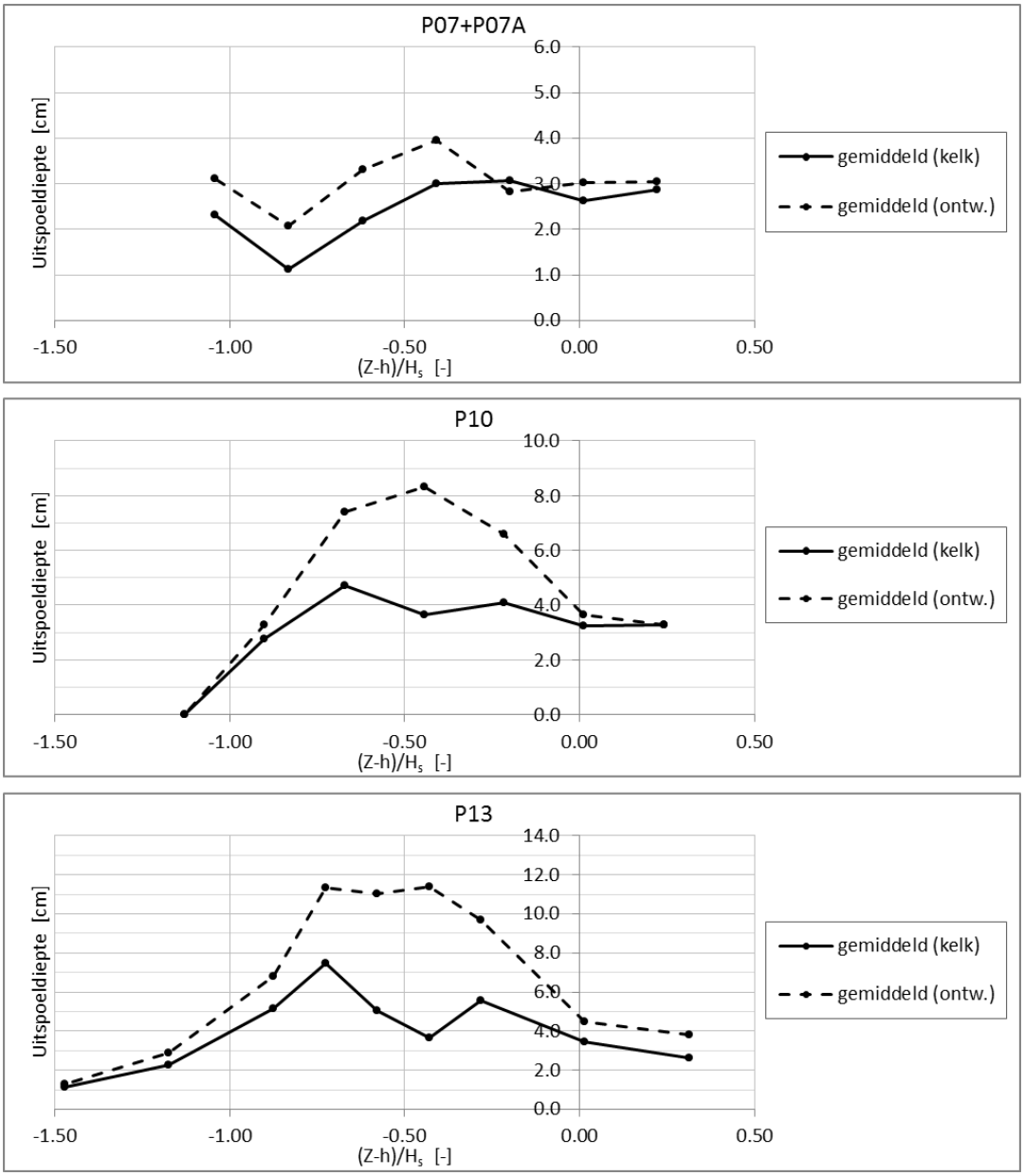


Figuur 4.7 3D laserscan van de testsectie na de proeven P11, P12 en P13 (verschilmeting t.o.v. de situatie voor proef P11). De gele stip bij x' = -1 m (proef P13) betreft een uit het talud geslagen zuil.

5 Analyse van de proefresultaten

5.1 Uitspoeling van het inwasmateriaal

Tijdens alle testen spoelde een deel van het inwasmateriaal weg. De meest opvallende zaken met betrekking tot de uitspoeling van het inwasmateriaal zijn in hoofdstuk 4 beschreven per test. De resultaten van de uitspoeldieptemetingen van het inwasmateriaal (zie ook paragraaf 3.2.3) zijn beschreven in de onderhavige paragraaf.



Figuur 5.1 De gemeten gemiddelde uitspoeldiepte van het inwasmateriaal, uitgezet tegen het verticale niveau ten opzichte van de stilwaterlijn, dimensieloos gemaakt met de significante golfhoogte, voor elke laatste proef van de proevenseries 1 (P07+P07A), 2 (P10) en 3 (P13).

De uitspoeldiepte is steeds gemeten rondom 18 vooraf gemarkeerde standaard RONA®ton zuilen (zie Foto C.16.a). Deze zuilen zijn gemarkeerd met rode stippen in bijlage B.1. Ze bevonden zich langs 3 raaien in de lengterichting van de goot (raaien op +1,17 m, 0,00 m en -1,17 m ten opzichte van het hart van de goot). Langs elke raai is de uitspoeling rondom 6 stenen gemeten. Bij het meten van de uitspoeldiepte is onderscheid gemaakt tussen de kelken en ontwateringsgaten. Per RONA®ton zuil zijn steeds 6 kelken en 6 ontwateringsgaten ingemeten. De uitspoeldiepte is in alle gevallen gemeten rondom standaard zuilen (zie Figuur 1.3). Rondom andere zuiltypen werden op het oog geen duidelijke verschillen geconstateerd.

De meetresultaten van alle proeven zijn weergegeven in de bijlagen B.8 t/m B.11. Ter illustratie is van de laatste proef van elke serie de gemiddelde uitspoeldiepte van de kelken en de ontwateringsgaten weergegeven in Figuur 5.1. De verticale as geeft de uitspoeldiepte, gedefinieerd als de afstand tussen de bovenkant van de zuil en de bodem van het gat. De horizontale as geeft het niveau van de ingemeten steen ten opzichte van de stilwaterlijn (Z-h), dimensieloos gemaakt met de significante golfhoogte H_s. Door het niveau van de steen ten opzichte van de stilwaterlijn te delen door H_s kunnen de figuren makkelijk met elkaar vergeleken worden ten aanzien van de locatie waar de meeste uitspoeling plaatsvindt. De zwarte ononderbroken lijnen en stippellijnen geven de gemiddelde uitspoeldiepte van de drie raaien. In Figuur 5.1 is duidelijk te zien dat de uitspoeling vanuit de ontwateringsgaten veel groter is dan vanuit de kelken.

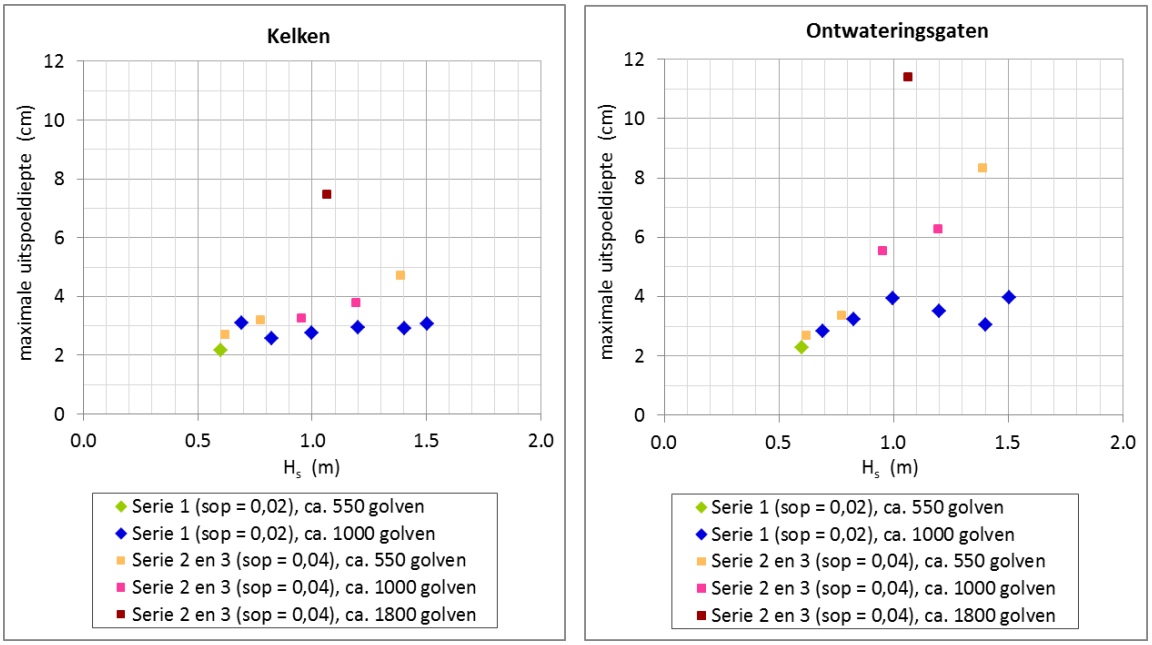
In de grafieken in de bijlagen B.8 t/m B.11 zijn de meetresultaten in meer detail uitgewerkt. In die figuren hebben de blauwe, groene en rode meetpunten betrekking op de raaien op respectievelijk +1,17 m, 0,00 m en -1,17 m ten opzichte van het hart van de goot. Elk meetpunt van de ononderbroken lijnen geeft de gemiddelde uitspoeldiepte van de 6 kelken van de beschouwde zuil. Daarnaast geeft elk meetpunt van de stippellijnen de gemiddelde uitspoeldiepte van de 6 ontwateringsgaten. Individuele gaten zijn dus dieper uitgespoeld.
De dikke zwarte ononderbroken lijnen en stippellijnen geven het gemiddelde van de drie raaien.
Indien elders op het talud opmerkelijk veel uitspoeling geconstateerd werd, is de uitspoeldiepte soms ook gemeten rondom extra zuilen, zie de grijze meetpunten. De dichte en open grijze meetpunten geven de gemiddelde uitspoeldiepte van respectievelijk de 6 kelken en ontwateringsgaten van de beschouwde zuilen.

In Figuur 5.2 is van alle proeven het maximum van de gemiddelde uitspoeldiepte uitgezet tegen de significante golfhoogte, voor zowel de kelken (links) als de ontwateringsgaten (rechts). In de grafieken is door middel van kleur onderscheid gemaakt tussen het aantal golven en de golfsteilheid. De grafieken tonen het verband tussen de uitspoeldiepte en de significante golfhoogte, voor zowel lange als korte golven.

Figuur 5.2 laat zien dat tijdens serie 1 (lange golven, s_{op} = 0,02, zie de groene en blauwe meetpunten) de gemiddelde uitspoeling van de kelken maximaal 2 à 3 cm was (linker figuur), en die van de ontwateringsgaten maximaal 3 à 4 cm (rechter figuur). De kelken zijn doorgaans dus 0 à 1 cm minder diep uitgespoeld dan de ontwateringsgaten. Het valt op dat de maximale gemiddelde uitspoeldiepte niet tot nauwelijks toeneemt naarmate de significante golfhoogte toeneemt. Wel vindt de uitspoeling plaats over een grotere zone van het talud.

Bij serie 2 en 3 (korte golven, s_{op} = 0,04, zie de oranje, magenta en bruine meetpunten) valt op dat de maximale uitspoeldiepte soms beduidend groter is dan bij de lange golven van serie 1 (groene en blauwe meetpunten). De golfsteilheid heeft kennelijk invloed op de uitspoeldiepte. Deze invloed van de golfsteilheid is bij kleine significante golfhoogtes nog niet

erg duidelijk aanwezig, maar wordt steeds duidelijker naarmate de significante golfhoogte toeneemt. De significante golfhoogte heeft bij korte golven (serie 2 en 3) een grotere invloed op de maximale uitspoeldiepte dan bij lange golven (serie 1).



Figuur 5.2 Verband tussen de significante golfhoogte en het maximum van de gemiddelde uitspoeldiepte voor de kelken (links) en de ontwateringsgaten (rechts).

Daarnaast valt op dat het verschil tussen de kelken en ontwateringsgaten bij serie 2 en 3 groter is dan bij serie 1. Het verschil tussen de kelken en ontwateringsgaten wordt groter naarmate de significante golfhoogte en de uitspoeldiepte toenemen. Bij een grote golfhoogte zijn de ontwateringsgaten ongeveer twee keer zo diep uitgespoeld als de kelken.
De gemiddelde uitspoeldiepte van de kelken en ontwateringsgaten is bij proef P10 respectievelijk maximaal circa 4,5 en 8,5 cm (na 643 golven). Bij proef P13 is de gemiddelde uitspoeldiepte van de kelken en ontwateringsgaten respectievelijk maximaal circa 7,5 en 11,5 cm (na 1826 golven).
Zoals in paragraaf 1.2 is genoemd, zijn de kelken vooral ontworpen voor het vasthouden van het inwasmateriaal en het genereren van klemming, terwijl de ontwateringsgaten hoofdzakelijk zijn ontworpen voor het doorvoeren van water door de toplaag en niet zozeer voor het vasthouden van inwasmateriaal. Dit principe is in de proefresultaten duidelijk zichtbaar, zie ook Foto C.16.b.

5.2 Stabiliteit van de steenzetting

De steenzetting is tijdens het onderzoek tweemaal bezweken, namelijk:
- Aan het einde van serie 2 (s_{op} = 0,04)
- Aan het einde van serie 3 (s_{op} = 0,04 met een langdurige belasting)

Na elke proef is de waterstand verlaagd en is de schade geïnventariseerd. De geconstateerde schade aan de steenzetting is ingedeeld volgens de vier schadecategorieën (a t/m d), waarvan de definitie is gegeven in paragraaf 4.1. De steenzetting wordt als bezweken beschouwd als schade van de categorie c of d is opgetreden. De resultaten van de proeven zijn samengevat in Tabel 5.1 (zie ook bijlage A.1). In de tabel is ook de waarde van de

belastingparameter $H_s/(\Delta D)$ gegeven, die hier berekend is met de gemeten gemiddelde soortelijke massa van de zuilen. Er is gebruik gemaakt van het gemiddelde, omdat de schade geïnitieerd is door de vervorming van een groep zuilen tot een kattenrug en niet door individuele zuilen. De gemiddelde soortelijke massa is daarom relevanter dan extreme waarden.
De belangrijkste proeven van elke serie (de proeven met de hoogste significante golfhoogte waarbij schadecategorie a of b is opgetreden en de proeven met de laagste significante golfhoogte waarbij schadecategorie c of d is opgetreden) zijn gekleurd, corresponderend met de kleuren van Figuur 5.3.
Omdat de proefdelen P07 en P07A samen één proef vormen, zijn de golfcondities van de totale proef P07+P07A vermeld. Deze zijn berekend met de formules (3.4) t/m (3.6).
Het weergegeven hoogteverschil betreft het maximale hoogteverschil tussen de rug en het dal van de kattenrug die tijdens de proeven ontstond.

Serie	Proef	h [m]	H_s [m]	T_p [s]	$T_{m-1,0}$ [s]	s_{op} [-]	ξ_{op} [-]	ξ_{om} [-]	N [-]	$H_s/(\Delta D)$ [-]	schade	hoogte-verschil [cm]
1	P01	4,55	0,60	4,41	4,01	0,020	2,37	2,16	497	3,71	a	0
	P02	4,70	0,69	4,71	4,36	0,020	2,35	2,18	1054	4,30	a	1
	P03	4,70	0,83	5,23	4,82	0,019	2,40	2,21	998	5,12	a	1,5
	P04	4,70	1,00	5,64	5,30	0,020	2,35	2,21	1022	6,18	a	2
	P05	4,70	1,20	6,21	5,74	0,020	2,36	2,18	1019	7,45	a	2,5
	P06	4,70	1,40	6,72	6,24	0,020	2,36	2,19	1007	8,70	a	2,5
	P07+P07A	4,70	1,50	6,96	6,37	0,020	2,36	2,16	1055	9,32	a	3,5
2	P08	4,70	0,95	3,99	3,76	0,038	1,70	1,60	1007	5,92	a	4
	P09	4,70	1,19	4,39	4,20	0,040	1,67	1,60	1042	7,41	b	7
	P10	4,70	1,39	4,78	4,54	0,039	1,69	1,60	643	8,62	d	16,5
3	P11	4,55	0,62	3,29	3,07	0,037	1,74	1,63	604	3,85	a	0
	P12	4,55	0,78	3,56	3,39	0,039	1,68	1,60	550	4,82	a	0
	P13	4,70	1,07	4,17	4,02	0,039	1,68	1,62	1826	6,61	d	13,5

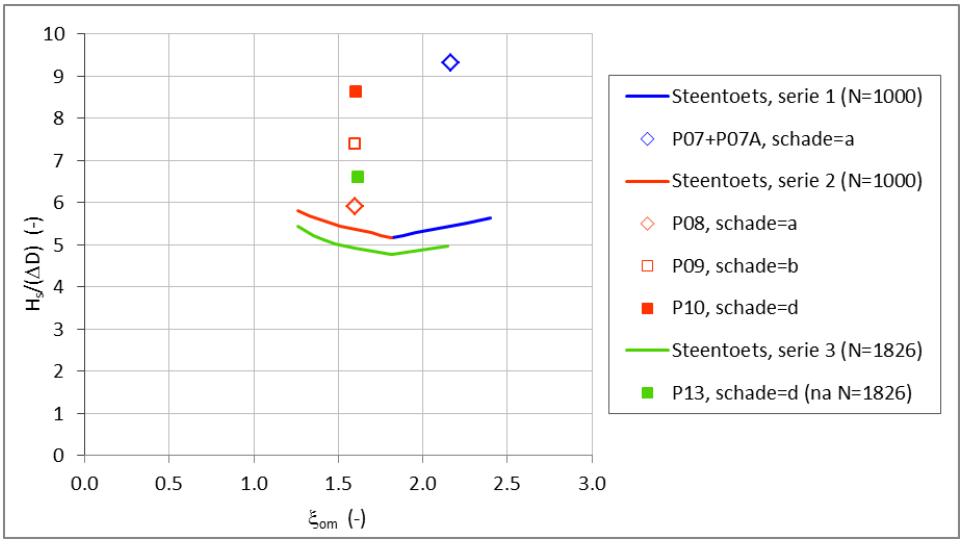
Tabel 5.1 Overzicht van het proevenprogramma met de gerealiseerde golfcondities en de gerealiseerde schade. De belangrijkste proeven zijn gekleurd, corresponderend met de kleuren van Figuur 5.3.

Voor elke serie is met Steentoets berekend bij welke significante golfhoogte de steenzetting volgens Steentoets zal bezwijken, zie Tabel 5.2. In de tabel is ook de bijbehorende belasting-parameter $H_s/(\Delta D)$ gegeven. De Steentoetsberekeningen zijn uitgevoerd met Steentoets2014 versie v14.1.2.1 (Klein Breteler, 2014).
Bij de berekening met Steentoets is gebruikgemaakt van een aangepaste waarde van de wrijvingscoëfficiënt. Deze is gebaseerd op de metingen zoals beschreven in paragraaf 3.1.3. Daarnaast is in de berekeningen gebruikgemaakt van het theoretische mengsel van het inwasmateriaal zoals beschreven in paragraaf 3.1.4.

Serie	Invoer			Resultaat				
	s_{op} [-]	s_{om} [-]	N [-]	H_s [m]	T_p [s]	ξ_{op} [-]	ξ_{om} [-]	$H_s/(\Delta D)$ [-]
1	0,020	0,024	1000	0,87	5,28	2,36	2,14	5,39
2	0,039	0,043	1000	0,88	3,80	1,69	1,54	5,45
3	0,039	0,042	1826	0,80	3,63	1,69	1,54	4,97

Tabel 5.2 Resultaten van de berekeningen met Steentoets.

De resultaten van de proeven en de Steentoetsberekeningen zijn grafisch weergegeven in Figuur 5.3. Op de horizontale as staat de brekerparameter ξ_{om} (zie paragraaf 3.3 voor de definitie). Deze brekerparameter is gebaseerd op de spectrale periodemaat $T_{m-1,0}$. Op de verticale as staat de belastingparameter $H_s/(\Delta D)$ op basis van de gemiddelde soortelijke massa.
Van elke serie is de proef weergegeven met de hoogste significante golfhoogte waarbij schadecategorie a of b (geen schade) is opgetreden en de proef met de laagste significante golfhoogte waarbij schadecategorie c of d (wel schade) is opgetreden. De meetpunten met de open symbolen hebben betrekking op schadecategorie a of b, en de dichte symbolen op schadecategorie c of d.
De lijnen geven de resultaten van Steentoetsberekeningen. De meetpunten en lijnen met dezelfde kleur horen bij elkaar. Voor de berekeningen is uitgegaan van de maten en eigenschappen zoals gemeten in de Deltagoot.



Figuur 5.3 Resultaten van de belangrijkste proeven en de overeenkomstige berekeningen met Steentoets.

In de figuur is te zien dat alle punten boven de lijnen liggen die met Steentoets zijn berekend. Tijdens serie 1 was geen schade ontstaan en ligt zelfs het meetpunt met schade a (geen schade) ver boven de berekende lijn. De steenzetting voldeed tijdens deze serie beduidend beter dan aanvankelijk op basis van Steentoets verwacht werd.
Tijdens serie 2 ontstond wel schade. Zowel de meetpunten met schade a en b (geen schade) als het meetpunt met schade d (wel schade) liggen boven de berekende lijn. De meetpunten liggen echter wel een stuk dichter bij de berekende lijn dan het meetpunt van serie 1. De steenzetting lijkt derhalve gevoeliger voor korte golven dan voor lange golven. Hoewel tijdens serie 1 en 2 dezelfde steenzetting is gebruikt, trad tijdens serie 2 beduidend meer vervorming van het talud op dan tijdens serie 1 bij vergelijkbare significante golfhoogtes. Ook spoelde tijdens serie 2 meer inwasmateriaal uit de gaten dan tijdens serie 1 bij vergelijkbare significante golfhoogtes.
Na serie 2 moest een grote schade hersteld worden en is de steenzetting opnieuw aangebracht, met uitzondering van de onderste drie rijen met sets. Er is gebruikgemaakt van de zuilen uit de voorgaande series, die al enigszins aan slijtage onderhevig waren door het over het talud bewegende inwasmateriaal. Tijdens serie 3 ontstond schade na 1826 golven. Dat was wat eerder dan op basis van de resultaten van de series 1 en 2 verwacht werd, maar desondanks ligt het meetpunt ruim boven de lijn die met Steentoets is berekend voor een proefduur van 1826 golven. De steenzetting voldeed tijdens alle series dus beter dan aanvankelijk op basis van Steentoets verwacht werd.

5.3 Stabiliteitsfactor

Op basis van de drie uitgevoerde proevenseries is voor RONA®ton een stabiliteitsfactor berekend, waarmee het resultaat van Steentoetsberekeningen zodanig zal worden gecorrigeerd dat het overeenkomt met de proefresultaten uit de Deltagoot, rekening houdend met een veiligheidsfactor. Deze stabiliteitsfactor is voor elk type steenzetting anders en wordt voor de gebruiker onzichtbaar opgenomen in de code van Steentoets. De benodigde toplaagdikte volgens Steentoets zal in het programma gedeeld worden door deze stabiliteitsfactor om zo rekening te houden met de specifieke stabiliteit van het betreffende type steenzetting. Door toepassing van de stabiliteitsfactor zal een type steenzetting met een hoge stabiliteitsfactor (die goed scoorde tijdens de Deltagootproeven) in een concreet ontwerp een kleinere toplaagdikte nodig hebben dan een type steenzetting met een lage stabiliteitsfactor. De met Rijkswaterstaat afgesproken procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor op basis van de Deltagootproeven is gedetailleerd beschreven in bijlage D. In de onderhavige paragraaf is dit uitgewerkt voor RONA®ton.

De eerste stap bij het bepalen van de stabiliteitsfactor is het per serie vaststellen van de belasting waarbij de steenzetting is bezweken. Voor serie 1 en 2 (korteduurproeven met ongeveer hetzelfde aantal golven) is daarvoor de significante golfhoogte waarbij de steenzetting bezwijkt van belang: de bezwijkgolfhoogte $H_{s,bezwijk}$. Voor serie 3 (langeduurproef met dezelfde significante golfhoogte) is het aantal golven tot bezwijken van belang.

- *Serie 1*:
  Wanneer tijdens een korteduurproevenserie schade ontstaat, is conform de procedure uit bijlage D aangehouden dat $H_{s,bezwijk}$ gelijk is aan het gemiddelde van de golfhoogte waarbij daadwerkelijk bezwijken is opgetreden (schadecategorie c of d) en de golfhoogte van de proef met de hoogste golfhoogte in dezelfde serie waarbij nog geen bezwijken is opgetreden (schadecategorie a of b).
  Tijdens serie 1 was echter geen schade ontstaan ondanks een maximale golfhoogte H_s = 1,50 m. Als tijdens de korteduurproeven bij de maximale golfhoogte nog geen schade is opgetreden, wordt er een fictieve proef toegevoegd met een 15% hogere golfhoogte, omdat het gebruikelijk is om in het proevenprogramma met golfhoogte-stappen van ongeveer 15% te werken. Conform de procedure wordt aangenomen dat bij die fictieve proef wél schade aan de steenzetting zou zijn opgetreden, dus bij H_s = 1,73 m. Dat resulteert in een bezwijkgolfhoogte $H_{s,bezwijk}$ = (1,50+1,73)/2 = 1,62 m.
- *Serie 2*:
  Tijdens serie 2 was nog geen schade opgetreden tijdens proef P09 (H_s = 1,19 m), maar wel tijdens P10 (H_s = 1,39 m). Dat resulteert in een bezwijkgolfhoogte $H_{s,bezwijk}$ = 1,29 m.
- *Serie 3*:
  Voor de langeduurproef (proef P13) geldt naast de significante golfhoogte en golfperiode van de proef het aantal golven tot bezwijken als het resultaat van de proef, dus $H_{s,bezwijk}$ = 1,07 m, T_p = 4,17 s en N = 1826. De eerste twee proeven van deze serie worden niet meegeteld omdat het ingolfproeven betreffen, waarna de steenzetting opnieuw was ingewassen.

Zoals genoemd, is de stabiliteitsfactor een correctiefactor op de benodigde toplaagdikte die volgens Steentoets benodigd is. Voor het berekenen van de stabiliteitsfactor zijn conform de procedure uit bijlage D per serie de volgende waarden nodig:

$D_{ST\ eigen\ gewicht}$ = de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets (als gerekend wordt met alleen het eigen gewicht, dus zonder klemming), bij de bezwijkgolfhoogte van de betreffende serie (m)

$D_{Steentoets}$ = de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets (als gerekend wordt met klemming, etc.), bij de bezwijkgolfhoogte van de betreffende serie (m)

$D_{in\ modelproeven}$ = de toplaagdikte die toegepast is in de Deltagoot (m), dus $D_{in\ modelproeven}$ = 0,145 m

De benodigde toplaagdiktes $D_{ST\ eigen\ gewicht}$ en $D_{Steentoets}$ volgen uit Steentoetsberekeningen. Hiervoor is gebruikgemaakt van Steentoets2014 versie v14.1.2.1 (Klein Breteler, 2014). In de berekeningen zijn de tijdens het Deltagootonderzoek geconstateerde bezwijkgolfhoogtes als uitgangspunt genomen. Voor elke proevenserie is met Steentoets (rekenend met de geconstateerde bezwijkgolfhoogte en met stabiliteitsfactor = 1) de toplaagdikte berekend die volgens Steentoets bij de geconstateerde bezwijkgolfhoogte nog net voldoende is. Voor het berekenen van $D_{Steentoets}$ is gerekend mét klemming en voor het berekenen van $D_{ST\ eigen\ gewicht}$ is gerekend zónder klemming.

De Steentoetsberekening zijn uitgevoerd met de waarden zoals gemeten in het model, dus op schaal. Er is gerekend met de gemeten gemiddelde soortelijke massa van het beton, de gemeten karakteristieke korrelgrootte D_{f15} van het filter (D_{f15} = korrelgrootte die door 15% op basis van gewicht wordt onderschreden), de gemeten dikte van de filterlaag, de gemeten golfcondities, de gemeten taludhelling, et cetera. Voor de dikte van de steenzetting is de hoogte van de zetstenen aangehouden. Daarnaast is in de berekeningen uitgegaan van de karakteristieke korrelgroottes van het theoretische mengsel van het inwasmateriaal zoals beschreven in paragraaf 3.1.4.

Conform de procedure wordt de stabiliteitsfactor vervolgens voor elke serie afzonderlijk bepaald met formule (5.1).

$$f_{stab} = \left(\frac{D_{Steentoets}}{D_{in\ modelproeven}} - \frac{D_{Steentoets}}{D_{ST\ eigen\ gewicht}} \right) / \gamma + \frac{D_{Steentoets}}{D_{ST\ eigen\ gewicht}} \qquad (5.1)$$

Met:

f_{stab} = stabiliteitsfactor voor een bepaald type steenzetting (de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets moet gedeeld worden door deze stabiliteitsfactor om rekening te houden met de specifieke stabiliteit van het betreffende type steenzetting) (-)

γ = veiligheidsfactor (-)

De waarde van de veiligheidsfactor γ wordt bepaald op basis van de standaardafwijking in de proefresultaten van alle drie de series (berekend met $D_{Steentoets}/D_{in\ modelproeven}$). Hiervoor wordt de volgende formule gebruikt, die gebaseerd is op een Student-verdeling en een onderschrijdingskans van 10%:

- Drie proevenseries: $\gamma = 1{,}1 + 1{,}89 \cdot \sigma$ (5.2)

Met:

σ = standaardafwijking in de proefresultaten (-)

Het gemiddelde van de stabiliteitsfactoren van de afzonderlijke proevenseries betreft de stabiliteitsfactor die voor het beproefde steenzettingtype wordt aangehouden als eindresultaat. De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in Tabel 5.3 en Tabel 5.4.

Proevenserie	$N_{langeduur}$ [-]	$H_{s,bezwijk}$ [m]	$H_s/(\Delta D)$ [-]	$D_{in\ modelproeven}$ [m]	$D_{Steentoets}$ [m]	$D_{ST\ eigen\ gewicht}$ [m]
Serie 1, s_{om} = 0,024	n.v.t.	1,616*	10,04	0,145	0,255	0,356
Serie 2, s_{om} = 0,043	n.v.t.	1,292	8,00	0,145	0,200	0,258
Serie 3, s_{om} = 0,042	1826	1,066	6,64	0,145	0,178	0,228

Tabel 5.3 Geschatte $H_s/(\Delta D)$ bij begin van bezwijken conform de procedure uit bijlage D, de beproefde toplaagdikte en de resultaten van berekeningen met Steentoets (= geschatte golfhoogte bij bezwijken, omdat tijdens de hoogst mogelijke golven in de Deltagoot er geen bezwijken ontstond).*

Proevenserie	$D_{Steentoets}$/ $D_{in\ modelproeven}$ [-]			$D_{Steentoets}$/ $D_{ST\ eigen\ gewicht}$ [-]	f_{stab} [-]
Serie 1, s_{om} = 0,024	1,759			0,716	1,36
Serie 2, s_{om} = 0,043	1,379			0,775	1,15
Serie 3, s_{om} = 0,042	1,228			0,781	1,06
	μ	σ	γ		μ
Serie 1 t/m 3	1,46	0,27	1,62		**1,19**

Tabel 5.4 Berekende stabiliteitsfactor, veiligheidsfactor en enkele tussenresultaten.

Conform de met Rijkswaterstaat afgesproken procedure (zie bijlage D) resulteren de Deltagootproeven in de volgende stabiliteitsfactor voor RONA®ton: f_{stab} = 1,19.

Hoewel de proeven zijn uitgevoerd met RONA®ton van 29 cm hoog (op schaal 1:2, dus 14,5 cm hoog in de Deltagoot) is de afgeleide stabiliteitsfactor toepasbaar in een brede range van zuilhoogtes, namelijk van 15 cm tot 60 cm hoog. Daarbij geldt als voorwaarde dat de vorm van de zetstenen niet wezenlijk mag worden aangepast bij het wijzigen van de zuilhoogte. Het toepassingsgebied strekt zich daardoor, afhankelijk van de omstandigheden, uit tot een significante golfhoogte van maximaal ca. 4,5 m.

6 Conclusies

Om de stabiliteit van RONA®ton onder golfaanval te onderzoeken is een dijk met een hoogte van 8,3 m en een buitentalud met een helling van 1:3 opgebouwd in de Deltagoot (in de Noordoostpolder) van Deltares. Deze dijk is tussen Z = 2,0 m en Z = 5,5 m boven de gootbodem voorzien van een bekleding met de volgende eigenschappen (maten in modelschaal):

- Hoogte van de dijk t.o.v. de gootbodem: 8,3 m
- Taludhelling: 1:3
- RONA®ton:
  - Gemiddelde zuilhoogte: D = 14,5 cm
  - Soortelijke massa: gemiddeld ρ_s = 2112 kg/m^3
  - Open oppervlak (bij voet van de zuilen, inclusief voetjes): Ω = 10%
- Filterlaag:
  - Gemiddelde dikte: serie 1 en 2: b = 7,5 cm; serie 3: b = 7,4 cm
  - Gradering: serie 1 en 2: D_{f15} = 10,9 mm, D_{f50} = 18,5 mm en D_{f90} = 35,2 mm; serie 3: D_{f15} = 11,1 mm, D_{f50} = 18,1 mm en D_{f90} = 32,4 mm

Opgemerkt wordt dat het inwasmateriaal in twee fasen is aangebracht. Eerst is circa 1/7^e deel van de kelken en ontwateringsgaten gevuld met steenslag 8-11 mm. Daarna zijn de gaten volledig afgevuld met wat grover steenslag 11-16 mm. Voor het bepalen van de stabiliteitsfactor in paragraaf 5.3 is gebruikgemaakt van de karakteristieke waarde van het mengsel van deze fracties: D_{i15} = 10,4 mm.

De steenzetting is getest door middel van drie proevenseries. Eerst zijn twee proevenseries uitgevoerd met korteduurproeven met een oplopende golfhoogte, maar een gelijkblijvende golfsteilheid (serie 1 met s_{op} = 0,02 en serie 2 met s_{op} = 0,04). Daarna is tijdens de derde proevenserie een langeduurproef uitgevoerd met een gelijkblijvende golfhoogte en golfsteilheid (s_{op} = 0,04).

De resultaten zijn samengevat in Tabel 5.1 en Figuur 5.3 (in paragraaf 5.2). In de figuur is te zien dat alle punten boven de lijnen liggen die met Steentoets (Steentoets2014 versie v14.1.2.1) zijn berekend:

- Tijdens serie 1 was geen schade ontstaan en ligt zelfs het meetpunt met schade a (geen schade) ver boven de berekende lijn. De steenzetting voldeed tijdens deze serie beduidend beter dan aanvankelijk op basis van Steentoets verwacht werd.
- Tijdens serie 2 ontstond wel schade. Zowel de meetpunten met schade a en b (geen schade) als het meetpunt met schade d (wel schade) liggen boven de berekende lijn. De meetpunten liggen echter wel een stuk dichter bij de berekende lijn dan het meetpunt van serie 1. De steenzetting lijkt derhalve gevoeliger voor korte golven dan voor lange golven. Hoewel tijdens serie 1 en 2 dezelfde steenzetting is gebruikt, trad tijdens serie 2 beduidend meer vervorming van het talud op dan tijdens serie 1 bij vergelijkbare golfhoogtes. Ook spoelde tijdens serie 2 meer inwasmateriaal uit de gaten dan tijdens serie 1 bij vergelijkbare golfhoogtes.
- Tijdens serie 3 ontstond schade na 1826 golven. Dat was wat eerder dan op basis van de resultaten van de series 1 en 2 verwacht werd, maar desondanks ligt het meetpunt ruim boven de lijn die met Steentoets is berekend voor een proefduur van 1826 golven.

De steenzetting voldeed tijdens alle series dus beter dan aanvankelijk op basis van Steentoets verwacht werd.

Na elke proef is de uitspoeldiepte van het inwasmateriaal gemeten. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen de kelken en ontwateringsgaten. De belangrijkste resultaten van deze metingen zijn weergegeven in Figuur 5.2 (in paragraaf 5.1). Enkele trends vallen op:

- Bij serie 2 en 3 (korte golven, s_{op} = 0,04) is de maximale uitspoeldiepte soms beduidend groter dan bij de lange golven van serie 1 (s_{op} = 0,02), bij vergelijkbare golfhoogtes. Deze invloed van de golfsteilheid is bij kleine golfhoogtes nog niet erg duidelijk aanwezig, maar wordt steeds duidelijker naarmate de golfhoogte toeneemt. De invloed van de golfhoogte op de maximale uitspoeldiepte is bij de korte golven (serie 2 en 3) groter dan bij de lange golven (serie 1).
- Daarnaast valt op dat het verschil tussen de uitspoeldiepte van de kelken en ontwateringsgaten bij serie 2 en 3 groter is dan bij serie 1. Het verschil tussen de kelken en ontwateringsgaten wordt groter naarmate de golfhoogte en de uitspoeldiepte toenemen. Bij een grote golfhoogte zijn de ontwateringsgaten ongeveer twee keer zo diep uitgespoeld als de kelken.

Op basis van de proefresultaten is de stabiliteitsfactor bepaald (zie paragraaf 5.3). Hoe beter de steenzetting presteert, des te hoger is deze factor. De proefresultaten leiden tot de volgende waarde van de stabiliteitsfactor voor RONA®ton: f_{stab} = 1,19. Deze factor is opgenomen in Steentoets2015.

Hoewel de proeven zijn uitgevoerd met RONA®ton van 29 cm hoog (op schaal 1:2, dus 14,5 cm hoog in de Deltagoot) is de afgeleide stabiliteitsfactor toepasbaar in een brede range van zuilhoogtes, namelijk van 15 cm tot 60 cm hoog. Daarbij geldt als voorwaarde dat de vorm van de zetstenen niet wezenlijk mag worden aangepast bij het wijzigen van de zuilhoogte. Het toepassingsgebied strekt zich daardoor, afhankelijk van de omstandigheden, uit tot een significante golfhoogte van maximaal ca. 4,5 m.

7 Referenties

Bezuijen, A., A.M. Burger, en M. Klein Breteler (1990), *Taludbekledingen van gezette steen*, ISBN: 90-9003232-0

Klein Breteler, M. (2014), *Documentatie Steentoets2014, Excel-programma voor het berekenen van de stabiliteit van steenzettingen*, rapport 1208045-009-HYE-0008, versie 4.1.1, Deltares, juli 2014

Mansard, E., en E. Funke (1980), *The measurement of incident and reflected spectra using a least-square method*, Proc. ICCE'80, ASCE pp 154-172, Sydney

Wolters, G. (2010), *Rona®ton+ proeven in de Deltagoot*, rapport 1201537, versie 1.3, Deltares, juni 2010

A Tabellen

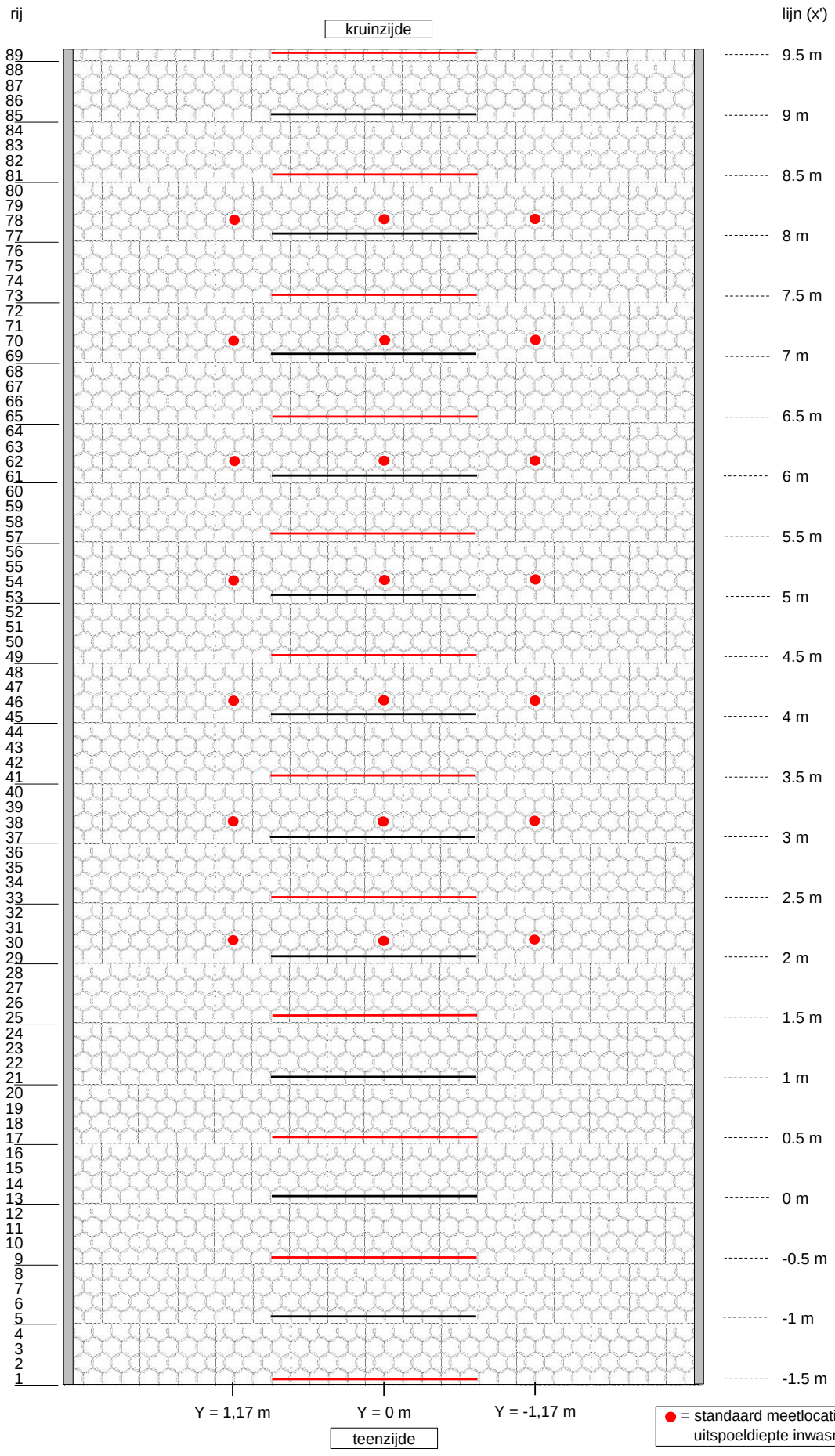
Serie	Proef	h [m]	H_s [m]	T_p [s]	$T_{m-1,0}$ [s]	s_{op} [-]	ξ_{op} [-]	ξ_{om} [-]	N [-]	duur [h]	$H_s/(\Delta D)$ [-]	Schade-categorie	max. hoogte-verschil [cm]
1	P01	4.55	0.60	4.41	4.01	0.020	2.37	2.16	497	0.50	3.71	a	0
1	P02	4.70	0.69	4.71	4.36	0.020	2.35	2.18	1054	1.11	4.30	a	1
1	P03	4.70	0.83	5.23	4.82	0.019	2.40	2.21	998	1.18	5.12	a	1.5
1	P04	4.70	1.00	5.64	5.30	0.020	2.35	2.21	1022	1.28	6.18	a	2
1	P05	4.70	1.20	6.21	5.74	0.020	2.36	2.18	1019	1.40	7.45	a	2.5
1	P06	4.70	1.40	6.72	6.24	0.020	2.36	2.19	1007	1.50	8.70	a	2.5
1	*P07*	*4.70*	*1.50*	*6.94*	*6.38*	*0.020*	*2.36*	*2.17*	*591*	*0.85*	*9.31*		
1	*P07A*	*4.70*	*1.51*	*6.99*	*6.35*	*0.020*	*2.37*	*2.15*	*464*	*0.70*	*9.34*		
1	P07+P07A	4.70	1.50	6.96	6.37	0.020	2.36	2.16	1055	1.55	9.32	a	3.5
2	P08	4.70	0.95	3.99	3.76	0.038	1.70	1.60	1007	0.99	5.92	a	4
2	P09	4.70	1.19	4.39	4.20	0.040	1.67	1.60	1042	1.08	7.41	b	7
2	P10	4.70	1.39	4.78	4.54	0.039	1.69	1.60	643	0.74	8.62	d	16.5
3	P11	4.55	0.62	3.29	3.07	0.037	1.74	1.63	604	0.50	3.85	a	0
3	P12	4.55	0.78	3.56	3.39	0.039	1.68	1.60	550	0.50	4.82	a	0
3	P13	4.70	1.07	4.17	4.02	0.039	1.68	1.62	1826	1.86	6.61	d	13.5

Bijlage A.1, Proevenprogramma met de gerealiseerde golfcondities

Lijn (x')	X [m t.o.v. golfschot]	Z [m t.o.v. gootbodem]
0.0	182.23	2.46
0.5	182.71	2.62
1.0	183.18	2.78
1.5	183.66	2.93
2.0	184.13	3.09
2.5	184.61	3.25
3.0	185.08	3.41
3.5	185.56	3.57
4.0	186.03	3.73
4.5	186.50	3.89
5.0	186.98	4.04
5.5	187.45	4.21
6.0	187.93	4.36
6.5	188.40	4.52
7.0	188.88	4.68
7.5	189.35	4.83
8.0	189.82	5.00
8.5	190.30	5.15
9.0	190.77	5.32
9.5	191.25	5.46
10.0	191.72	5.62
10.5	192.20	5.78
11.0	192.67	5.93
11.5	193.14	6.10
12.0	193.62	6.26
12.5	194.09	6.42
13.0	194.57	6.59
13.5	195.04	6.74
14.0	195.52	6.91
14.5	195.99	7.06
15.0	196.46	7.22
15.5	196.94	7.38
16.0	197.41	7.54
16.5	197.89	7.69
17.0	198.36	7.85
17.5	198.84	8.02
18.0	199.31	8.19
18.5	199.79	8.29

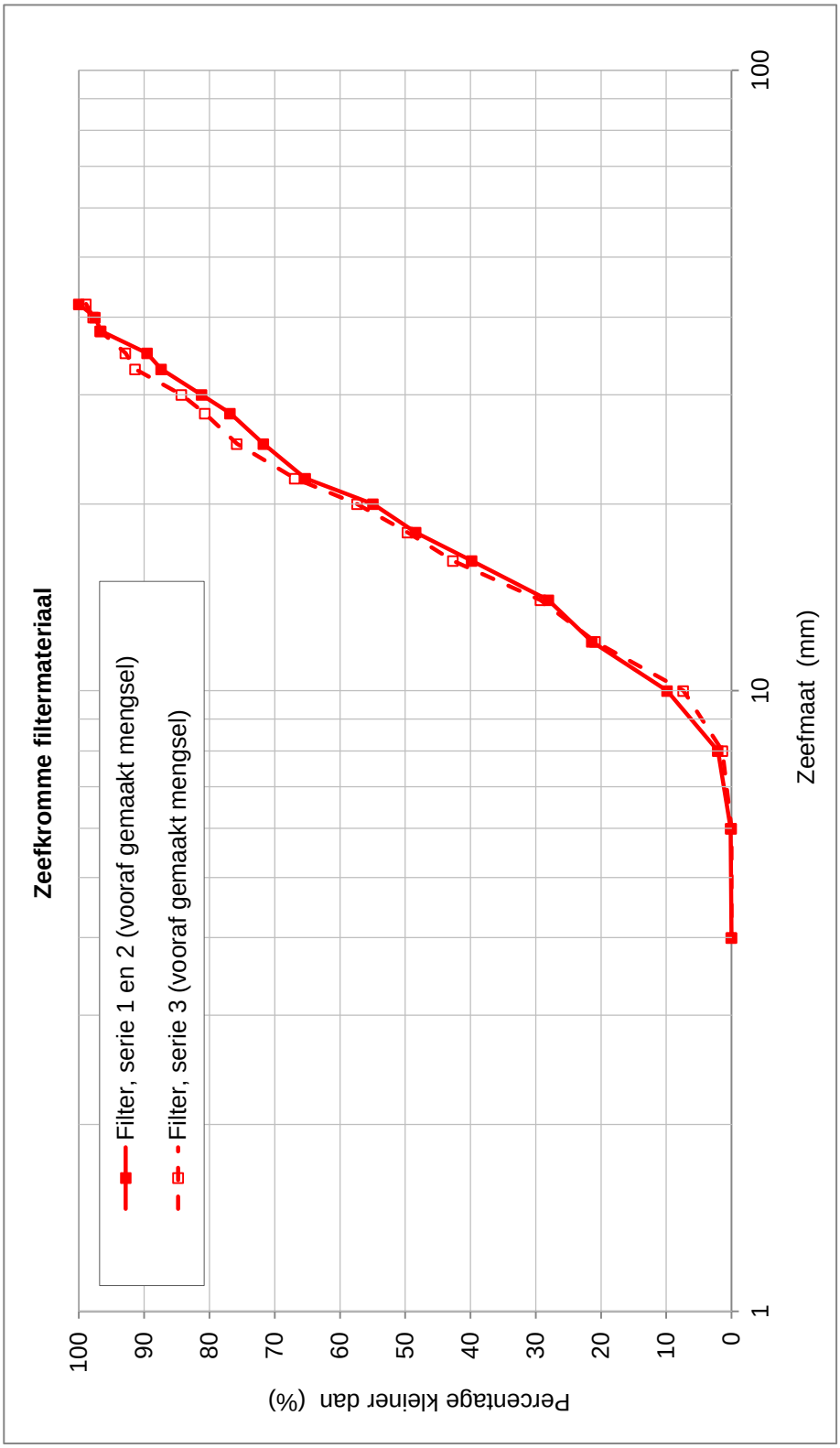
Bijlage A.2, Posities van lijnmarkering op talud

B Figuren

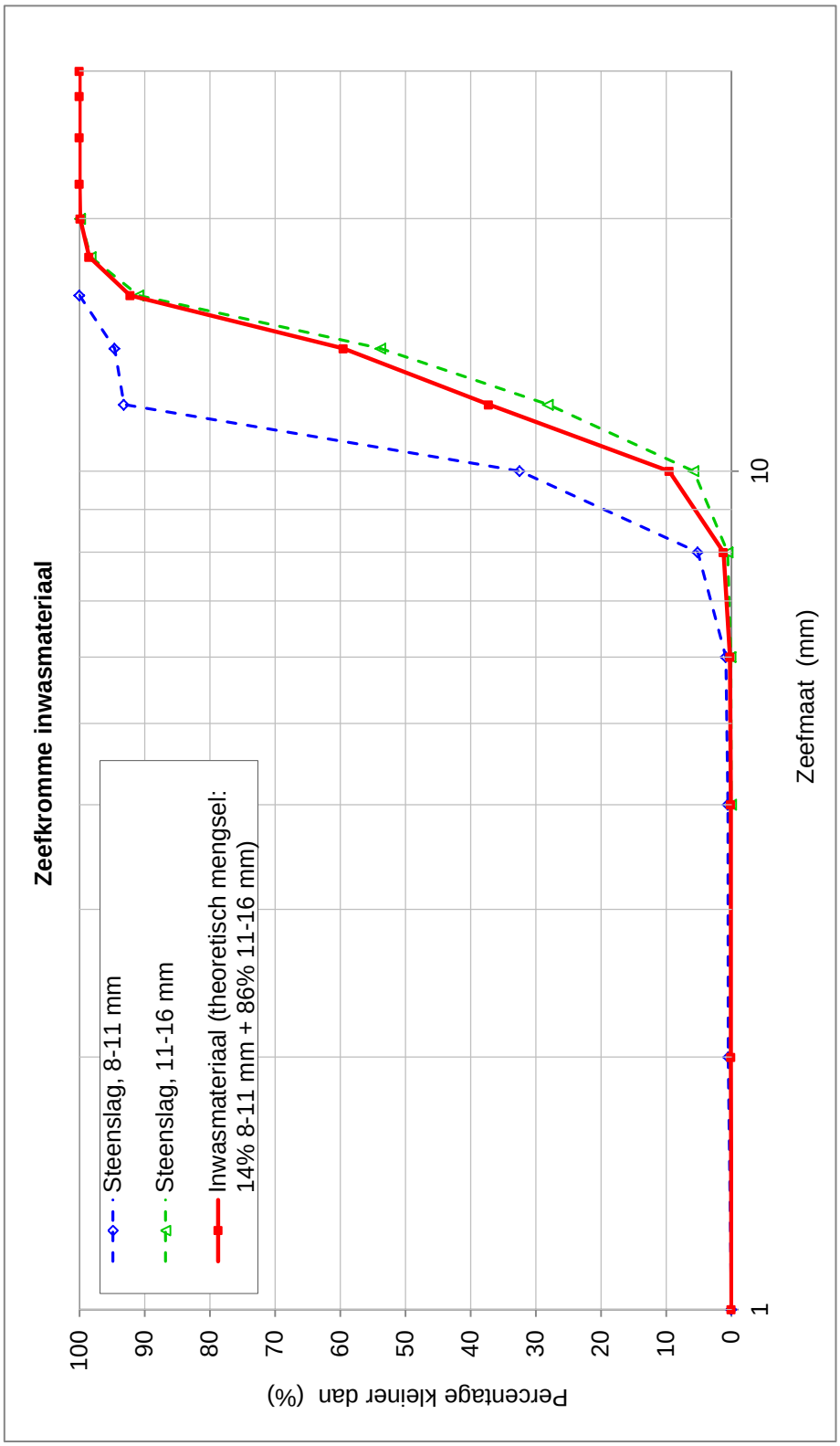


Plaatsingspatroon RONA®ton, locatie lijnmarkering en meet-locaties van de uitspoeldiepte van het inwasmateriaal (schematisch)

Deltares	1208618.011	Fig. B.1

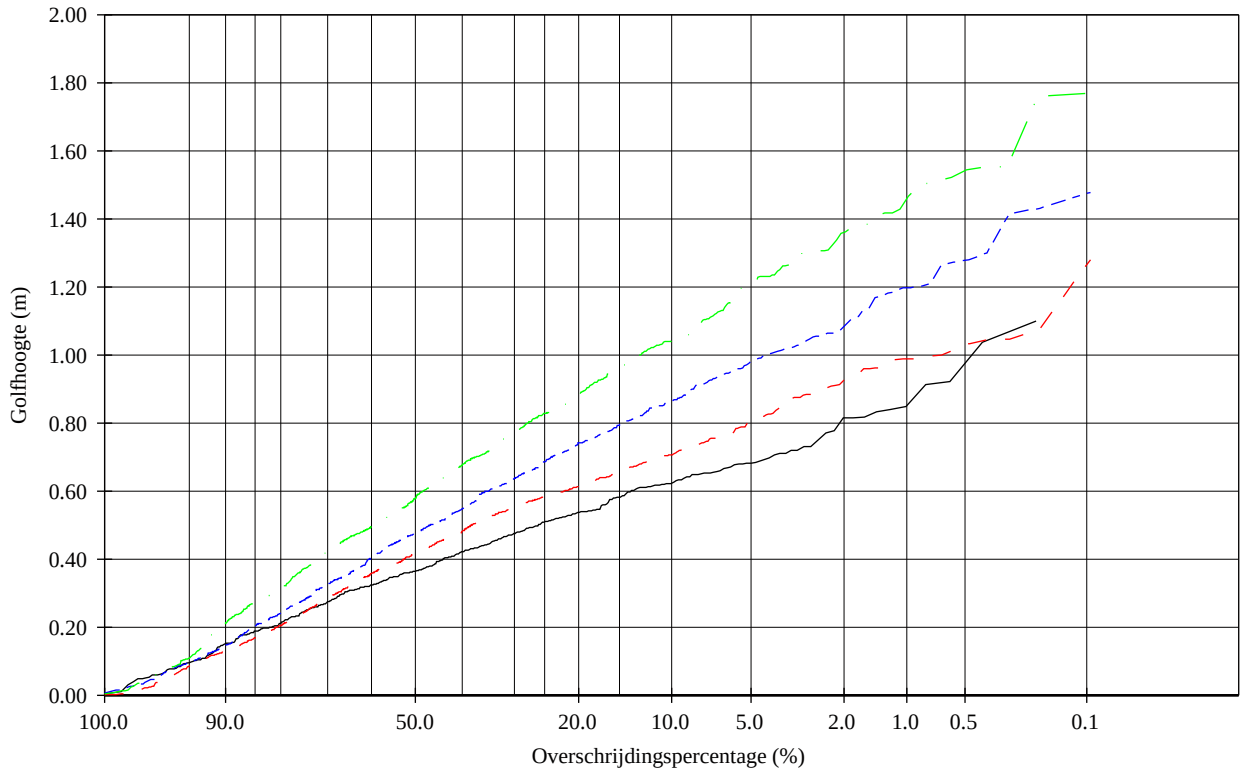


Zeefkrommes van het filtermateriaal		
Deltares	1208618.011	Fig. B.2

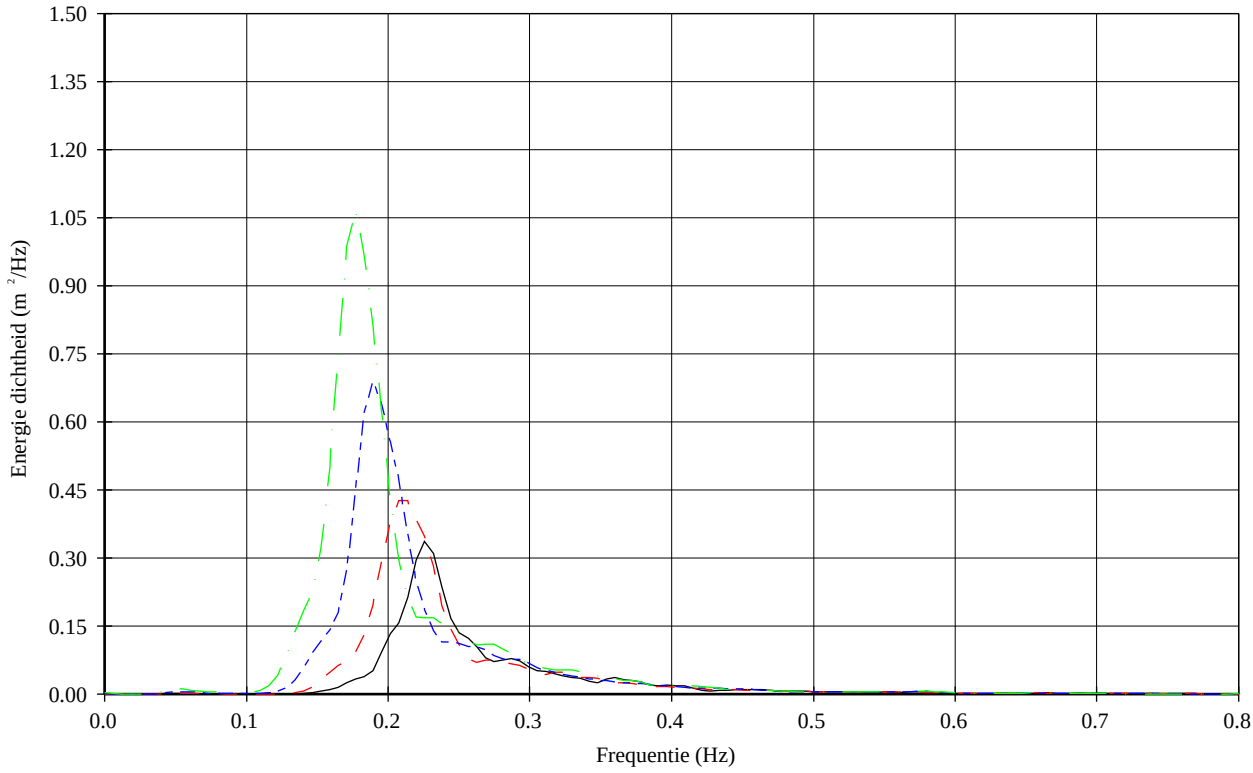


Zeefkromme van het inwasmateriaal

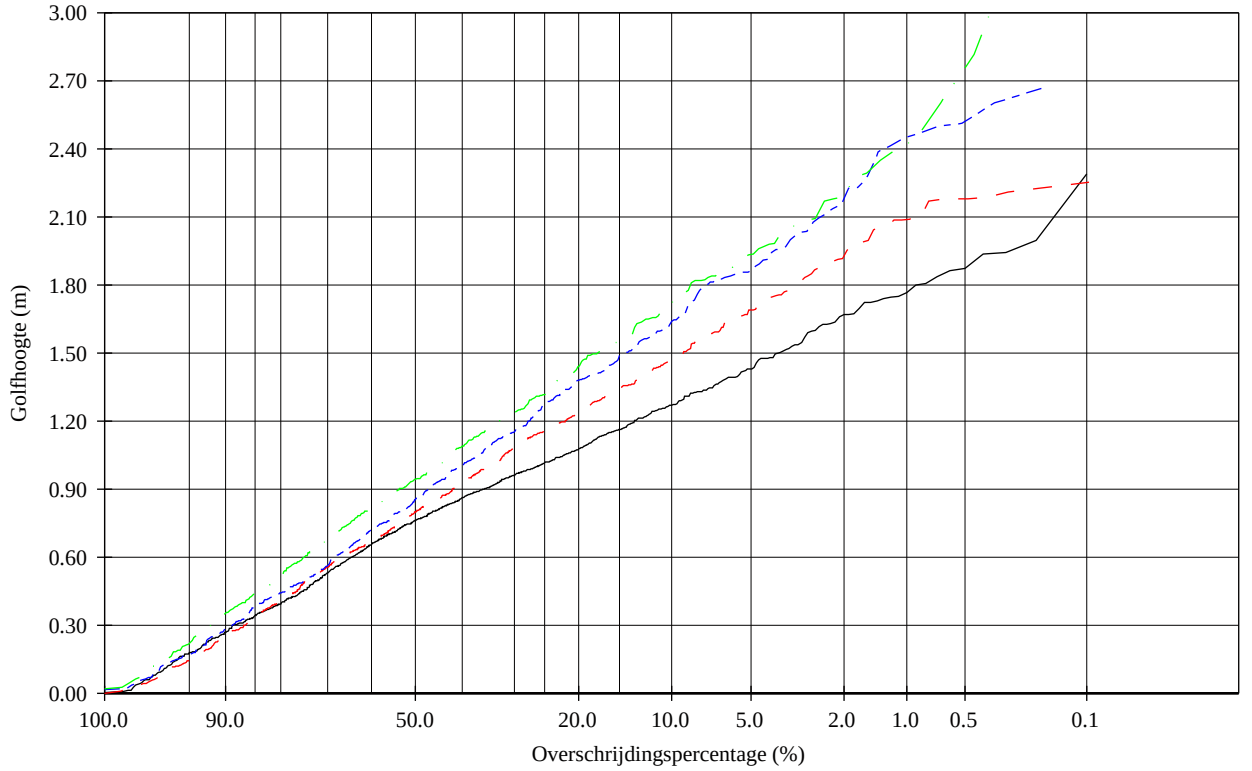
Deltares	1208618.011	Fig. B.3



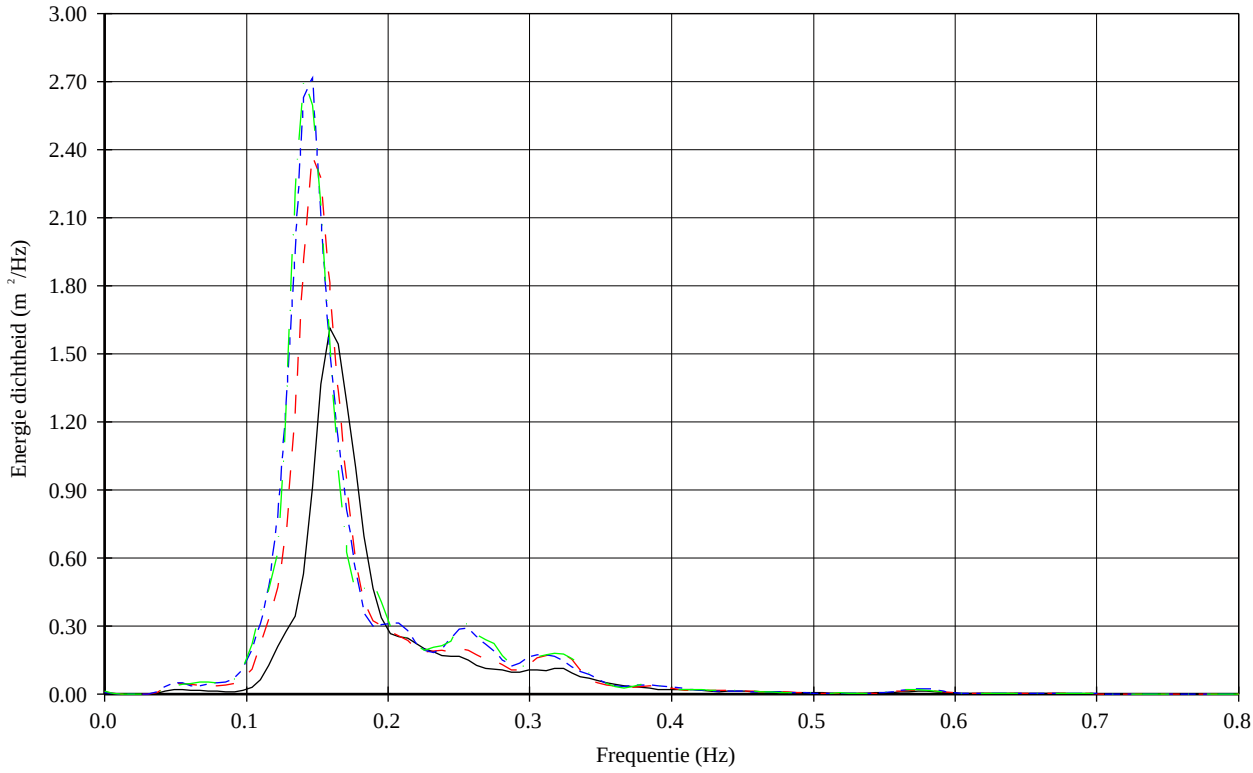
Serie 1 P01 (Hm0 = 0.60 m) (Tp = 4.41 s) (w.s = 4.55 m)
Serie 1 P02 (Hm0 = 0.69 m) (Tp = 4.71 s) (w.s = 4.70 m)
Serie 1 P03 (Hm0 = 0.83 m) (Tp = 5.23 s) (w.s = 4.70 m)
Serie 1 P04 (Hm0 = 1.00 m) (Tp = 5.64 s) (w.s = 4.70 m)



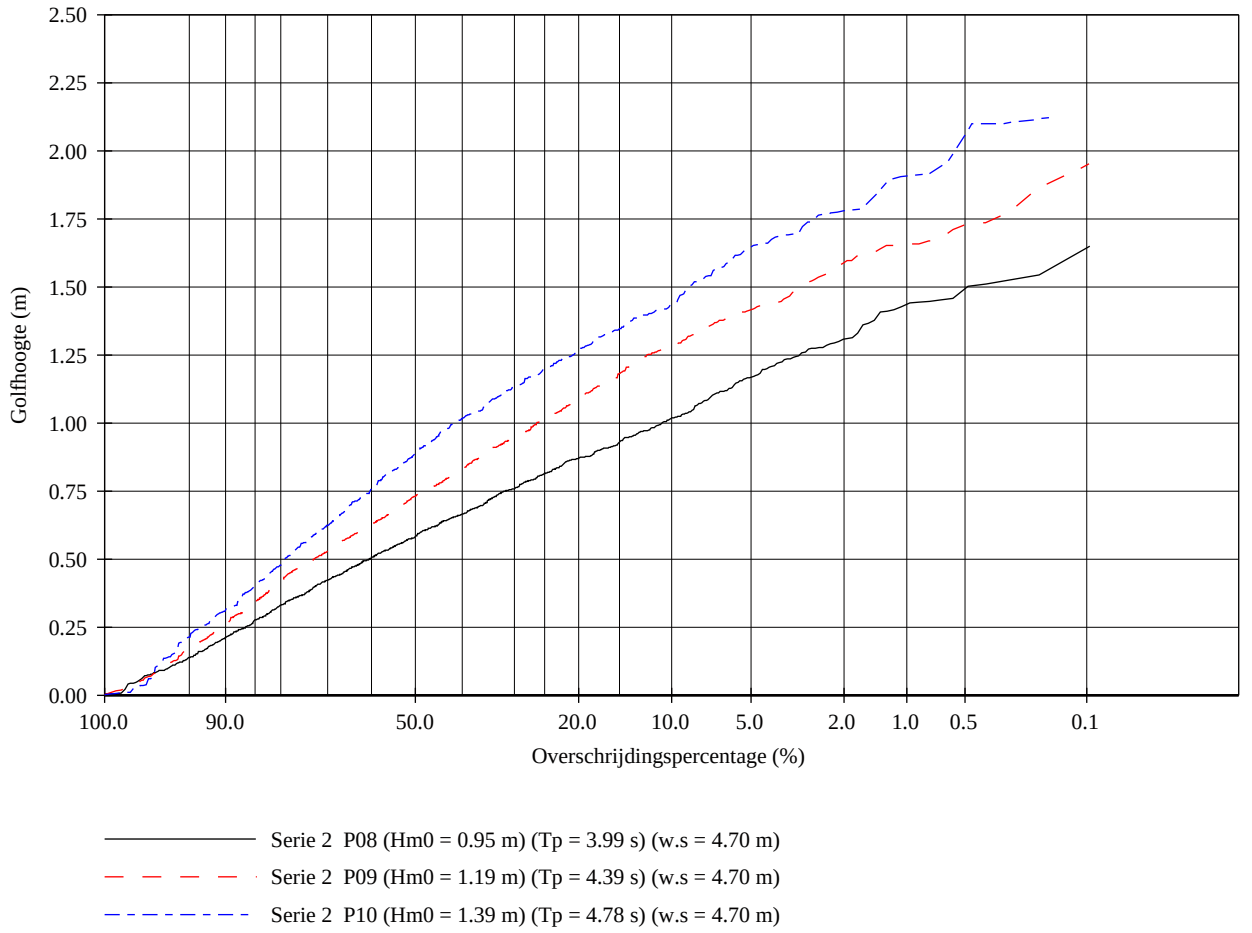
Golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra Serie 1 (proeven P01, P02, P03, P04)		
	Inkomende golven	
Deltares	1208618.011	FIG. B.4

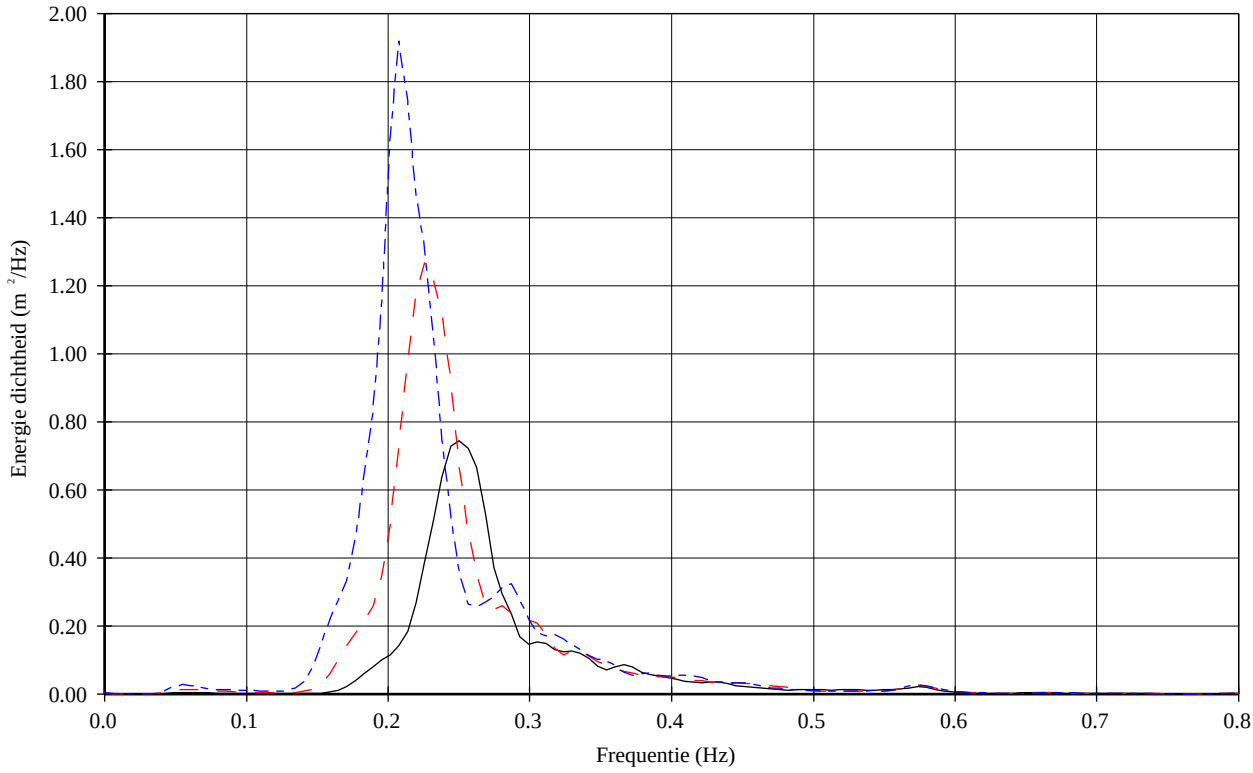


Serie 1 P05 (Hm0 = 1.20 m) (Tp = 6.21 s) (w.s = 4.70 m)
Serie 1 P06 (Hm0 = 1.40 m) (Tp = 6.72 s) (w.s = 4.70 m)
Serie 1 P07 (Hm0 = 1.50 m) (Tp = 6.94 s) (w.s = 4.70 m)
Serie 1 P07A (Hm0 = 1.51 m) (Tp = 6.99 s) (w.s = 4.70 m)



Golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra Serie 1 (proeven P05, P06, P07, P07A)		
	Inkomende golven	
Deltares	1208618.011	FIG. B.5





Golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra

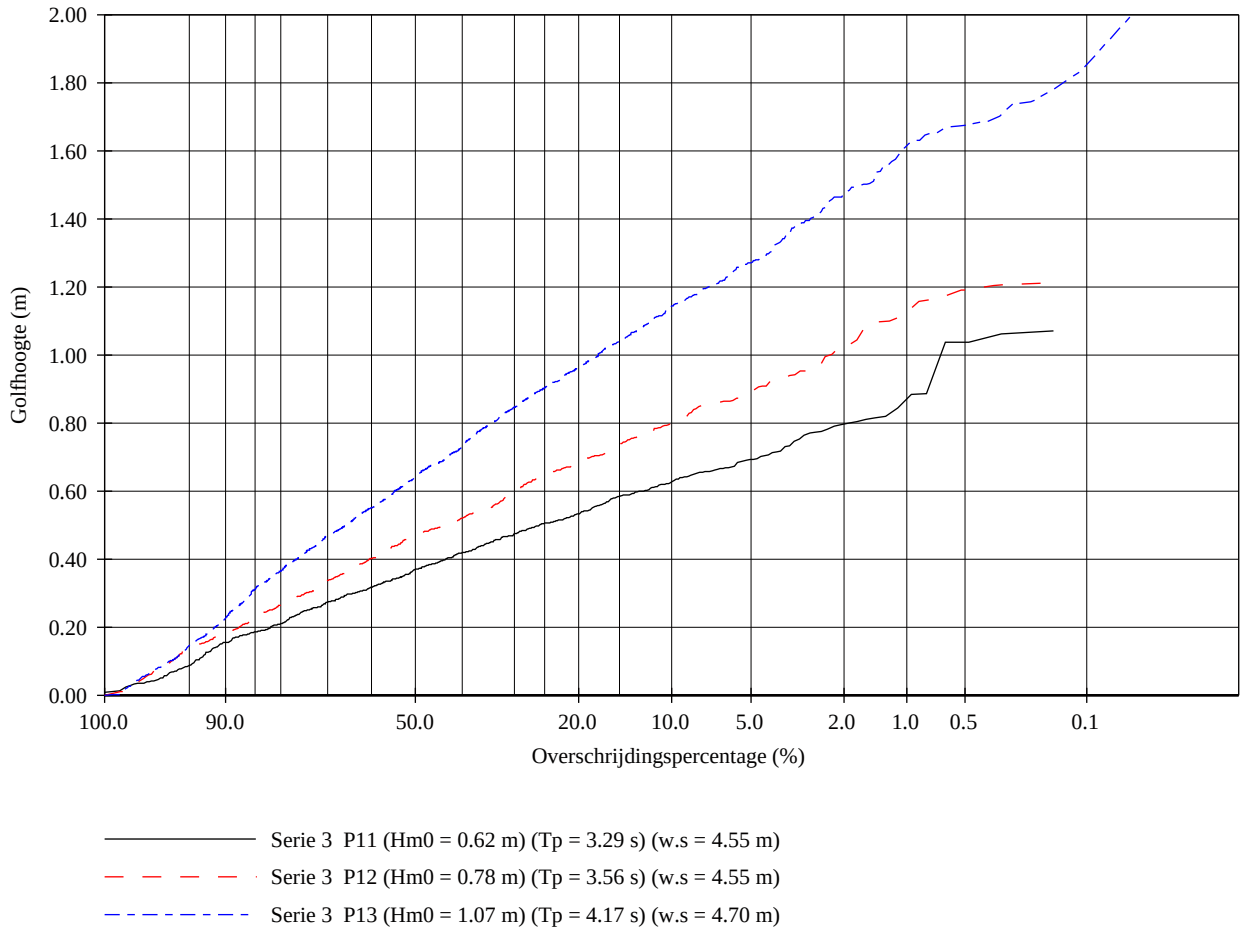
Serie 2 (proeven P08, P09, P10)

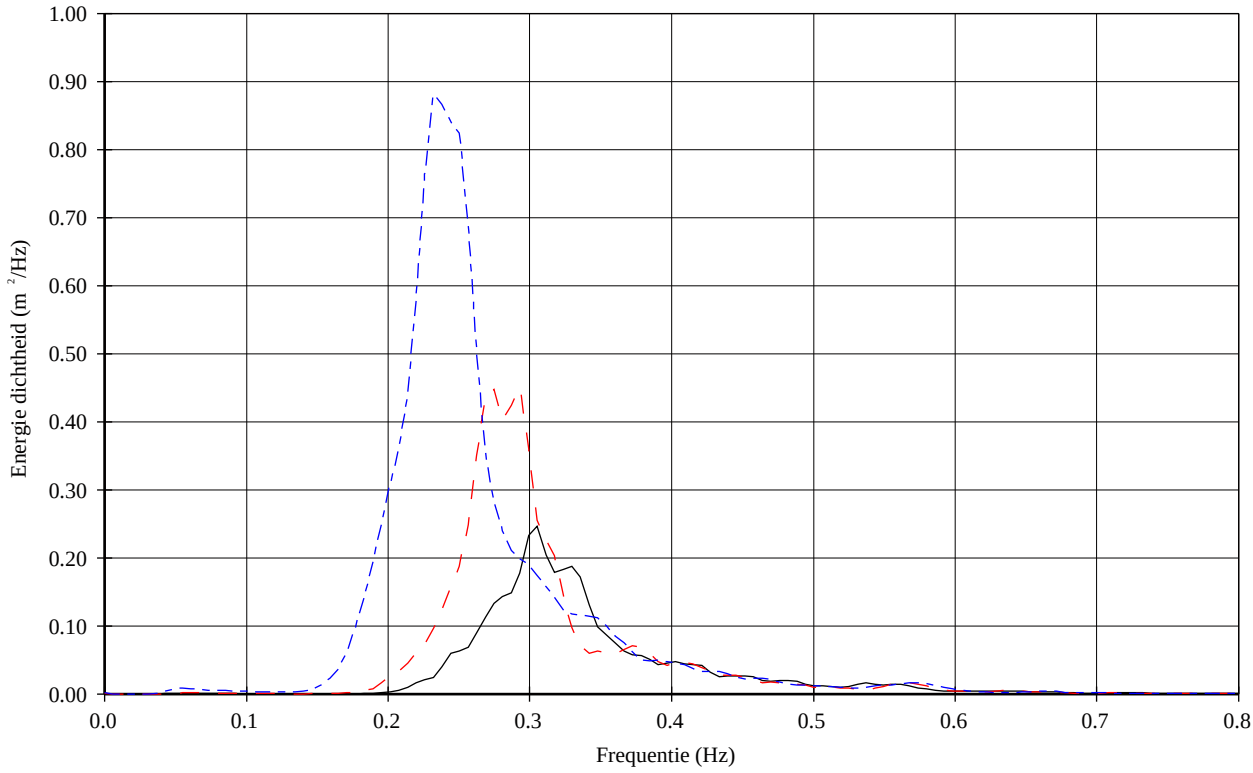
Inkomende golven

Deltares

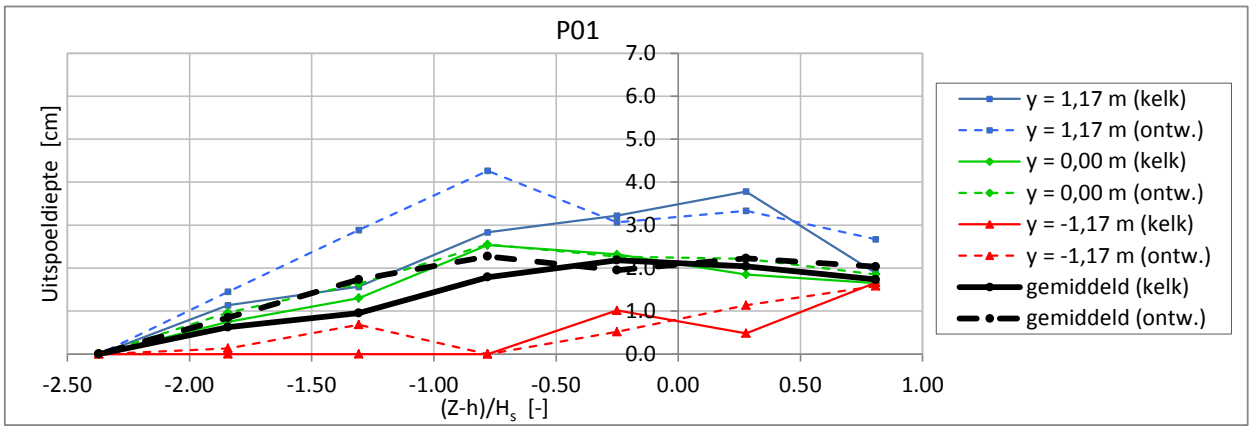
1208618.011

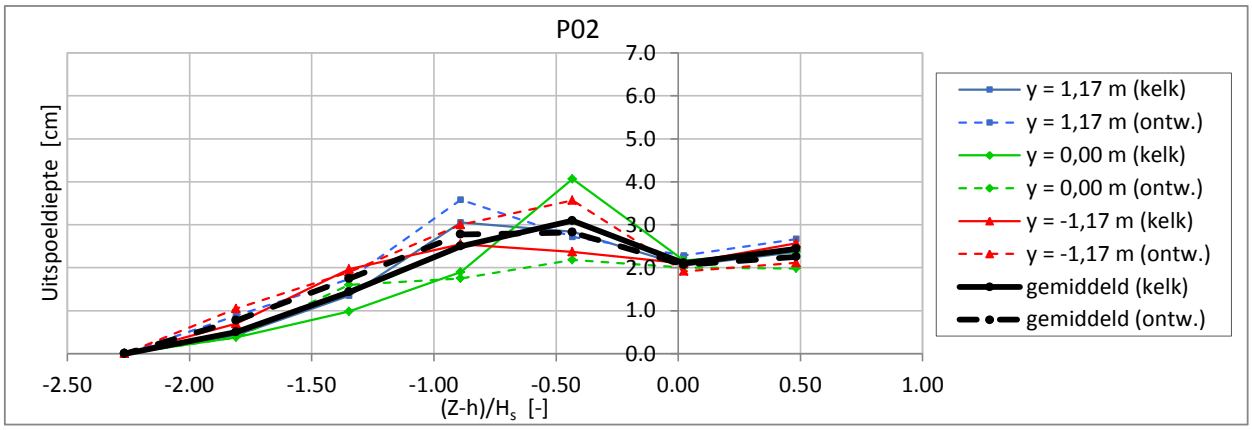
FIG. B.6

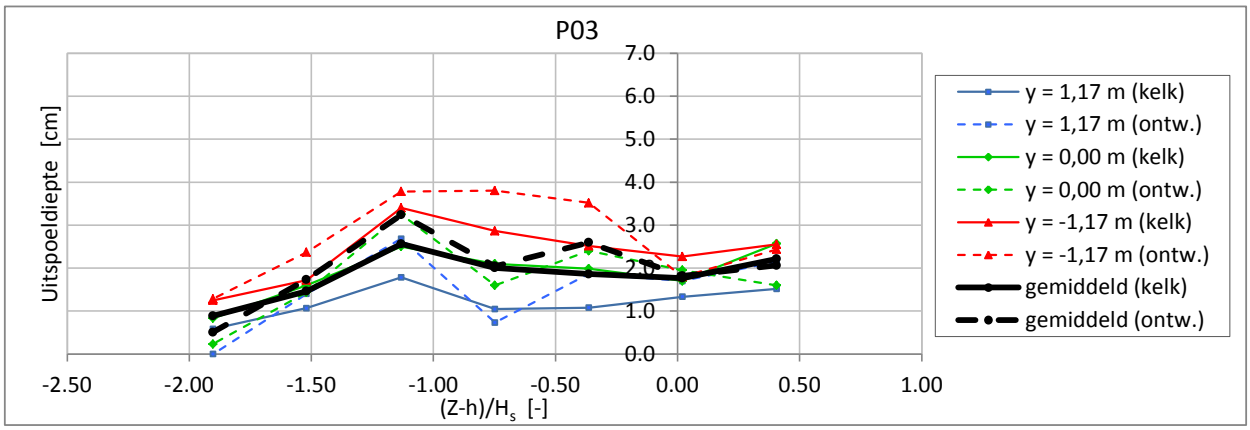


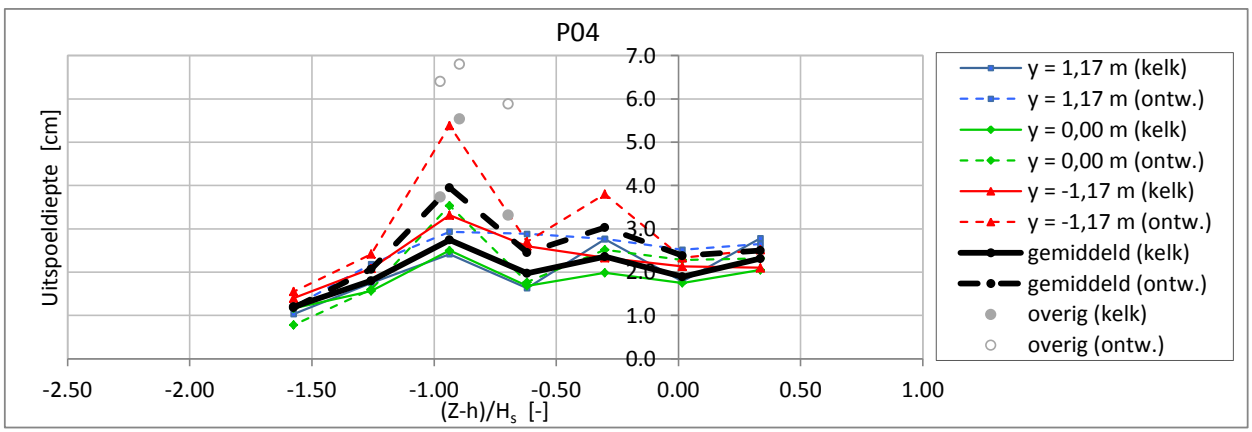


Golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra Serie 3 (proeven P08, P09, P10)		
	Inkomende golven	
Deltares	1208618.011	FIG. B.7

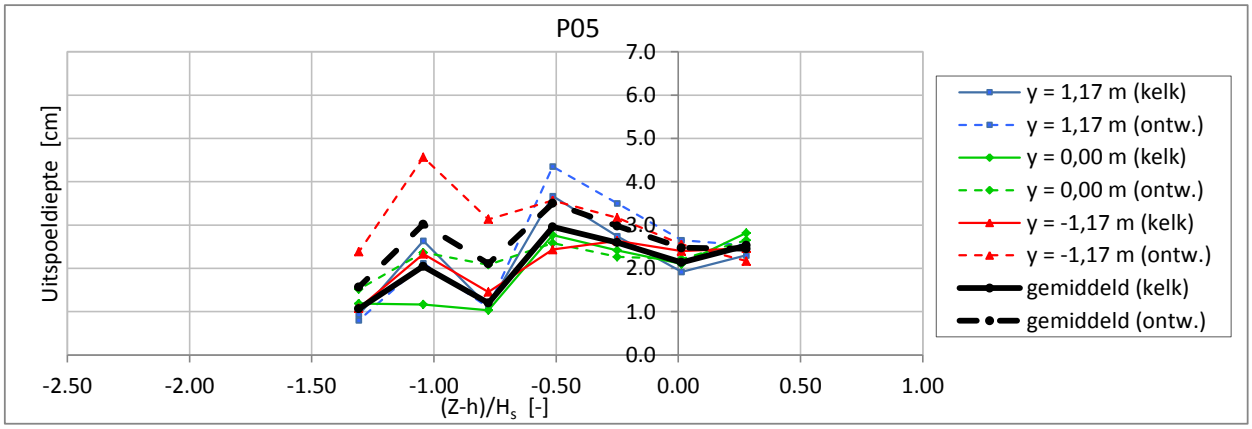


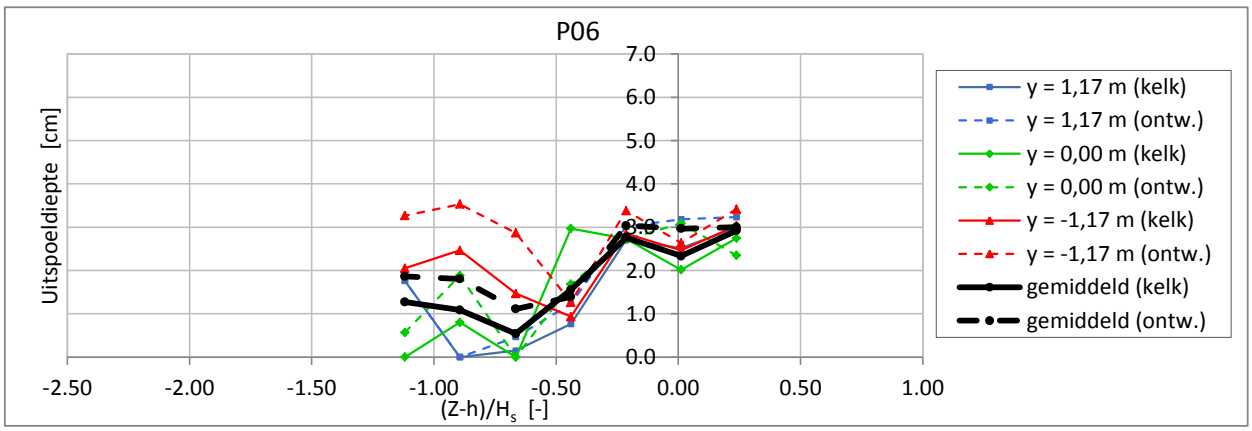


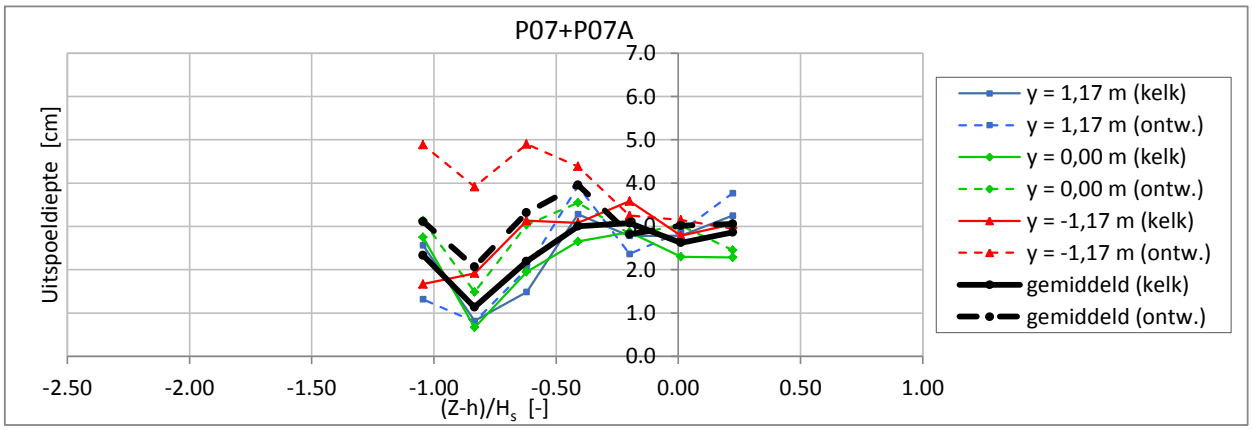




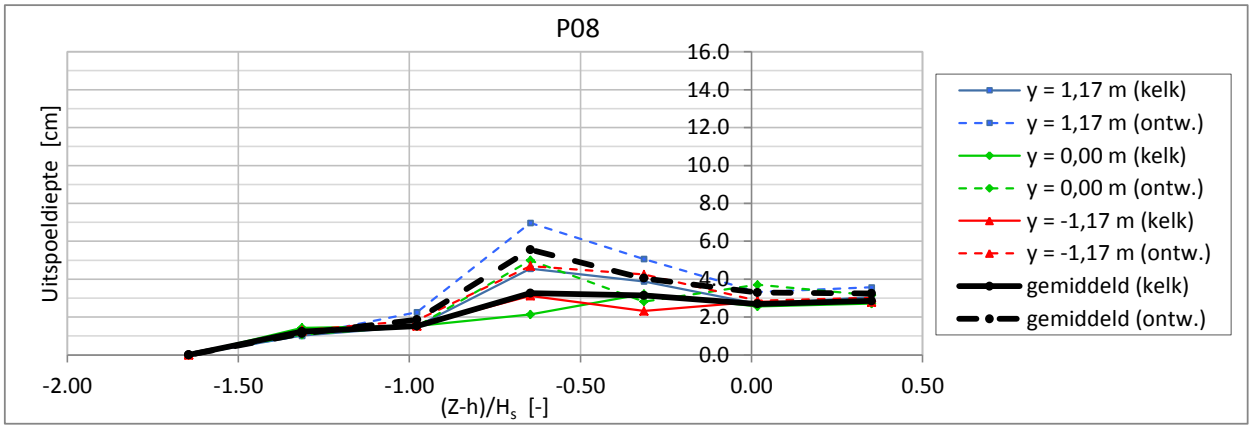
Uitspoeldiepte van het inwasmateriaal		Serie 1
		Proeven P01, P02, P03 en P04
Deltares	1208618.011	Fig. B.8

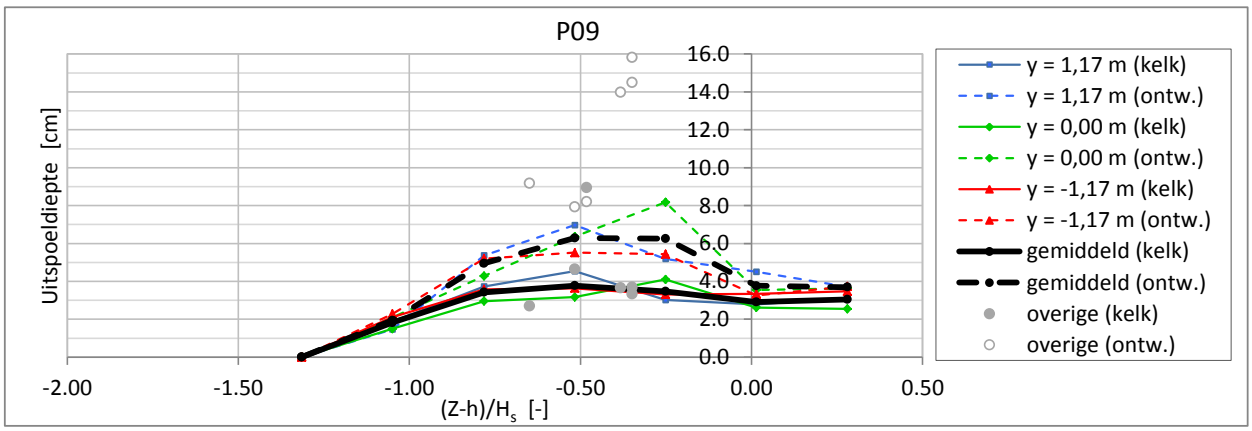


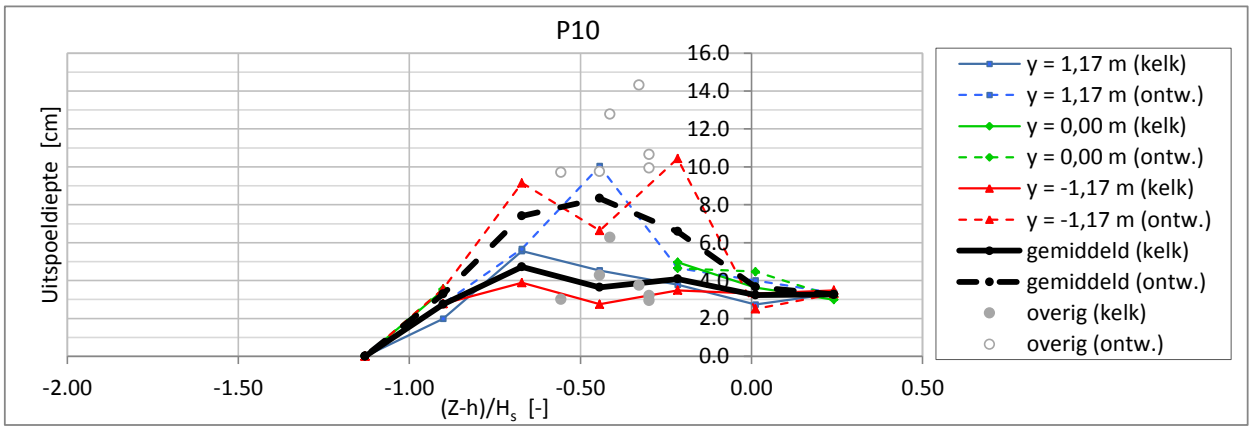




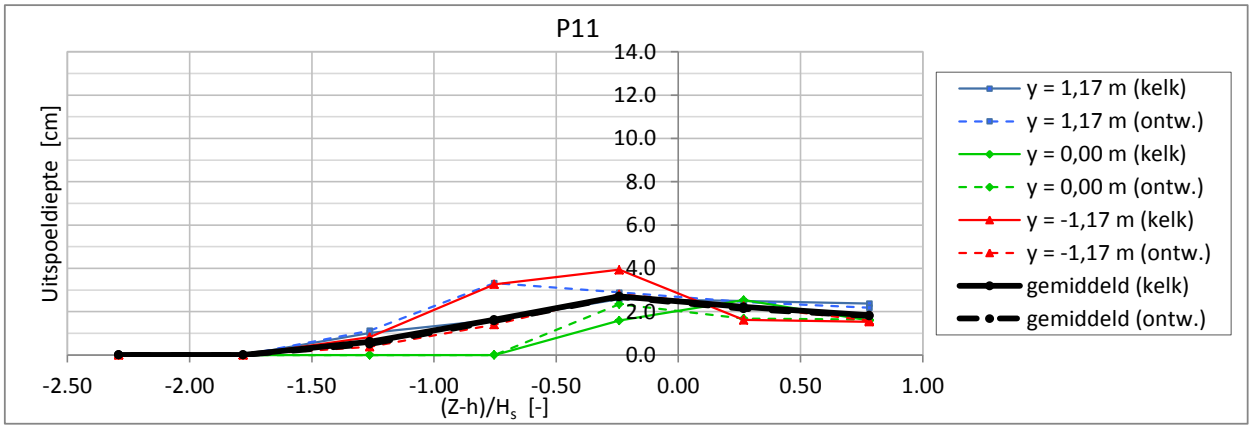
Uitspoeldiepte van het inwasmateriaal		Serie 1
	Proeven P05, P06 en P07+P07A	
Deltares	1208618.011	Fig. B.9

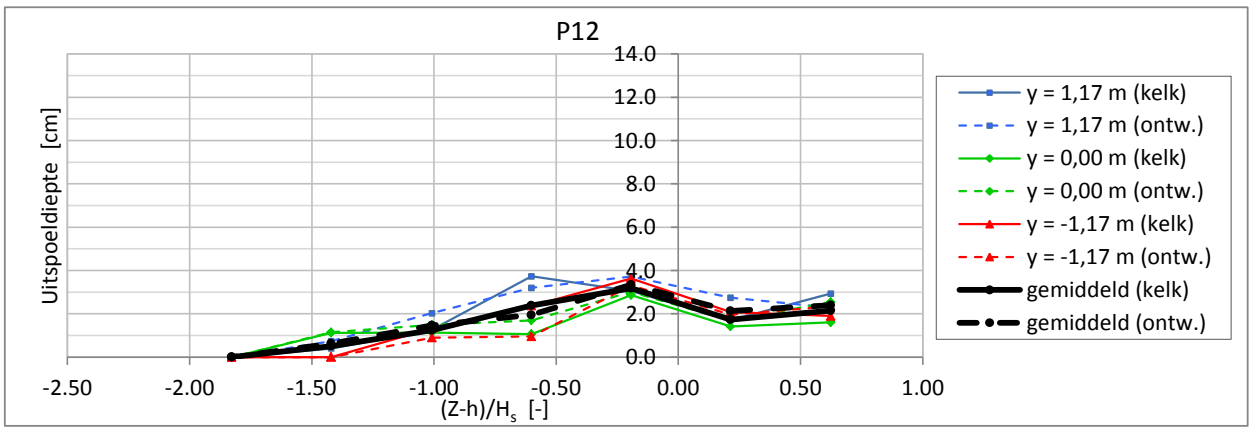


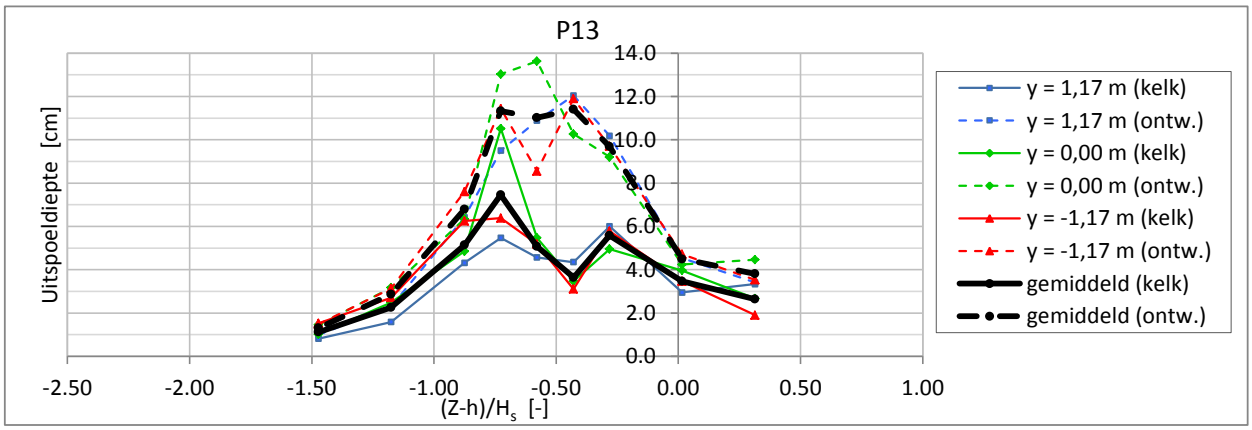




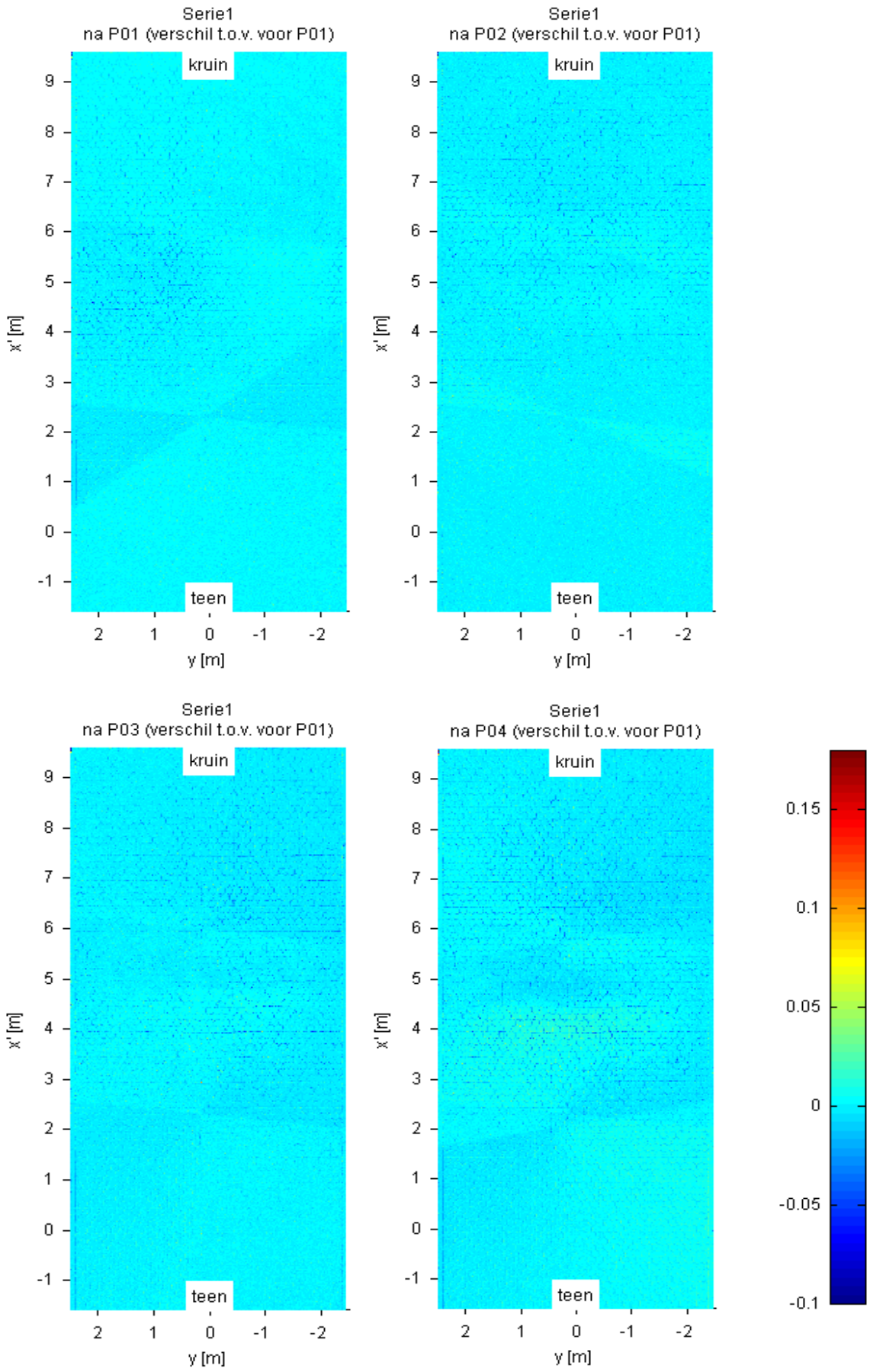
Uitspoeldiepte van het inwasmateriaal		Serie 2
	Proeven P08, P09 en P10	
Deltares	1208618.011	Fig. B.10



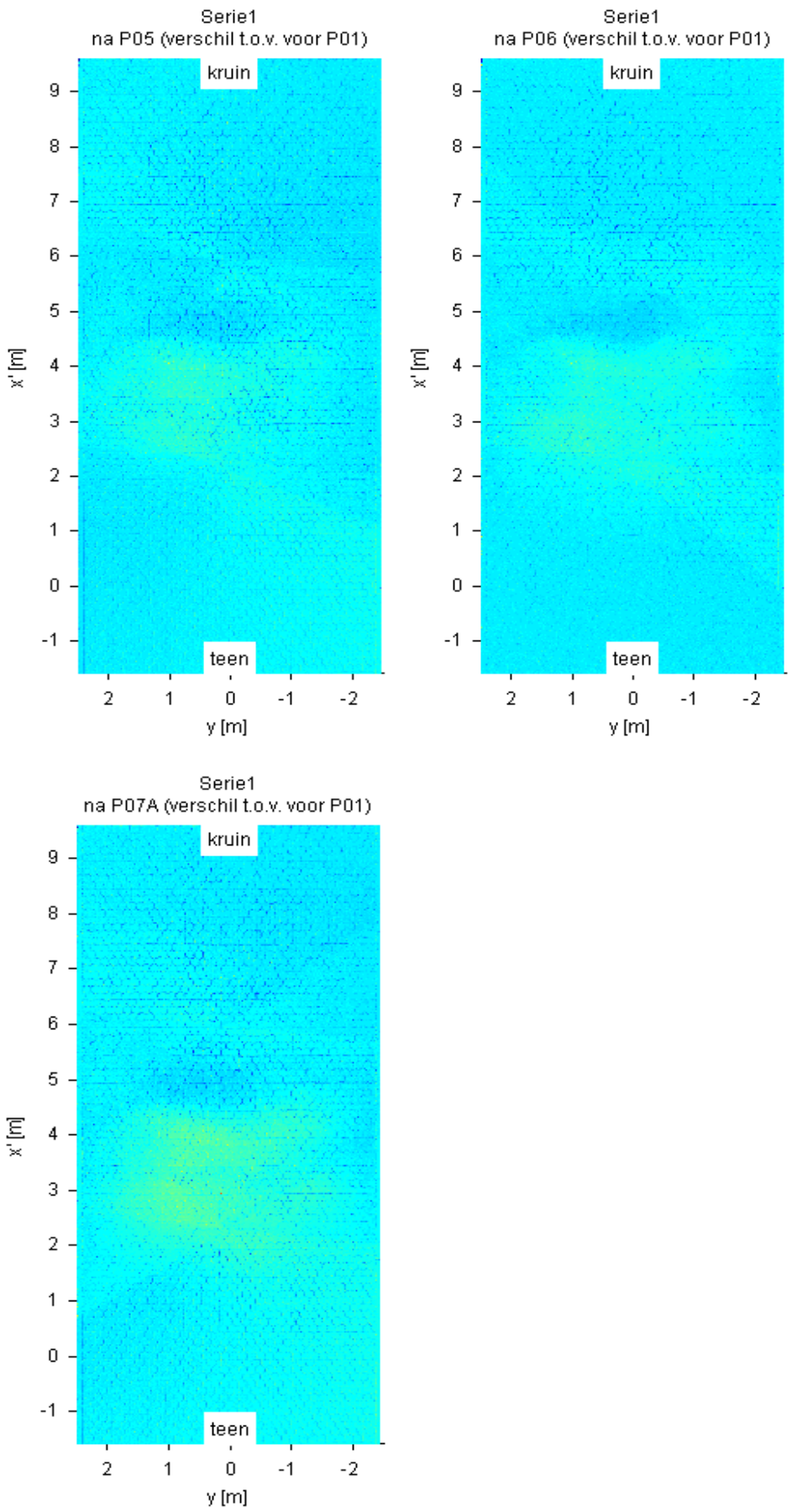




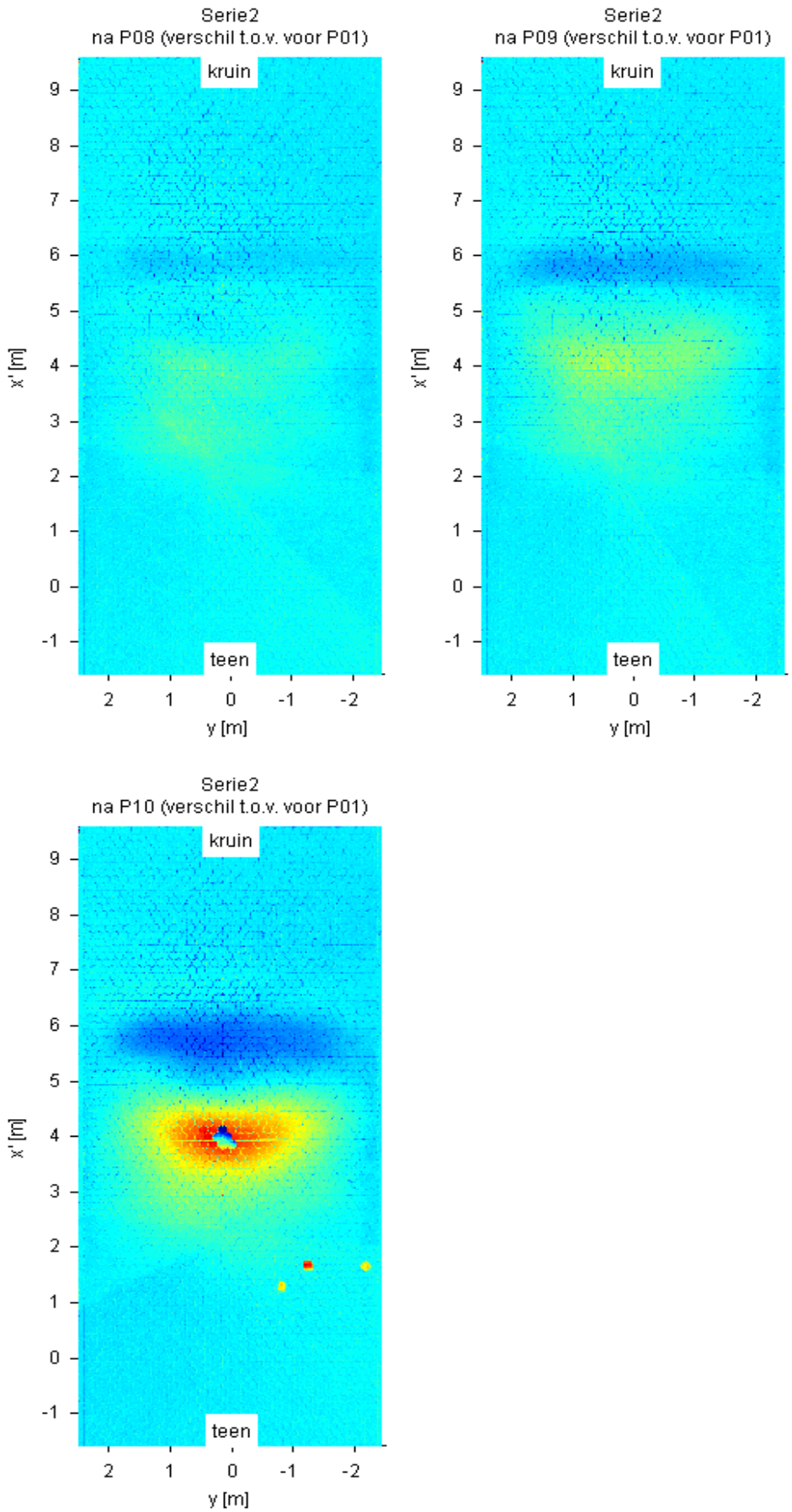
Uitspoeldiepte van het inwasmateriaal		Serie 3
	Proeven P11, P12 en P13	
Deltares	1208618.011	Fig. B.11



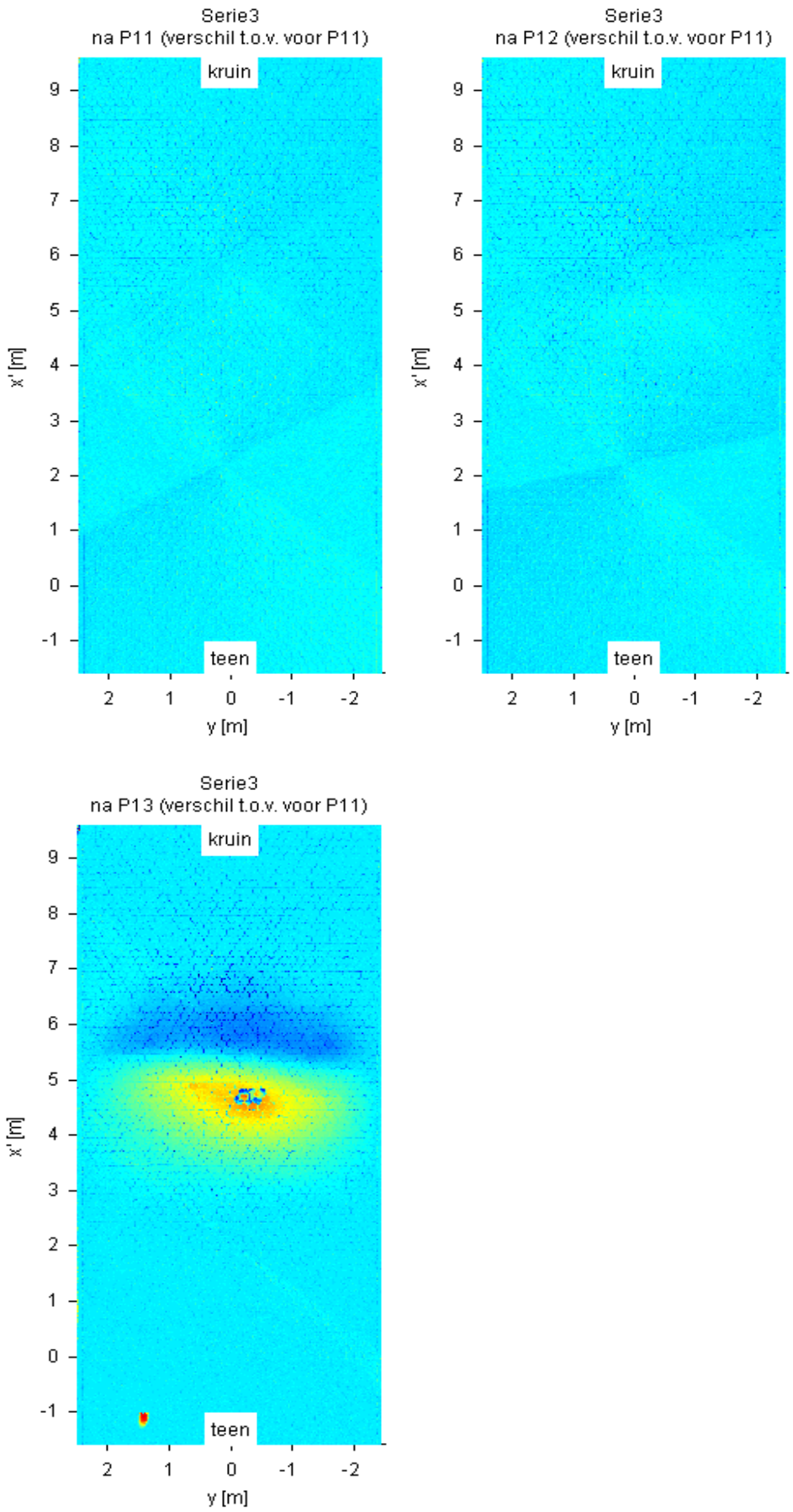
3D laserscans van taludoppervlak		Serie 1
	Proeven P01, P02, P03 en P04	
Deltares	1208618.011	Fig. B.12



3D laserscans van taludoppervlak		Serie 1
	Proeven P05, P06 en P07+P07A	
Deltares	1208618.011	Fig. B.13

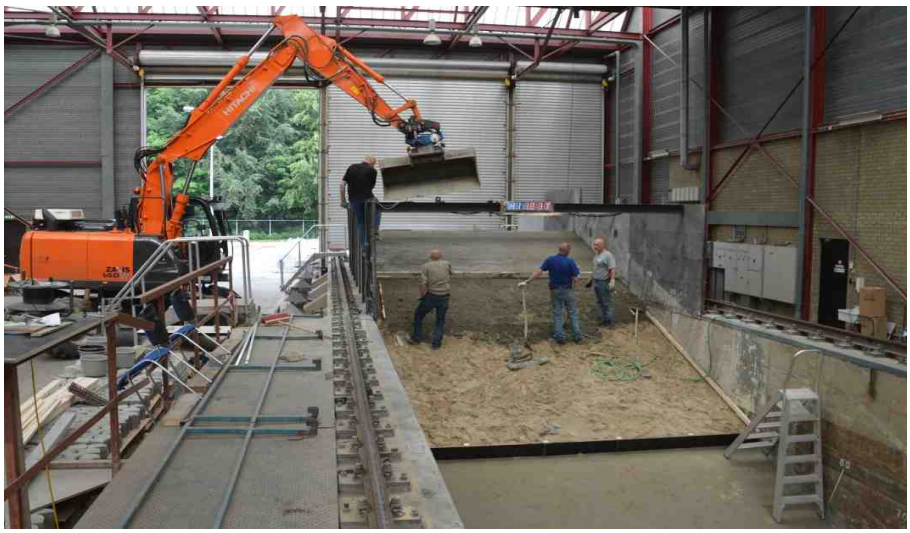


3D laserscans van taludoppervlak		Serie 2
	Proeven P08, P09, P10	
Deltares	1208618.011	Fig. B.14



3D laserscans van taludoppervlak		Serie 3
	Proeven P11, P12 en P13	
Deltares	1208618.011	Fig. B.15

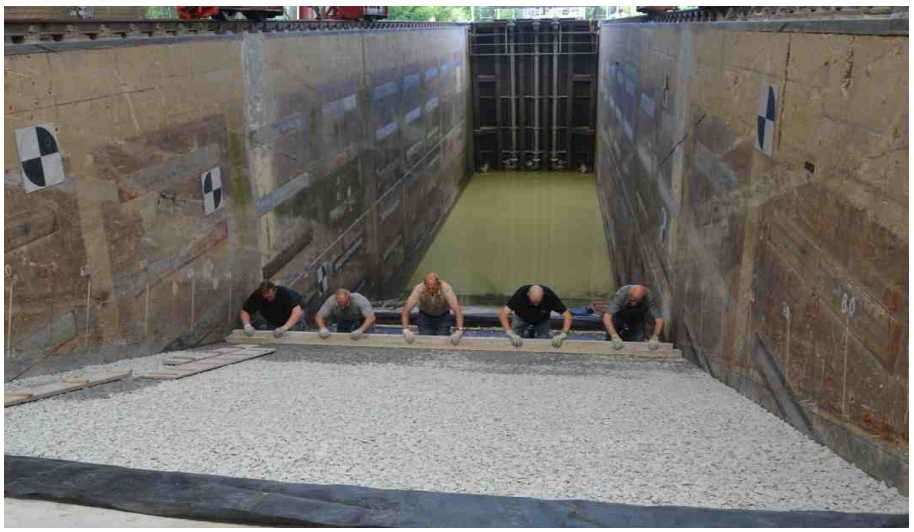
C Foto’s



a) Aanbrengen van het gladde betonnen dummytalud tussen de testsectie en de kruin.



b) Afvlakken van de zandcementstabilisatie als ondergrond van de testsectie.

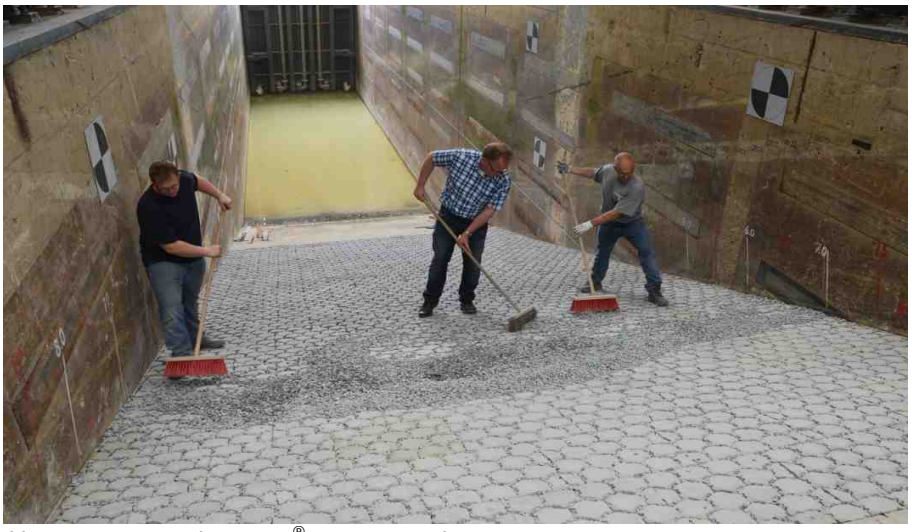


c) De filterlaag is aangebracht op geotextiel en is verdicht en op de juiste dikte gebracht d.m.v. aanstampen met een balk.

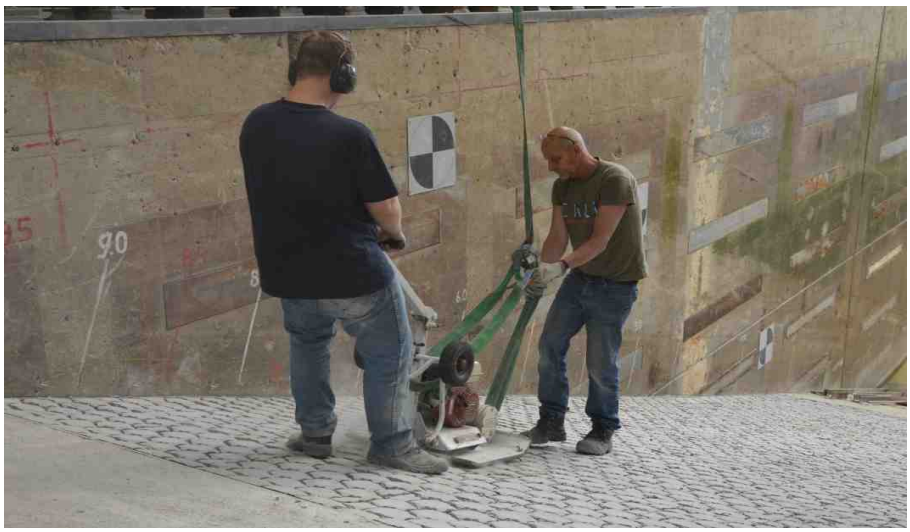
Foto's van de RONA®ton proeven in de Deltagoot		
	Inbouwen modelopstelling	
Deltares	1208618.011	Foto C.1



a) Aanbrengen van de RONA®ton zuilen op de filterlaag.



b) Inwassen van de RONA®ton steenzetting.



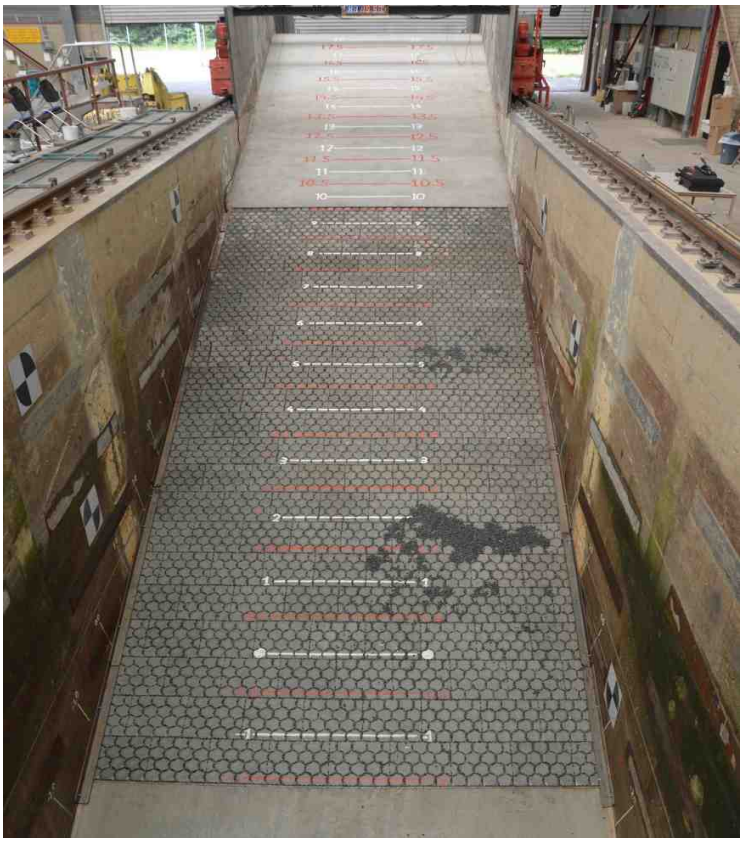
c) Aantrillen van de steenzetting met een trilplaat.

Foto's van de RONA®ton proeven in de Deltagoot		
	Inbouwen modelopstelling	
Deltares	1208618.011	Foto C.2

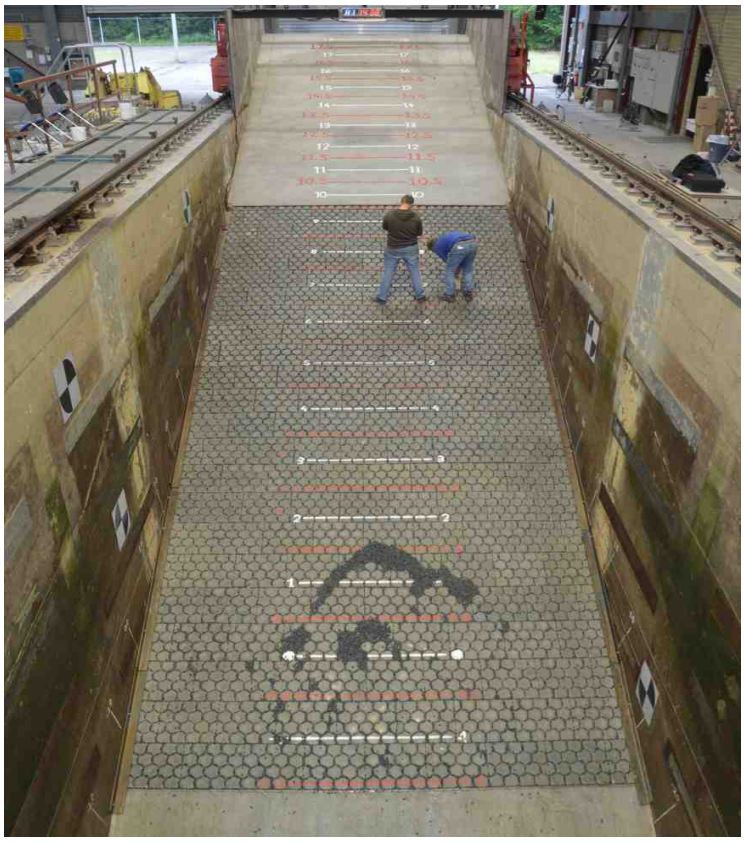


a) De beginsituatie van de steenzetting voorafgaand aan de series 1 en 2 (voor proef P01).

Foto's van de RONA®ton proeven in de Deltagoot		
	Serie 1	
Deltares	1208618.011	Foto C.3



a) De steenzetting na proef P01 (serie 1) met opgehoopt filtermateriaal op de bekleding.



b) De steenzetting na proef P02 (serie 1) met opgehoopt filtermateriaal op de bekleding.

Foto's van de RONA®ton proeven in de Deltagoot		
	Serie 1	
Deltares	1208618.011	Foto C.4



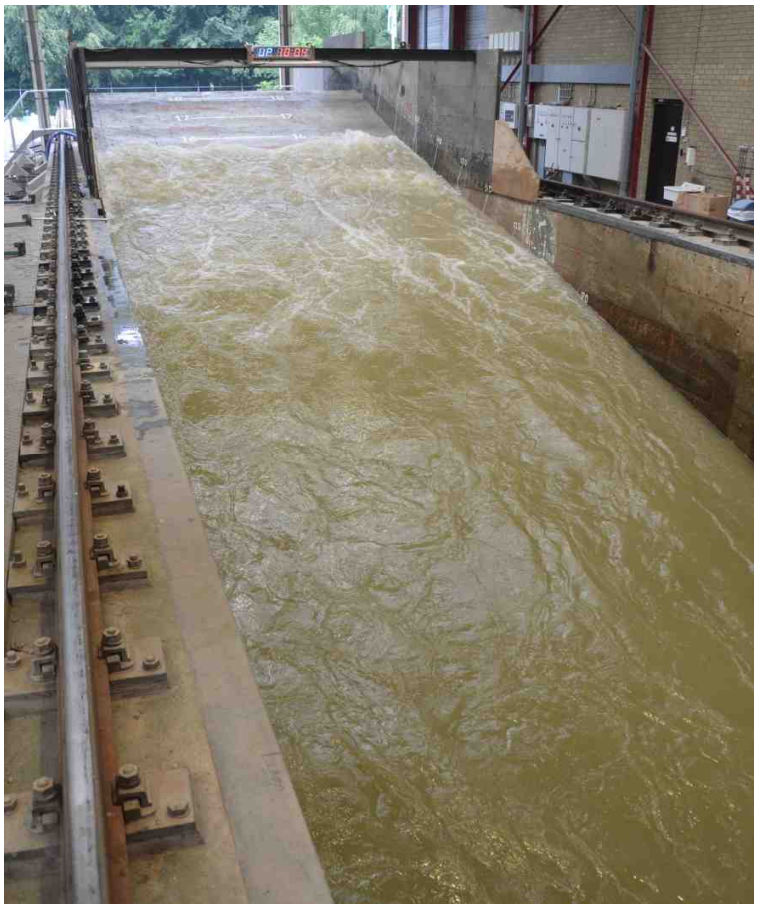
a) Rond de lijnen 4 en 5 was een zeer lichte kattenrug zichtbaar. De foto toont de situatie na proef P03 (serie 1).



b) Rond de lijnen 4 en 5 was een lichte kattenrug zichtbaar. De foto toont de situatie na proef P06 (serie 1).



a) Een golfklap tijdens proef P07 (serie 1).



b) Golfoploop tijdens proef P07 (serie 1).

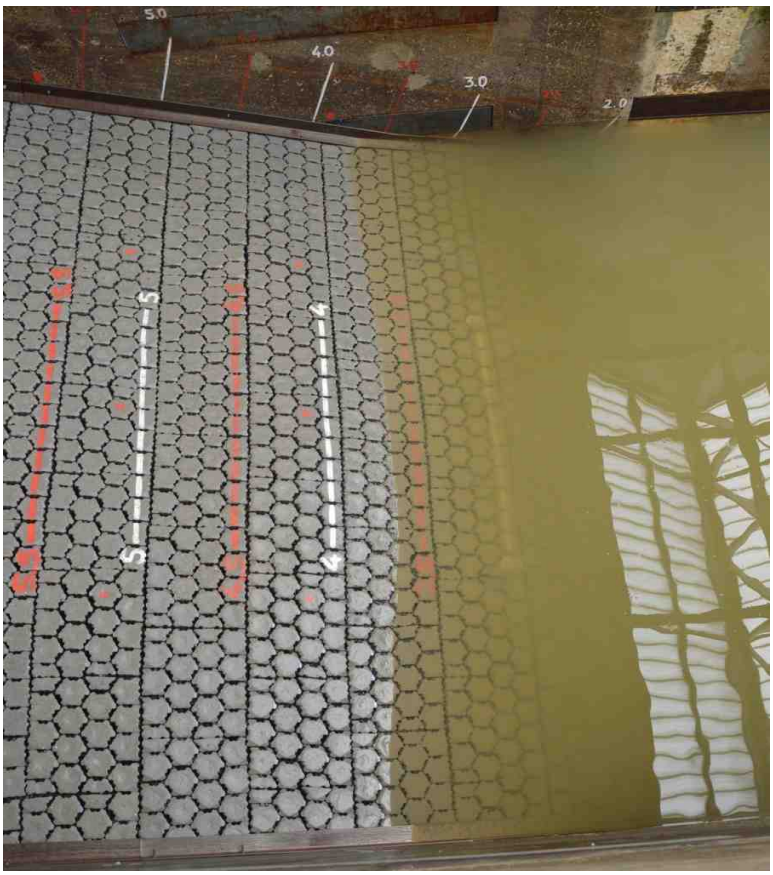


a) Rond de lijnen 4 en 5 was een lichte kattenrug zichtbaar. De foto toont de situatie na proef P07 (serie 1).



b) Rond de lijnen 4 en 5 was een lichte kattenrug zichtbaar. De foto toont de situatie na proef P09 (serie 2).

Foto's van de RONA®ton proeven in de Deltagoot		
	Serie 1 en 2	
Deltares	1208618.011	Foto C.7

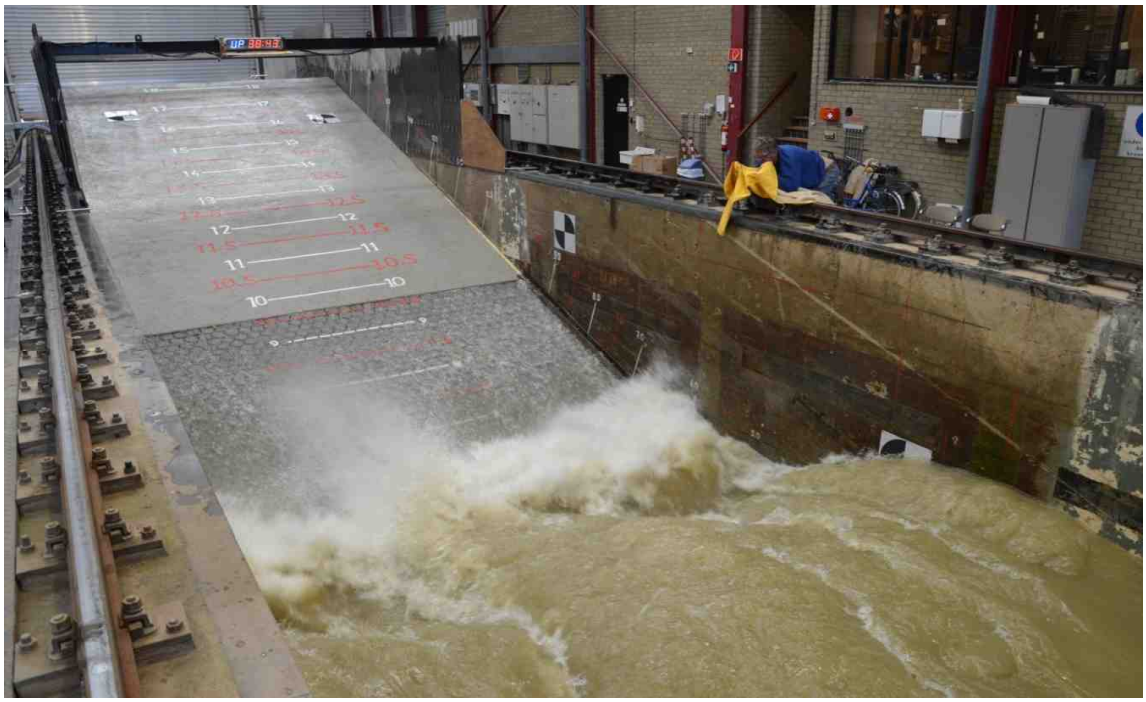


a) De vervorming van het talud is zichtbaar tijdens het zakken van de waterstand (na proef P09).



b) Naderende golven in de Deltagoot tijdens proef P10 (serie 2).

Foto's van de RONA®ton proeven in de Deltagoot		
	Serie 2	
Deltares	1208618.011	Foto C.8



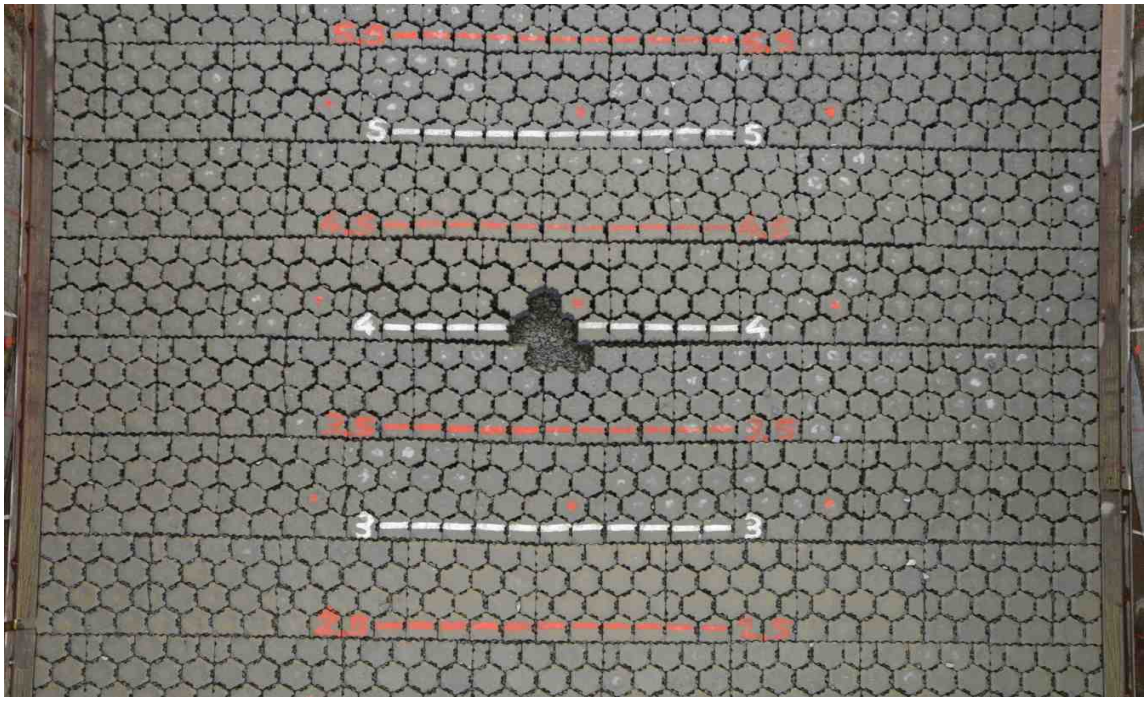
a) Golfaanval tijdens proef P10 (serie 2).



b) Tijdens proef P10 (serie 2) is kattenrug beduidend groter geworden en zijn enkele zuilen uit de bult van de kattenrug geslagen (schadecategorie d).

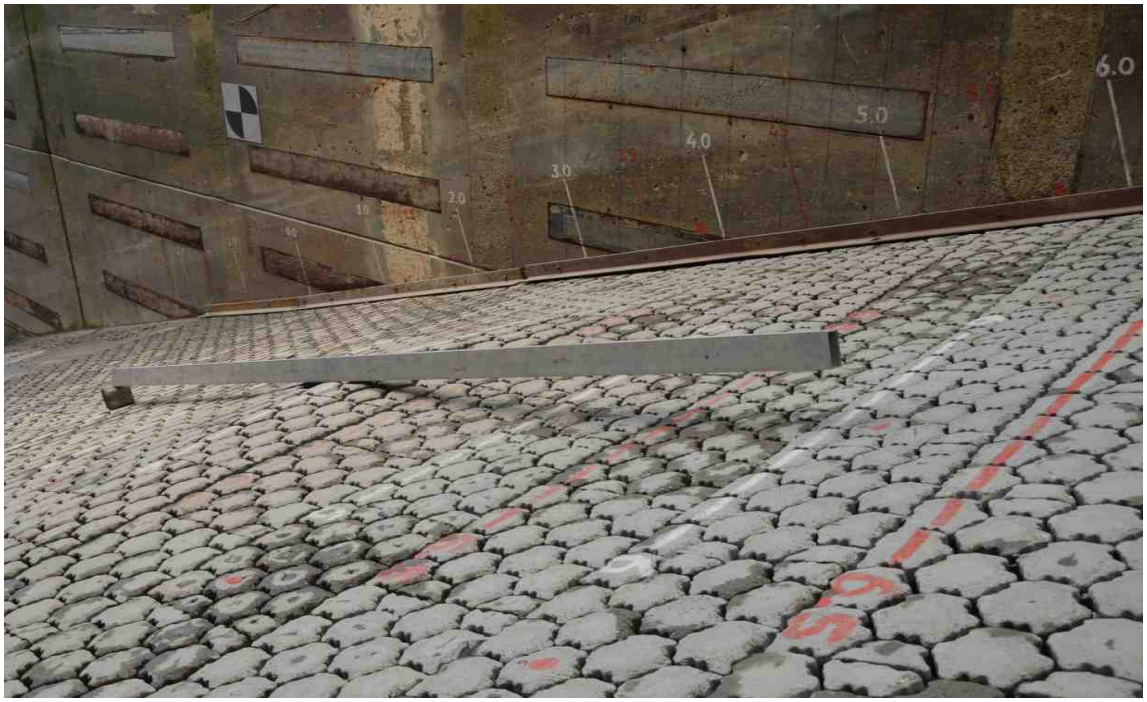


a) Zijaanzicht van de kattenrug en het gat in de steenzetting (na proef P10, serie 2). Ter plaatse van de bult van de kattenrug zijn de naden tussen de pakketten (parallel aan de waterlijn) enigszins open gaan staan.

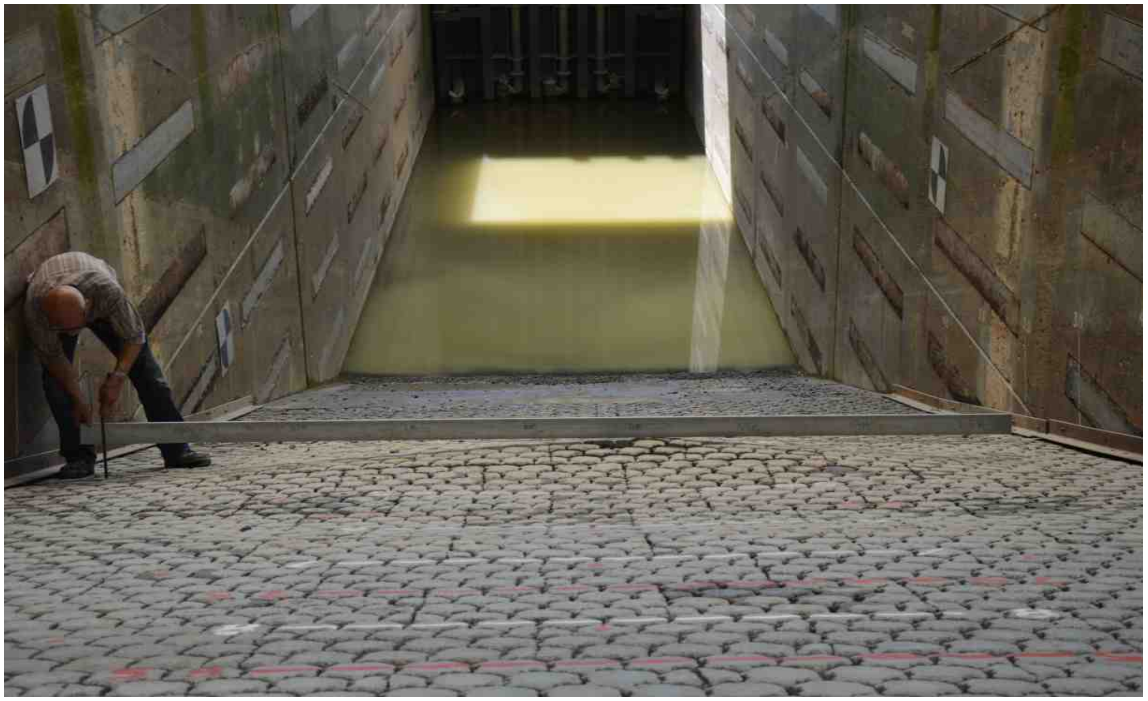


b) Bovenaanzicht van het gat in de steenzetting (na proef P10, serie 2).

Foto's van de RONA®ton proeven in de Deltagoot		
	Serie 2	
Deltares	1208618.011	Foto C.10



a) De kattenrug na proef P10 (serie 2).



b) De kattenrug na proef P10 (serie 2).

Foto's van de RONA®ton proeven in de Deltagoot		
	Serie 2	
Deltares	1208618.011	Foto C.11

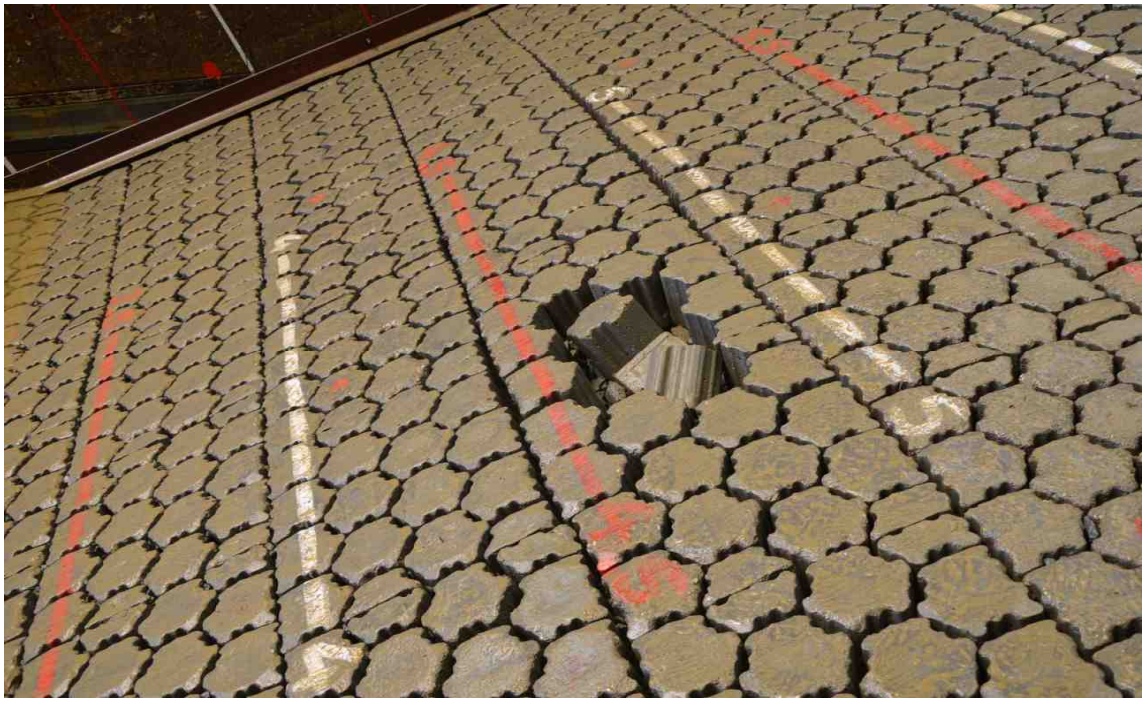


a) De beginsituatie van de steenzetting voorafgaand aan serie 3 (voor proef P11).

Foto's van de RONA®ton proeven in de Deltagoot		
	Serie 3	
Deltares	1208618.011	Foto C.12



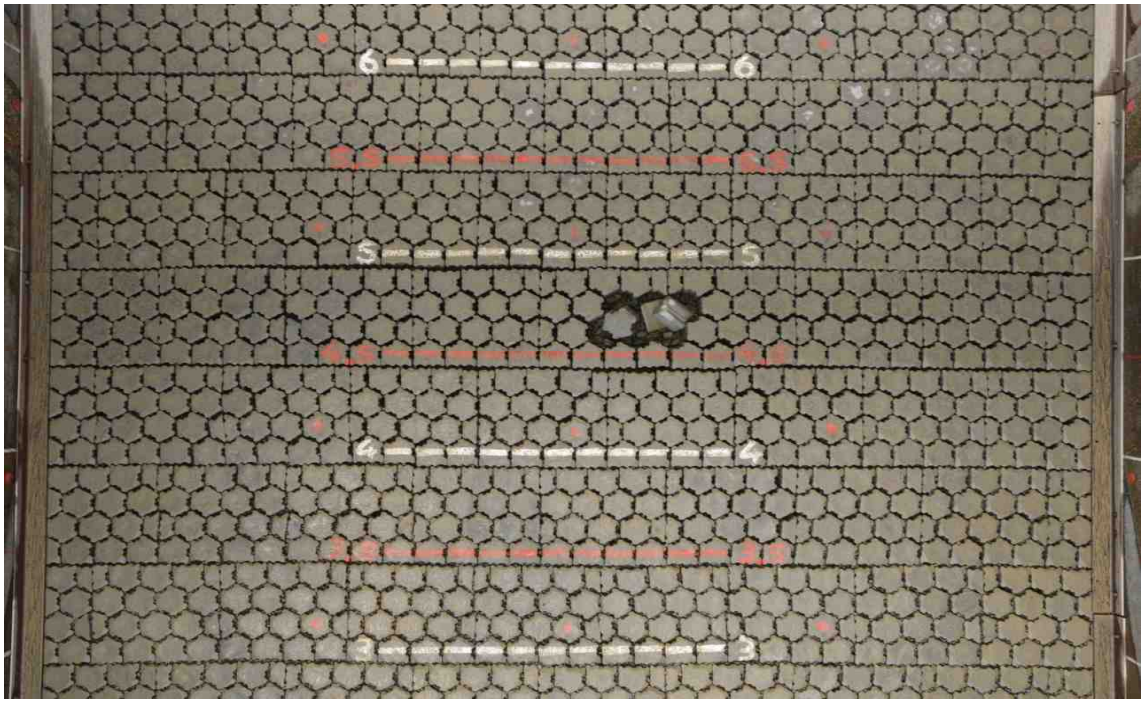
a) Tijdens proef P13 (serie 3) is een kattenrug ontstaan en zijn enkele zuilen uit de bult van de kattenrug geslagen (schadecategorie d).



b) Zijaanzicht van de kattenrug en het gat in de steenzetting (na proef P13, serie 3). Ter plaatse van de bult van de kattenrug zijn de naden tussen de pakketten (parallel aan de waterlijn) enigszins open gaan staan.



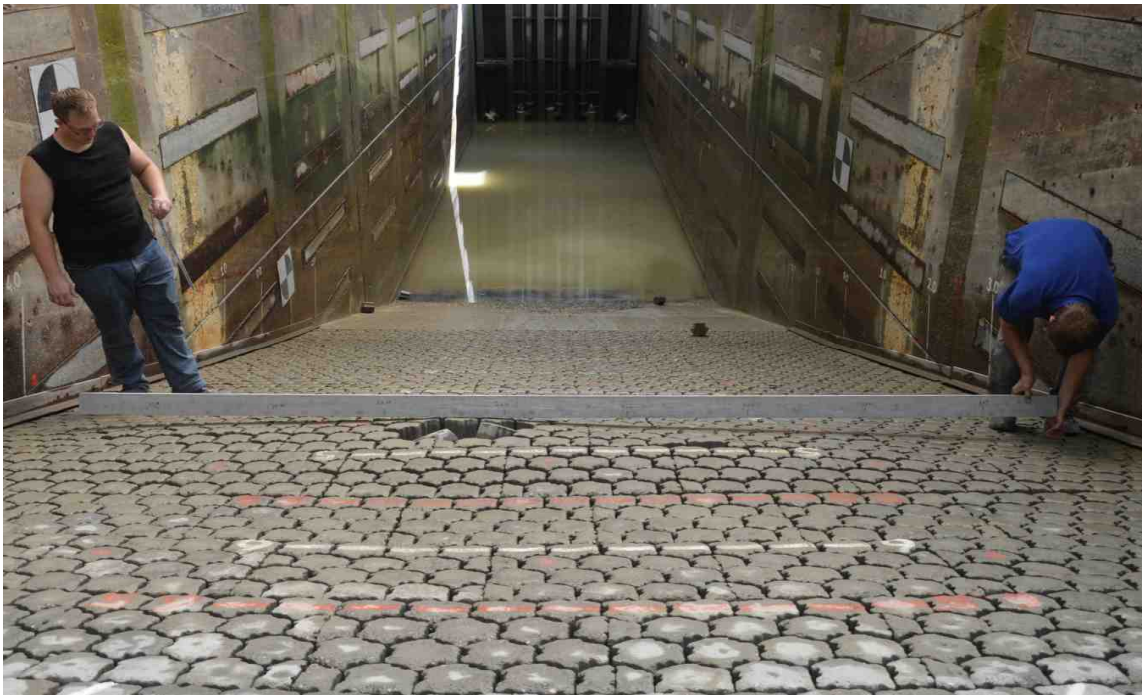
a) De kattenrug en het gat in de bekleding na proef P13 (serie 3). Vlak onder lijn 5 is een individuele steen 1 à 2 cm omhoog gekomen ten opzichte van omringende zuilen.



b) Bovenaanzicht van het gat in de steenzetting (na proef P13, serie 3).



a) De kattenrug na proef P13 (serie 3).


b) De kattenrug na proef P13 (serie 3).



a) Inmeten van de uitspoeldiepte van het inwasmateriaal.



b) De kelken zijn gemiddeld minder diep uitgespoeld dan de ontwateringsgaten.

D Procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor

D.1 Inleiding

Het “Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken” is gericht op het vaststellen van een stabiliteitsfactor, waarmee het resultaat van Steentoets-berekeningen zodanig gaat worden gecorrigeerd dat het overeenkomt met de proefresultaten uit de Deltagoot, rekening houdend met een veiligheidsfactor.
De stabiliteitsfactor is voor elk type steenzetting anders en wordt voor de gebruiker onzichtbaar opgenomen in Steentoets. De benodigde toplaagdikte volgens Steentoets moet in het programma gedeeld worden door deze stabiliteitsfactor om rekening te houden met de specifieke stabiliteit van het betreffende type steenzetting. Hierdoor zal een type steenzetting met een hoge stabiliteitsfactor (die goed scoorde in de Deltagootproeven) voor een concreet ontwerp een kleinere toplaagdikte nodig hebben dan een met een lage stabiliteitsfactor.

In deze bijlage is de methode beschreven waarmee de stabiliteitsfactor kan worden bepaald op basis van de Deltagootproeven. De methode bestaat uit het interpreteren van de proef-resultaten en het vervolgens berekenen van een stabiliteitsfactor, waarbij rekening gehouden wordt met een veiligheidsmarge.



Figuur D.1 Golfaanval op testsectie van RONA®ton.

D.2 Interpretatie van de proeven

Voor elk type steenzetting zijn de proeven uitgevoerd in 3 series:

1 serie waarin de golfhoogte stap voor stap is verhoogd bij een golfsteilheid van 2%, tot bezwijken optrad of de maximale capaciteit van de Deltagoot werd bereikt.
2 serie waarin de golfhoogte stap voor stap is verhoogd bij een golfsteilheid van 4%, tot bezwijken optrad of de maximale capaciteit van de Deltagoot werd bereikt.
3 langeduurproef met constante golfcondities die net zolang is uitgevoerd totdat bezwijken optrad of de maximale proefduur was verstreken (golfsteilheid van 4%).

Ten aanzien van de eerste twee series wordt de bezwijkgolfhoogte gelijkgesteld aan het gemiddelde tussen de H_s waarbij nog net geen bezwijken optrad en de H_s waarbij dat wel het geval was. Bij de derde serie is de totale proefduur tot het optreden van bezwijken, in combinatie met de golfcondities, het uiteindelijke proefresultaat.
Omdat elk van deze series een waardevol proefresultaat heeft opgeleverd, worden alle drie de resultaten meegewogen bij het bepalen van de stabiliteitsfactor. Dit wordt bereikt door het gemiddelde van de drie series te gebruiken en daarnaast rekening te houden met de spreiding van de drie meetresultaten.

Omdat vanwege de beperkte golfhoogte in de Deltagoot het denkbaar is dat het niet lukt om schade te krijgen aan de steenzetting, is de procedure voor het bepalen van de bezwijkgolfhoogte verder uitgedetailleerd (zie paragraaf 4.1 voor omschrijving schade-categorieën):

1 De golfhoogte bij het bezwijken van de steenzetting is voor de eerste twee proevenseries met korteduurproeven gelijk aan het gemiddelde van de golfhoogte waarbij daadwerkelijk bezwijken is opgetreden (schadecategorie c of d) en de golfhoogte van de proef met de hoogste golfhoogte in dezelfde serie (ongeveer dezelfde golfsteilheid) waarbij nog geen bezwijken is opgetreden (schadecategorie a of b).
2 Voor de langeduurproef wordt de gemiddelde golfhoogte en golfperiode bepaald en geldt het aantal golven tot bezwijken als het resultaat van de proef.
3 Als tijdens de korteduurproeven bij de maximale golfhoogte nog geen schade is opgetreden, wordt er een fictieve proef toegevoegd met een 15% hogere golfhoogte, omdat het gebruikelijk is om in het proevenprogramma met golfhoogte-stappen van 15% te werken. Aangenomen wordt dat bij die fictieve proef wel schade zou zijn opgetreden (schadecategorie c of d). Deze fictieve proef wordt op dezelfde wijze geïnterpreteerd als omschreven bij punt 1.
   Dit wordt echter niet gedaan als beide series korteduurproeven niet geleid hebben tot schade en bovendien tijdens de langeduurproef de steenzetting langer dan 15 uur heeft standgehouden bij dezelfde golfcondities. Het doorstaan van de 15 uur golfbelasting tijdens de langeduurproef impliceert dat schade bij een veel hogere golfhoogte optreedt dan 15% boven de maximale golfcondities. In dat geval wordt alleen gebruikgemaakt van het resultaat van de langeduurproef.
4 Als tijdens de langeduurproef er geen schade ontstaat, wordt aangenomen dat er wel schade zou zijn ontstaan als de proef 20% langer had geduurd.
5 Als tijdens geen enkele proevenserie schade is opgetreden, wordt aangenomen dat er wel schade zou zijn opgetreden tijdens de langeduurproef met een proefduur die 20% groter is dan de uitgevoerde proefduur. Dit is dan het enige proefresultaat op basis waarvan de stabiliteitsfactor wordt afgeleid. De fictieve proef van punt 3 wordt dan niet toegevoegd, omdat het doorstaan van de langeduurproef impliceert dat schade bij een veel hogere golfhoogte optreedt dan 15% boven de maximale golfcondities.

D.3 Bepaling stabiliteitsfactor

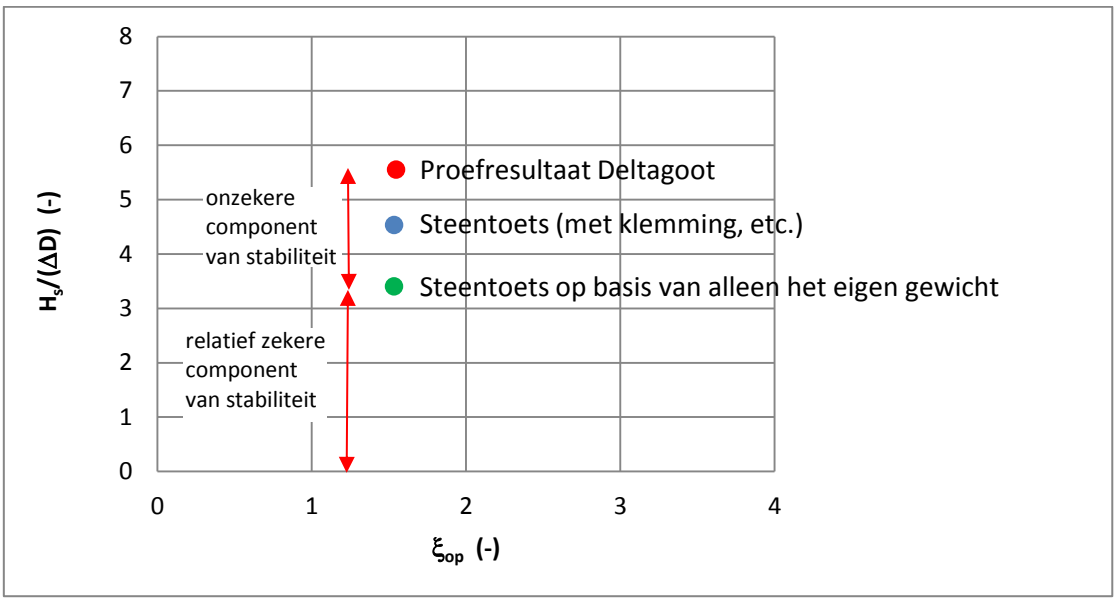
Voor het bepalen van de stabiliteitsfactor wordt zoveel mogelijk kennis en ervaring van steenzettingen benut, om een zo goed mogelijke factor te verkrijgen met de juiste veiligheids-marge. Dit wordt enerzijds gerealiseerd door gebruik te maken van het rekenmodel Steentoets en anderzijds door te bedenken dat er verschillende sterktecomponenten in een steenzetting zitten.

De methode voor het bepalen van de veiligheidsmarge in de stabiliteitsfactor gaat uit van de veronderstelling dat een deel van de stabiliteit heel zeker is (gerelateerd aan het eigengewicht van de steenzetting) en een deel onzeker (gerelateerd aan de bijzondere eigenschappen die leiden tot grote klemming of andere stabiliteit verhogende aspecten).
Er is voor gekozen om een veiligheidsfactor toe te passen op het onzekere deel, en niet op het zekere deel.

Bij het stap voor stap groter maken van de golfbelasting zal er namelijk in eerste instantie geen vrees zijn dat de steenzetting gaat bezwijken. Pas als de golfhoogte ten opzichte van de afmetingen van de toplaag groot begint te worden, kan er schade gaan optreden. Aangenomen kan worden dat er schade zou kunnen gaan optreden als de golfhoogte groter is dan de bezwijkgolfhoogte volgens Steentoets als er uitsluitend gerekend wordt met het eigengewicht van de steenzetting: dus rekenen zonder klemming en met gereduceerde soortelijke massa als er kanalen zijn. Dit wordt gezien als de minimumstabiliteit van een steenzetting. Het moet wel heel raar lopen wil een steenzetting bij een lagere golfhoogte al bezwijken. Daarom is ervoor gekozen om voor dit deel van de stabiliteit geen veiligheidsfactor toe te passen.

Meestal zal de steenzetting bij een veel grotere golfhoogte bezwijken. Dat is vooral te danken aan de bijzonder goede werking van de klemming, maar kan ook liggen aan andere bijzondere aspecten. Dit kan gezien worden als het ‘hightech’ deel van het systeem, terwijl de stabiliteit zonder klemming en kanalen gezien kan worden als het ‘lowtech’ deel. Bij het bepalen van de stabiliteitsfactor wordt alleen over dit hightech deel een veiligheidsfactor toegepast.

Normaal gesproken is de stabiliteit volgens Steentoets op basis van eigen gewicht het kleinste, die volgens Steentoets met klemming iets groter en die in de modelproeven het grootste. Dit is schematisch weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur D.2 De gemeten stabiliteit bestaat uit een relatief zekere component (berekend met Steentoets met alleen eigengewicht) en een component die in de praktijk wat kan tegenvallen.

De stabiliteitsfactor is een correctiefactor op de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets. Voor het berekenen van de stabiliteitsfactor zijn daarom de volgende waarden nodig:

- $D_{ST\ eigen\ gewicht}$ = de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets, als gerekend wordt met alleen het eigen gewicht (als blok zonder klemming en met gereduceerde soortelijke massa als er kanalen zijn; met stabiliteitsfactor = 1), bij een golfhoogte gelijk aan die toegepast is in de Deltagoot (het gemiddelde tussen wel schade en geen schade)
- $D_{Steentoets}$ = de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets (als gerekend wordt met klemming, etc. en met stabiliteitsfactor = 1) bij een golfhoogte gelijk aan die toegepast is in de Deltagoot
- $D_{in\ modelproeven}$ = de toplaagdikte (zuilhoogte) die toegepast is in de Deltagoot

Het doel is nu om een veiligheidsfactor toe te passen op het onzekere deel van de stabiliteit, dus het verschil tussen het proefresultaat uit de Deltagoot (rode stip in Figuur D.2) en het zekere deel van de stabiliteit (groene stip in Figuur D.2). Dit kan op de volgende wijze worden bereikt:

$$f_{stab} = \frac{\left(\frac{H_s}{\Delta D_{in\,modelproeven}} - \frac{H_s}{\Delta D_{STeigengewicht}} \right) / \gamma + \frac{H_s}{\Delta D_{STeigengewicht}}}{\frac{H_s}{\Delta D_{Steentoets}}} \qquad \text{(D.1)}$$

Met:

f_{stab} = stabiliteitsfactor (de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets moet gedeeld worden door deze stabiliteitsfactor om rekening te houden met de specifieke stabiliteit van het betreffende type steenzetting) (-)

γ = veiligheidsfactor (-)

Dit kan vereenvoudigd worden tot:

$$f_{stab} = \left(\frac{D_{Steentoets}}{D_{in\,modelproeven}} - \frac{D_{Steentoets}}{D_{STeigengewicht}} \right) / \gamma + \frac{D_{Steentoets}}{D_{STeigengewicht}} \qquad \text{(D.2)}$$

De stabiliteitsfactor wordt eerst voor elke proevenserie bepaald. Het gemiddelde van de stabiliteitsfactoren van de afzonderlijke proevenseries betreft de stabiliteitsfactor die voor het beproefde steenzettingtype wordt aangehouden als eindresultaat.

De waarde van de veiligheidsfactor γ wordt bepaald op basis van de standaardafwijking in de proefresultaten van alle drie de series (berekend met $D_{Steentoets}/D_{in\ modelproeven}$). Hiervoor wordt de volgende formule gebruikt, die gebaseerd is op een Student-verdeling en een onderschrijdingskans van 10%:

- Drie proevenseries: $\gamma = 1{,}1 + 1{,}89 \cdot \sigma$ (D.3)
- Vier proevenserise: $\gamma = 1{,}1 + 1{,}64 \cdot \sigma$ (D.4)

Met:

σ = standaardafwijking in de proefresultaten

Er is hier gekozen voor een minimumwaarde van 1,1 bij σ = 0, omdat het voor kan komen dat de standaardafwijking bijzonder klein is. Verder kan het voorkomen dat er maar één meetpunt is, zodat er geen standaardafwijking is. In dat geval wordt er gerekend met een standaardafwijking van 0,05, hetgeen overeenkomt met proeven op steenzettingen waarbij de standaardafwijking klein was.

Het berekenen van de stabiliteitsfactor is met deze methode vrij gecompliceerd, omdat ook de stabiliteit op basis van alleen het eigen gewicht (zonder klemming en zonder eventuele kanalen) moet worden meegewogen. Omdat dit eenmalig moet gebeuren, is dit geen bezwaar.
De stabiliteitsfactor is gerelateerd aan een specifieke Steentoets-versie en wordt hard ingeprogrammeerd in Steentoets. Hij is dus onzichtbaar voor de gewone gebruiker.