Deltares

Enabling Delta Life

Stabiliteit van Basalton 30 STS+ steenzetting bij golfaanval

Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken



Deltares

Stabiliteit van Basalton 30 STS+ steenzetting bij golfaanval

Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken

D. Kaste
G.C. Mourik

1208618-008

© Deltares, 2016, B

Deltares

Titel
Stabiliteit van Basalton 30 STS+ steenzetting bij golfaanval

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat WVL Holcim Coastal BV	1208618-008	1208618-008-HYE-0005	48

Trefwoorden
Steenzetting, Basalton 30 STS+, 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 typen steenzettingen ook de golfoploopremmende werking gemeten.

Het in dit rapport beschreven deel van het onderzoek betreft de stabiliteit van zetstenen van het type Basalton 30 STS+, waarvoor Holcim Coastal BV als marktpartij in het onderzoek participeert. Dit rapport beschrijft de proeven met Basalton 30 STS+, 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. Deze golfoploopmetingen zijn niet in het onderhavige rapport geanalyseerd.

Om de stabiliteit van Basalton 30 STS+ bij golfaanval te bepalen, is grootschalig modelonderzoek uitgevoerd in de Deltagoot van Deltares. De schaal van dit onderzoek was 1:1,6. Alle maten die in dit rapport zijn gerapporteerd, betreffen waarden op modelschaal, dus zoals aanwezig in de Deltagoot, tenzij nadrukkelijk anders is vermeld. De beproefde steenzetting had een toplaagdikte van circa 18 cm. Onder de Basalton 30 STS+ was een filterlaag aangebracht van steenslag met daaronder geotextiel.

De steenzetting is beproefd met drie proevenseries:
- *Series 1 en 2*: eerst zijn twee proevenseries met korteduurproeven (circa 1000 golven per proef) uitgevoerd. Per serie zijn alle proeven uitgevoerd met dezelfde golfsteilheid: de proeven van serie 1 zijn uitgevoerd met een kleine golfsteilheid (lange golven), de proeven van serie 2 met een grote golfsteilheid (korte golven). De golfhoogte is na elke proef verhoogd totdat de steenzetting is bezweken, of totdat de maximaal op te wekken golfhoogte was bereikt.
- *Serie 3*: tijdens de laatste serie (serie 3) is een langeduurproef uitgevoerd. Deze proef, met gelijkblijvende golfcondities, is voortgezet totdat bezwijken ontstond.

De op basis van de uitgevoerde proeven afgeleide stabiliteitsfactor voor Basalton 30 STS+ is: f_{stab} = 1,18. Deze factor is opgenomen in Steentoets2015.

Deltares

Titel
Stabiliteit van Basalton 30 STS+ steenzetting bij golfaanval

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat WVL Holcim Coastal BV	1208618-008	1208618-008-HYE-0005	48

Referenties
Rijkswaterstaat: opdracht meerwerk voor uitbreiding van het project "Vergelijkend Onderzoek Zetsteen", zaaknummer 31087167.0001, 12 november 2014.

Holcim Coastal BV: opdrachtbevestiging voor het project “Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken”, kenmerk 1208618-000-HYE-0006, 15 november 2013.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	sep. 2015	D. Kaste G.C. Mourik		M. Klein Breteler		K.J. Bos	
2.0	sep. 2015	D. Kaste G.C. Mourik		M. Klein Breteler		M.R.A. van Gent	
3.0	mrt. 2016	D. Kaste 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 Basalton 30 STS+ (Holcim Coastal BV) 2
1.3 Opzet van het rapport 3

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 Algemeen 9
3.2 Modelopstelling 10
3.2.1 Algemeen 10
3.2.2 Filterlaag 11
3.2.3 Basalton 30 STS+ 12
3.2.4 Inwasmateriaal 15
3.2.5 Afwerking van de modelranden en aanbrengen markering 16
3.3 Metingen 17
3.3.1 Golfcondities 17
3.3.2 Profielmetingen 18
3.3.3 Beweging van de toplaag 19
3.3.4 Uitspoeling van het inwasmateriaal 20
3.3.5 Golfoploopmetingen 22
3.4 Proevenprogramma 22

4 Proefresultaten en observaties **25**
4.1 Indeling in schadecategorieën 25
4.2 Serie 1: korteduurproeven (proeven B01 – B07) 26
4.3 Serie 2: korteduurproeven (proeven B08 – B12) 30
4.4 Serie 3: langeduurproef (proeven B13 – B14) 33

5 Analyse van de proefresultaten **35**
5.1 Uitspoeling van het inwasmateriaal 35
5.2 Beweging van de toplaag 37
5.3 Stabiliteit van de steenzetting 38
5.4 Stabiliteitsfactor 40

6 Conclusies **45**

7 Referenties **47**

Bijlage(n)

A Tabellen **A-1**

B Figuren **B-1**

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

1 Inleiding

1.1 Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken

Dit rapport beschrijft de proeven met Basalton 30 STS+, 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. Deze golfoploopmetingen zijn niet in het onderhavige rapport geanalyseerd.

In het kader van het “Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken” onderzoeken Rijkswaterstaat, 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 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 golfaanval onderzocht en voor enkele typen wordt ook de golfoploopreducerende werking onderzocht. Deltares onderzoekt deze eigenschappen op basis van grootschalige proeven in de Deltagoot. De zetstenen zijn daarvoor zowel in verticale als horizontale richting (hoogte, lengte en breedte) verschaald, met behoud van de vorm van de zetsteen. De Basalton 30 STS+ zuilen zijn op schaal 1:1,6 getest.



Figuur 1.1 Links: naderende golven in de Deltagoot te Delft. Rechts: golfaanval op de Basalton 30 STS+ steenzetting tijdens proef B11.

In de nabije toekomst wil Rijkswaterstaat het mogelijk maken om het onderscheid tussen verschillende 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. De stabiliteitsfactor wordt gebruikt om het resultaat van Steentoets aan te passen, zodat de hiermee berekende stabiliteit beter overeenkomt met de gemeten stabiliteit.

De stabiliteitsfactor is de verhouding tussen de benodigde toplaagdikte die volgt uit de resultaten van het experimentele modelonderzoek in de Deltagoot 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), doordat 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. De huidige proeven zijn daarom uitgevoerd op grote schaal (schaal 1:1,6 ten opzichte van de ware grootte). De Deltagoot is bij uitstek geschikt voor het beproeven van de stabiliteit van steenzettingen, omdat hierin een dijk op bijna ware grootte 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 2015 uitgevoerd onder leiding van M. Klein Breteler en D. Kaste.

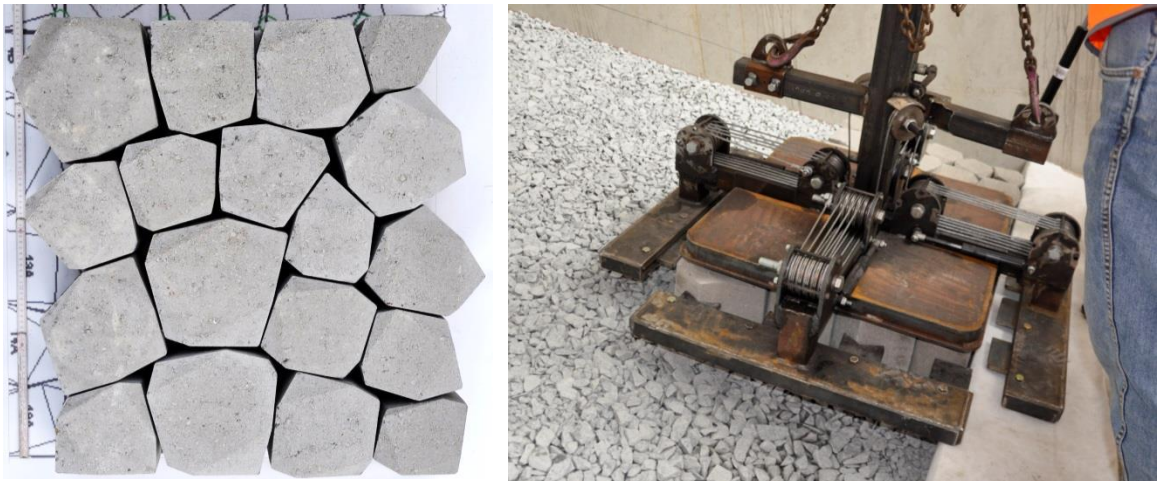
1.2 Steenzetting van Basalton 30 STS+ (Holcim Coastal BV)

In dit negende deel van het vergelijkende steenzettingonderzoek is een steenzetting van het type Basalton 30 STS+ van Holcim Coastal BV onderzocht. In de naamgeving van dit type steenzetting betreft “30” de hoogte van de onderzochte zuilen in cm op ware grootte. Daarnaast staat “STS” voor “standaardset”. De toevoeging “+” duidt aan dat het een aanpassing betreft van het steenzettingtype Basalton 30 STS, dat in 2014 in de Deltagoot was beproefd, eveneens in het kader van het onderhavige onderzoek “Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken”, zie Wolters (2016). Hoewel in de Deltagoot is gebruik-gemaakt van verschaalde zuilen is in het onderhavige rapport in de naamgeving gebruikgemaakt van de zuilhoogte op ware grootte: Basalton 30 STS+.
Basalton 30 STS+ is een type steenzetting van beton, dat op een filterlaag wordt toegepast om dijken en oevers te beschermen tegen golfaanval en stromingsbelasting.



Figuur 1.2 Een steenzetting van machinaal geplaatste standaardsets (Basalton 30 STS+) op een dijk.

Voor de Deltagootproeven is gebruikgemaakt van zogenoemde standaardsets, zie Figuur 1.2. Deze sets hebben op ware grootte een werkende oppervlakte van 1,1 x 1,2 m^2 en worden in de praktijk machinaal geplaatst. Ook in de Deltagoot zijn de verschaalde sets, die een werkende oppervlakte hebben van circa 0,69 x 0,75 m^2, machinaal geplaatst met behulp van een speciaal daarvoor door Holcim Coastal BV ontwikkelde klem, zie Figuur 1.3, rechts. Een standaardset bestaat uit 18 verschillende zuilen, zie Figuur 1.3, links. Opgemerkt wordt dat de verschaalde zuilen enigszins taps zijn: het grondvlak van de zuilen is iets groter dan het bovenvlak. De gemeten tapsheid bedraagt 0,6%, zie paragraaf 3.2.3.



Figuur 1.3 Links: de samenstelling van een standaardset Basalton 30 STS+. Rechts: de verschaalde standaardsets zijn in de Deltagoot machinaal geplaatst met behulp van een speciaal daarvoor door Holcim Coastal BV ontwikkelde klem.

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 nieuwe Deltagoot (in Delft) van Deltares. Deze Deltagoot heeft een lengte van bijna 300 m, een breedte van 5 m en een diepte van 9,5 m. De gootwanden zijn lokaal bij de kruin van de dijk nog verhoogd met 2,8 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 voor 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 = 2,0 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 circa anderhalf maal zo hoog. Daarom is het onderhavige onderzoek uitgevoerd op schaal. Gekozen is voor een geometrische schaal van 1:1,6. Bij deze schaling komt de maximale significante golfhoogte die in de Deltagoot kan worden geproduceerd (H_s = 2,0 m) overeen met een significante golfhoogte op ware grootte van H_s = 3,2 m.

2.2 Schaling

2.2.1 Algemeen

Naarmate een modelopstelling kleiner is dan de ware grootte, wordt het moeilijker om proefresultaten te vertalen naar de ware grootte, 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. Er is gekozen voor een geometrische schaal van 1:1,6.

Een geometrische schaal van 1:1,6 houdt in dat alle afmetingen van de zetstenen in de modelopstelling 1,6 maal zo klein moeten zijn als die op ware grootte. Dit geldt voor zowel de verticale als horizontale afmetingen van de zetstenen (hoogte, lengte en breedte), met behoud van de vorm van de zetsteen.
Voor het onderhavige onderzoek zijn Basalton 30 STS+ zuilen als uitgangspunt genomen, die op ware grootte circa 30 cm hoog zijn. De zuilen zijn speciaal voor het onderzoek op schaal gemaakt door Holcim Coastal BV. Daarvoor zijn speciale mallen gemaakt, waarbij alle horizontale maten een factor 1,6 kleiner zijn gekozen dan die op ware grootte. Ook de zuilhoogte is ongeveer 1,6 maal kleiner dan die op ware grootte: dat resulteerde in

verschaalde zuilen met een gemiddeld zuilhoogte D = 17,9 cm (zie paragraaf 3.2.3). Dit komt overeen met een zuilhoogte op ware grootte van D = 28,6 cm.

In een schaalmodel met schaal 1:1,6 zijn ook de golven (golfhoogte en golflengte) 1,6 maal zo klein als die op ware grootte. De taludhelling is wel gelijk aan die op ware grootte, 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. Bij een goede schaling dient het Froude getal in het schaalmodel hetzelfde te zijn 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 = karakteristieke lengte (bijvoorbeeld de waterdiepte) (m)

Voor het beproefde schaalmodel is de schaling uitgewerkt voor een lengteschaal $n_L = L_{prototype}/L_{model} = 1{,}6$. 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: $n_t = \sqrt{1{,}6} \approx 1{,}26$
- Golfhoogte: $n_H = n_L$, in dit geval dus: $n_H = 1{,}6$
- Snelheid (voortplantingssnelheid van golven): $n_u = \sqrt{n_L}$, in dit geval dus: $n_u = \sqrt{1{,}6} \approx 1{,}26$

De Froude schaling is gebruikt voor het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden.

2.2.3 Schaling dimensieloze parameters

Dimensieloze parameters dienen niet verschaald te worden. Voorbeelden van dimensieloze parameters 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 $H_s/(\Delta D)$. De belastingparameter $H_s/(\Delta D)$ kan worden gezien als de verhouding tussen de golfbelasting (de golfhoogte H_s) en de sterkte van de steenzetting (relatieve soortelijke massa Δ en toplaagdikte 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 Basalton 30 STS+ 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 zijn H_s en D uitgedrukt in lengte-eenheden. De belastingparameter is daardoor dimensieloos en is in het schaalmodel dus hetzelfde als in de werkelijke situatie.

2.2.4 Schaling van stroming in de constructie

Naast de waterbeweging op het talud, waarvoor de Froude schaling 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 = karakteristieke lengte (bijvoorbeeld de korrelgrootte) (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 ($n_L = 1{,}6$) 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: $n_\Lambda = n_L = 1,6$. Met het rekenmodel Steentoets is de leklengte op ware grootte 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 $D_{f15} = 5,8$ mm in het schaalmodel (betreft de gemeten waarde, zie paragraaf 3.2.4) en $D_{f15} = 9,3$ mm op ware grootte.
Uit de berekeningen is, uitgaand van de gehanteerde schaal van 1:1,6, gebleken dat in de modelopstelling een filterlaag met laagdikte van ongeveer b = 8 cm en korrelgrootte $D_{f15} = 10$ à 14 mm goed overeenkomt met onder andere de volgende filterlaagdiktes en korrelgroottes van steenzettingen op ware grootte: b = 13 cm in combinatie met $D_{f15} = 14$ à 21 mm, of met $D_{f15} = 17$ mm in combinatie met b = 12 à 14 cm.

Ter illustratie is in Tabel 2.1 voor de situatie op ware grootte en voor de situatie in de Deltagoot weergegeven welke combinatie van parameters resulteren in een vergelijkbare leklengte, uitgaande van verschaling van de leklengte met de lengteschaal $n_L = 1,6$. 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	0,18
open oppervlak	Ω	(%)	9,4	9,4
filterlaagdikte	B	(m)	0,13	0,08
korrelgrootte filter	D_{f15}	(mm)	17	12
korrelgrootte inwasmateriaal	D_{i15}	(mm)	9,3	5,8
toplaagdoorlatendheid	k'	(mm/s)	50	40
leklengte	Λ	(m)	0,38	0,24

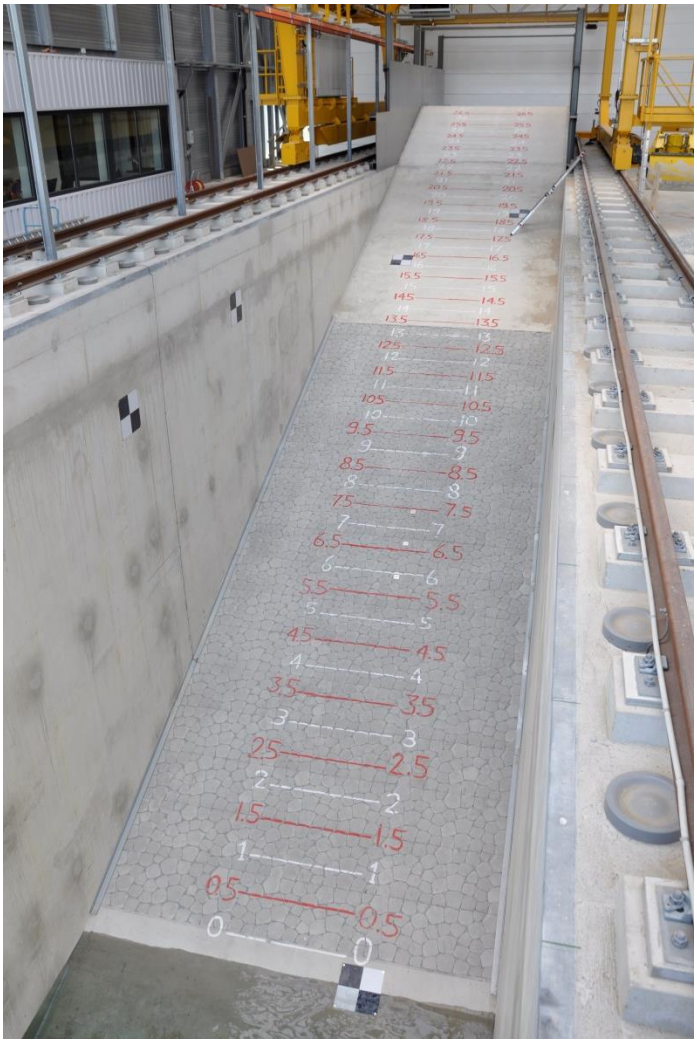
Tabel 2.1 Parameters met betrekking tot de stroming in de steenzetting met de waarden op ware grootte en overeenkomstige waarden op schaal (indicatief).

Omdat in de praktijk mogelijk 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 Algemeen

Voor het onderhavige onderzoek is in de nieuwe Deltagoot (in Delft) van Deltares een dijk opgebouwd met een steenzetting van Basalton 30 STS+. Zoals is beschreven in hoofdstuk 2 is de schaal van de modelopstelling 1:1,6. Alle maten die in dit rapport zijn gerapporteerd, betreffen waarden op modelschaal, dus zoals aanwezig in de Deltagoot, tenzij nadrukkelijk anders is vermeld. De modelopstelling is uitvoerig beschreven in paragraaf 3.2 en een overzicht ervan is te zien in Figuur 3.1, Figuur 3.2 en in bijlage B.1.



Figuur 3.1 Overzicht van de modelopstelling met Basalton 30 STS+ zuilen, voorafgaand aan serie 1.

De steenzetting is achtereenvolgens beproefd met de volgende drie proevenseries:

- *Series 1 en 2*: eerst zijn twee proevenseries met korteduurproeven (circa 1000 golven per proef) uitgevoerd. Per serie zijn alle proeven uitgevoerd met dezelfde golfsteilheid: de proeven van serie 1 zijn uitgevoerd met een kleine golfsteilheid (lange golven), de proeven van serie 2 met een grote golfsteilheid (korte golven). De golfhoogte is na elke

proef verhoogd totdat de steenzetting is bezweken, of totdat de maximaal op te wekken golfhoogte was bereikt.

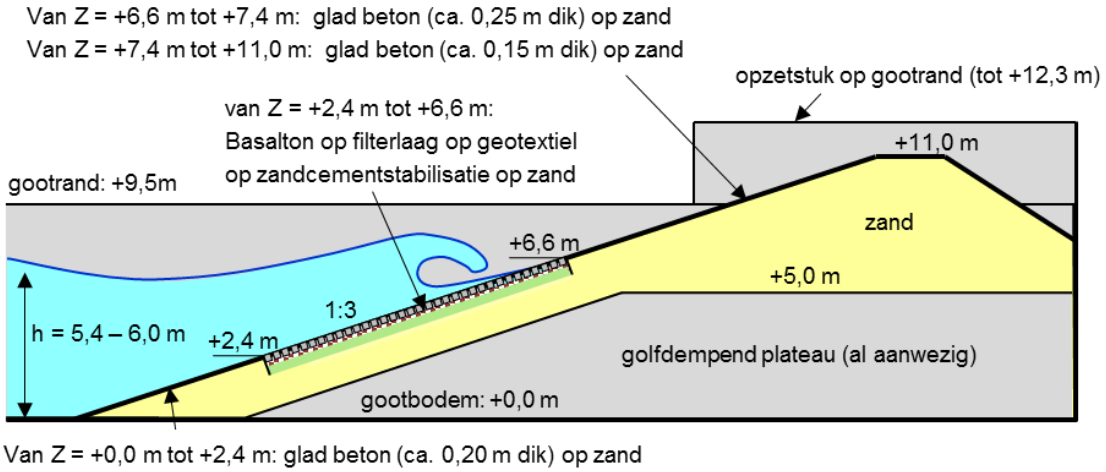
- *Serie 3*: tijdens de laatste serie (serie 3) is een langeduurproef uitgevoerd. Deze proef, met gelijkblijvende golfcondities, is voortgezet totdat bezwijken ontstond.

Het proevenprogramma is gedetailleerd beschreven in paragraaf 3.4. De metingen die tijdens de proeven zijn verricht, zijn toegelicht in paragraaf 3.3.

3.2 Modelopstelling

3.2.1 Algemeen

De beproefde modelopstelling is schematisch weergegeven in Figuur 3.2.



Figuur 3.2 Schematische lengtedoorsnede van de modelopstelling met Basalton 30 STS+ (Z = hoogte ten opzichte van de gootbodem).

De dijk had een hoogte van 11,0 m boven de gootbodem. Om deze 11,0 m hoge dijk in de Deltagoot te kunnen bouwen, zijn de gootwanden bij de kruin van de dijk plaatselijk verhoogd met 2,8 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. Het talud bestaat uit de volgende drie secties (met Z = verticale afstand tot de gootbodem):

- *Van Z = 0,0 m – 2,4 m (ondertalud):*
  Dit deel van het talud betreft een dummy sectie, bestaande uit circa 20 cm dik beton op zand. De teen van de constructie bevindt zich bij X = 168,75 m vanaf het golfschot.

- *Van Z = 2,4 m – 6,6 m (testsectie):*
  Dit deel van het talud, de testsectie, bestaat uit Basalton 30 STS+ op een filterlaag op geotextiel (GEOPEX-NW270-S22NW-TYPE 1) op zandcementstabilisatie op zand. De laag zandcementstabilisatie 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.

- *Van Z = 6,6 m – 11,0 m (boventalud):*
  Boven de testsectie bestaat het talud uit een dummy sectie, bestaande uit beton op zand. Van Z = 6,6 m – 7,4 m heeft het beton een dikte van circa 25 cm. In de rest van deze dummy sectie is het beton circa 15 cm dik.

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

$$Z = \frac{X - 168,75}{3,00} \tag{3.1}$$

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

Een overzicht van de belangrijkste eigenschappen van de testsectie (van Z = 2,4 m – 6,6 m) is gegeven in Tabel 3.1. De eigenschappen van de testsectie zijn in de volgende paragrafen meer gedetailleerd beschreven. Doordat de vervorming van de steenzetting na serie 1 dermate gering was, was in overleg met de opdrachtgevers besloten om op dezelfde bekleding direct door te gaan met serie 2. Diverse eigenschappen van de steenzetting zijn daardoor voor serie 1 en 2 hetzelfde. Na serie 2 was wel schade ontstaan en was het talud eerst grotendeels gerepareerd voor aanvang van serie 3.

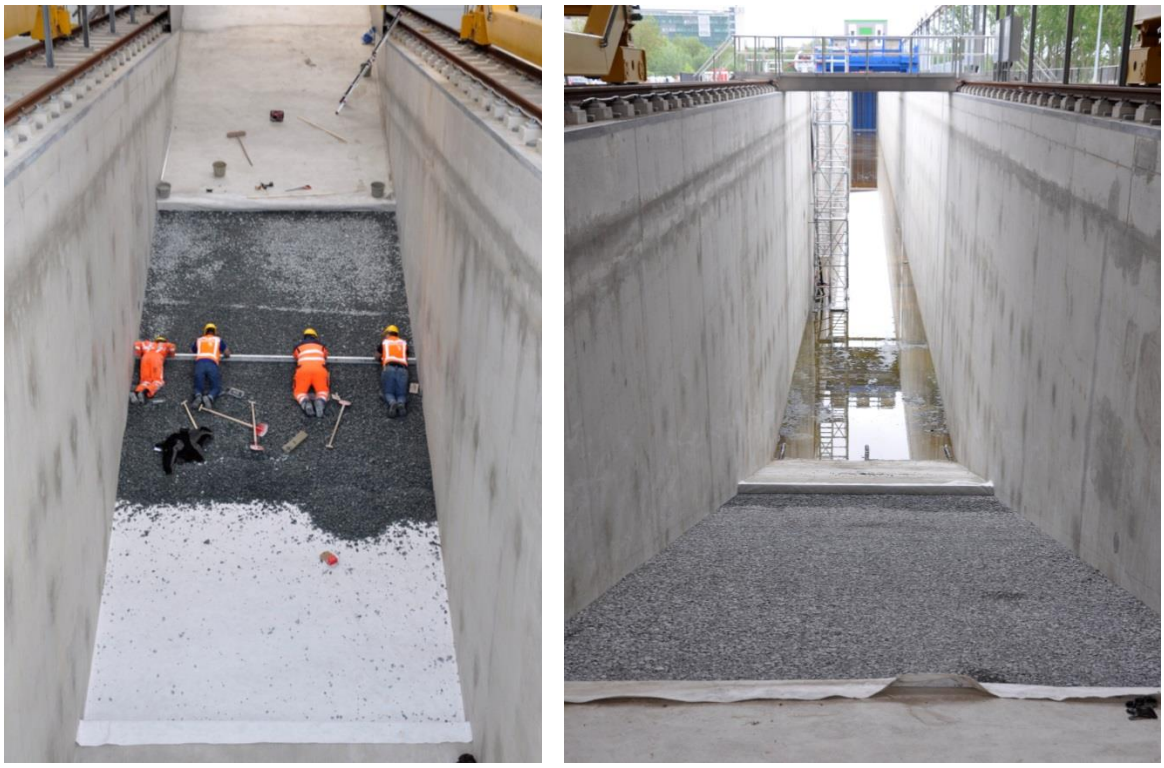
Eigenschap	**Serie 1**	**Serie 2**	**Serie 3**
Algemeen			
- taludhelling (tanα) [-]	1:3		
Basalton 30 STS+			
- zuilhoogte (D) [cm]	17,9		
- soortelijke massa (ρ_s) [kg/m^3]	2297		
- open oppervlak (Ω) [%]	9,4		
Filterlaag			
- filterlaagdikte (b) [cm]	7,9		7,8
- karakteristieke korrelgroottes [mm]	D_{f15} = 11,3 D_{f50} = 18,0 D_{f90} = 30,1		D_{f15} = 12,4 D_{f50} = 19,4 D_{f90} = 30,1
Inwasmateriaal (Noors graniet)			
- karakteristieke korrelgroottes [mm]	D_{i15} = 5,8 D_{i50} = 9,8 D_{i90} = 16,4		

Tabel 3.1 Overzicht van de belangrijkst eigenschappen van de testsectie (tussen Z = +2,4 m en +6,6 m)

3.2.2 Filterlaag

Filterlaagdikte:
Gedurende het onderzoek is tweemaal een nieuwe filterlaag aangebracht (zie Figuur 3.3, links). Eerst is voorafgaand aan serie 1 een nieuwe filterlaag aangebracht. Omdat serie 1 en 2 direct achter elkaar zijn uitgevoerd (want er was geen schade na serie 1), zijn deze twee series met hetzelfde filtermateriaal uitgevoerd. Aan het einde van serie 2 was wel schade opgetreden, waarna de steenzetting opnieuw is geplaatst en vers filtermateriaal is aangebracht, waarbij beoogd werd dezelfde korrelverdeling te verkrijgen.

Van beide filterlagen is de dikte tijdens het plaatsen van de zetstenen gemeten op 24 locaties. Daarvan zijn de meeste metingen uitgevoerd in de zone waarin de schade aan de steenzetting 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 = 7,9 cm en tijdens proevenserie 3 gemiddeld b = 7,8 cm.



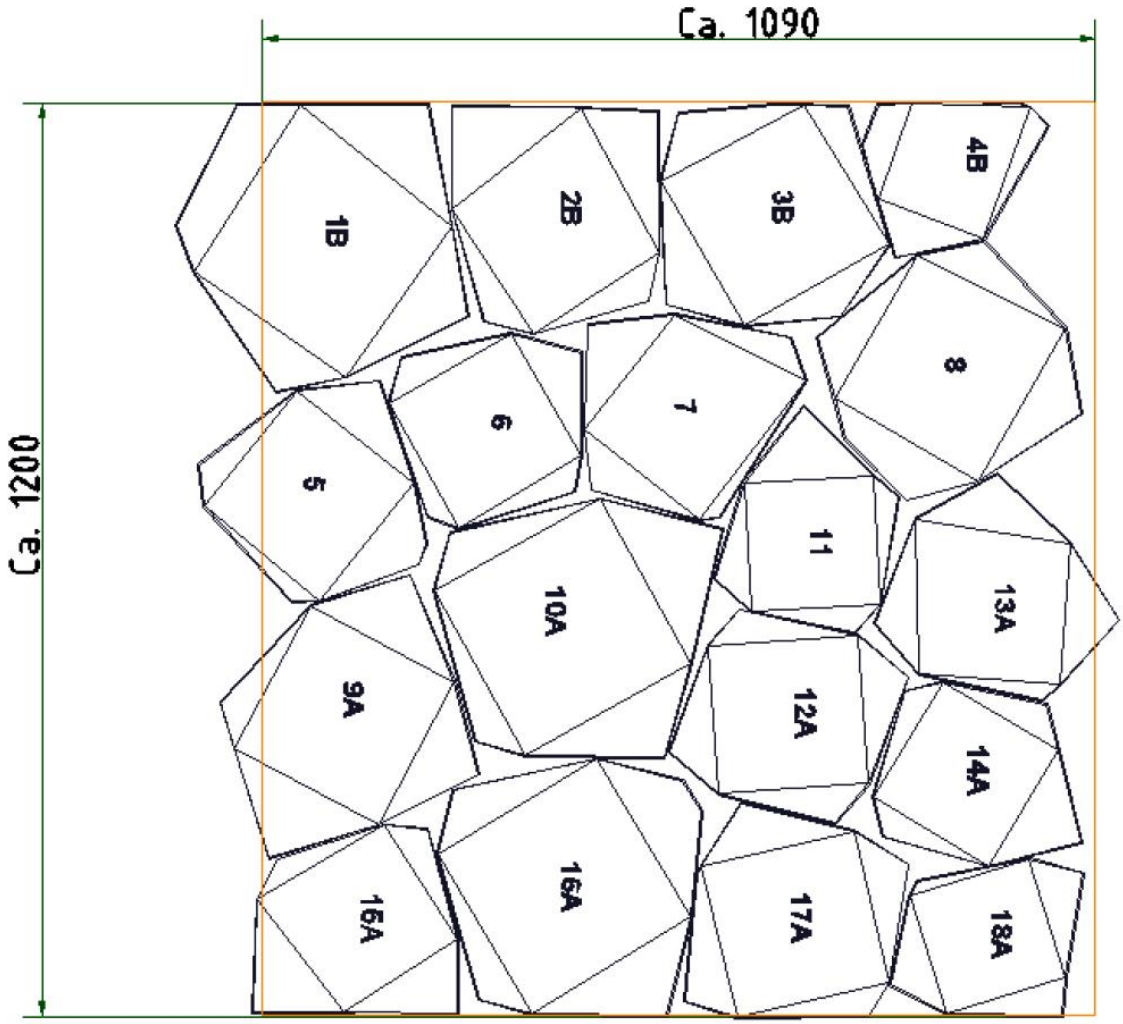
Figuur 3.3 Links: aanbrengen van de filterlaag op het geotextiel. Rechts: de filterlaag is gereed voor plaatsing van de zuilen.

Gradering:
Van het gebruikte filtermateriaal zijn zeefkrommes gemaakt en weergeven in bijlage B.3. Het filtermateriaal heeft een brede gradering en is samengesteld door meerdere standaard steensorteringen te mengen, zodanig dat de beoogde gradering werd verkregen. Het filtermateriaal had de volgende karakteristieke waarden:

serie 1 en 2: D_{f15} = 11,3 mm, D_{f50} = 18,0 mm en D_{f90} = 30,1 mm
serie 3: D_{f15} = 12,4 mm, D_{f50} = 19,4 mm en D_{f90} = 30,1 mm

3.2.3 Basalton 30 STS+

Toplaagdikte:
De testsectie heeft een toplaag van machinaal geplaatste Basalton 30 STS+ sets met een gemiddelde dikte D = 17,9 cm. De gemiddelde zuilhoogte is bepaald op basis van 10 zuilen, waarvan de individuele hoogte varieerde tussen 17,4 cm en 18,5 cm. Vanwege de goede klemming van de zetstenen in de steenzetting is de gemiddelde zuilhoogte maatgevend voor de toplaagstabiliteit.
Een tekening van de toegepaste versie van Basalton is gegeven in Figuur 3.4.



Figuur 3.4 Tekening van bovenaanzicht van set Basalton STS+ met maten in mm (ware grootte)

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 = 2297 kg/m^3 (met $\rho_{s,min}$ = 2240 kg/m^3 en $\rho_{s,max}$ = 2338 kg/m^3).
De soortelijke massa is bepaald door de zuilen boven water en onder water te wegen, nadat deze eerst geruime tijd onder water hebben gelegen en verzadigd zijn met water. De dichtheid kan daaruit afgeleid worden met de volgende formule:

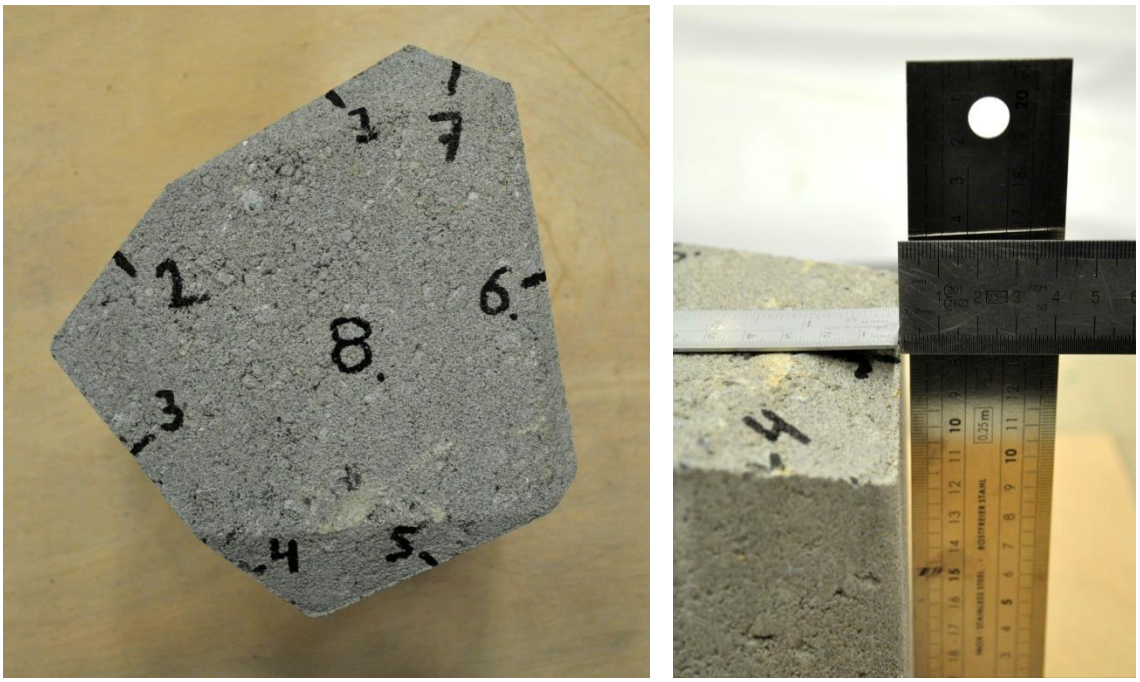
$$\rho_s = \frac{M_{boven}}{\left(M_{boven} - M_{onder}\right)} \cdot 1000 \qquad (3.2)$$

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

Tapsheid:
De geleverde Basalton 30 STS+ zuilen bleken enigszins taps te zijn: de bovenzijde van de zuilen bleek gemiddeld iets smaller dan de onderzijde. De tapsheid is bepaald door bij 10

zuilen met behulp van een winkelhaak op 7 tot 8 plaatsen rondom elk van die zuilen te meten hoever de onderzijde van de zuil uitsteekt buiten de bovenzijde van de zuil, zie Figuur 3.5. In totaal zijn 74 metingen uitgevoerd. Daarbij is opgelet dat kleine uitsteekseltjes in het beton niet zijn beschouwd.
Voor elke van de 7 of 8 plaatsen rondom de zuil volgt de lokale tapsheid uit de berekening: (uitwijking/zuilhoogte)·100%. De tapsheid van de totale zuil is gedefinieerd als de gemiddelde waarde van deze 7 of 8 locaties.

De onderzijde van de zuilen blijkt gemiddeld 1,0 mm buiten de bovenzijde uit te steken. De tapsheid van de 10 zuilen is gemiddeld 0,6%.



Figuur 3.5 De tapsheid is bepaald door bij 10 zuilen met behulp van een winkelhaak op 7 tot 8 plaatsen rondom elk van die zuilen te meten hoever de onderzijde van de zuil uitsteekt buiten de bovenzijde van de zuil.

Open oppervlak:
Vanwege de tapsheid van de zuilen is het open oppervlak aan de onderzijde van de zuilen iets kleiner dan aan de bovenzijde. Omdat het kleinste open oppervlak maatgevend is voor de doorstroming van het water door de toplaag, dient het open oppervlak bepaald te worden op basis van de zuildoorsnede (evenwijdig aan het grondvlak) aan de onderzijde van de zuilen.
Omdat van in de Deltagoot geplaatste zuilen slechts het bovenvlak zichtbaar is, en niet het grondvlak, is voor de berekening gebruikgemaakt van het bovenaanzicht van twee daadwerkelijk geplaatste willekeurige Basalton 30 STS+ sets, waarvan is aangenomen dat het grondvlak van de zuilen in alle richtingen 1,0 mm groter is dan het bovenvlak (zie '*Tapsheid*'), om een goede schatting te krijgen van het grondvlak. Hieruit volgt een open oppervlak van Ω = 9,4 %.

Wrijvingscoëfficiënt:
Om te controleren of het gebruikte beton invloed heeft op de ruwheid van het betonoppervlak is de wrijvingscoëfficiënt bepaald. Uit 40 metingen volgde een gemiddelde wrijvingscoëfficiënt van 0,61. Dat komt goed overeen met zetstenen in de praktijk, die doorgaans een wrijvings-coëfficiënt hebben van circa 0,6.

De wrijvingsproeven zijn uitgevoerd door een natte zuil op een plank vast te maken en een andere natte zuil daarop te leggen. Vervolgens is de helling van de plank vergroot totdat de bovenste zuil van de onderste afschoof, waarna de hoek tussen de plank en de grond is genoteerd. De tangens van deze hoek is de wrijvingscoëfficiënt. Omdat de zuilen enigszins taps zijn, is ter hoogte van het bovenvlak van de zuil een afstandhoudertje tussen de zuil en de plank aangebracht, zodanig dat het contactvlak tussen de twee zuilen evenwijdig is aan de plank. In totaal zijn 40 wrijvingsproeven uitgevoerd, waarvoor is gebruikgemaakt van 10 verschillende contactvlakparen. Per contactvlakpaar is de wrijvingsproef achtereenvolgens viermaal uitgevoerd: eerst tweemaal zonder extra gewicht bovenop de bovenste zuil en daarna nog tweemaal met 10 kg bovenop de bovenste zuil. De extra gewichten hebben, zoals te verwachten is, geen noemenswaardige invloed op de wrijvingscoëfficiënt.

Plaatsing:
In de modelopstelling is gebruikgemaakt van machinaal geplaatste Basalton 30 STS+ sets, bestaand uit een patroon van 18 verschillende zuilen. Om bij het opbouwen van de modelopstelling zoveel mogelijk aan te sluiten op de machinale plaatsingswijze op een dijk is door Holcim Coastal BV een speciale klem gemaakt, waarmee in één keer een gehele set geplaatst kan worden, zie Figuur 3.6.
De sets zijn in recht verband in de testsectie geplaatst: iets minder dan 18 sets in de lengterichting van de goot en ruim 7 sets in de breedterichting van de goot, zie bijlage B.2. Langs de gootwanden en langs de bovenrand van de testsectie zijn zuilen op maat gezaagd om een goede aansluiting te creëren, ten behoeve van een goede interactie tussen de zuilen in de steenzetting.



Figuur 3.6 Plaatsing van de Basalton 30 STS+ zuilen op de filterlaag met de speciaal daarvoor door Holcim Coastal BV gemaakte klem.

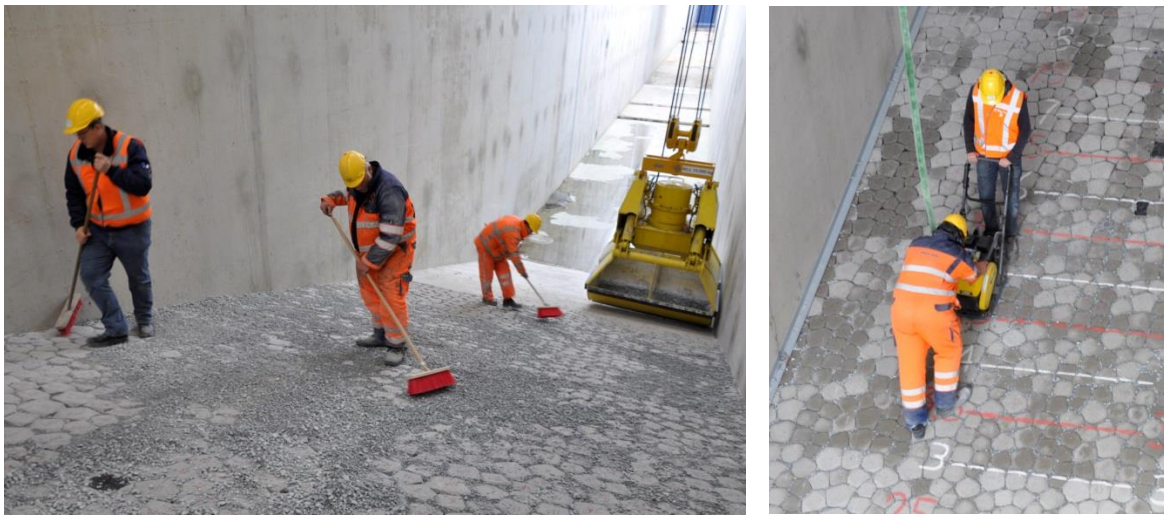
3.2.4 Inwasmateriaal

Voor het genereren van goede klemming tussen de zuilen is de steenzetting ingewassen met gebroken steenslag van Noors graniet (hoekig). De gradering van het inwasmateriaal is gekozen in overleg met Holcim Coastal BV. Vanwege de grote variatie aan spleetbreedtes in een Basalton 30 STS+ set is gekozen voor een relatief brede gradering, bestaand uit een

mengsel van meerdere standaardsorteringen. De zeefkromme van het resulterende inwasmateriaal is weergegeven in bijlage B.4.

De steenzetting is voorafgaand aan elke korteduurproef van de series 1 en 2 opnieuw ingewassen en aangetrild met een trilplaat (zie Figuur 3.7). Bij serie 3 (langeduurproef) is alleen voorafgaand aan de serie (voor proef B14) ingewassen en getrild.
Het aantrillen is gedaan omdat de toplaag vers is ingebouwd met relatief los inwasmateriaal tussen de zuilen. In de praktijk zou het inwasmateriaal na een paar jaar veel vaster zitten (door temperatuurvariaties, weer en wind). Door het gebruiken van een trilplaat is dus een situatie gecreëerd zoals op een echte dijk na enkele jaren. De gebruikte procedure is daarom niet als recept te beschouwen voor het aanbrengen van inwasmateriaal in de praktijk. Om dezelfde reden is na het inbouwen van de steenzetting gestart met een ingolfproef.

Het inwasmateriaal heeft de volgende karakteristieke waarden: D_{i15} = 5,8 mm, D_{i50} = 9,8 mm en D_{i90} = 16,4 mm. Deze karakteristieke waarden, die betrekking hebben op het schaalmodel, kunnen vertaald worden naar de ware grootte door deze te verschalen met de lengteschaal n_L = 1,6.



Figuur 3.7 Links: invegen van het inwasmateriaal. Rechts: aantrillen van de ingewassen steenzetting.

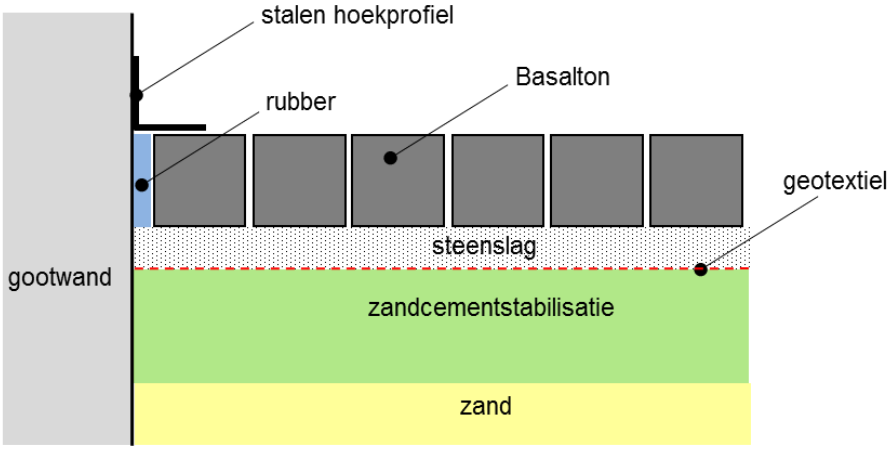
3.2.5 Afwerking van de modelranden en aanbrengen markering

Tussen de gootwand en de zetstenen is een strook rubber aangebracht, zie Figuur 3.8. 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 zichtbaar in Figuur 3.1, is op het talud belijning aangebracht ten behoeve van het uitvoeren van golfoploopmetingen (zie paragraaf 3.3.5) 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 het vlak van de teen naar de kruin, worden in dit

rapport soms uitgedrukt door middel van een x'-coördinaat, waarbij de waarde van x' correspondeert met het lijnnummer. Bijvoorbeeld: lijn 8,5 komt overeen met x' = 8,5 m.
Locaties in de breedterichting van de goot worden soms aangeduid door middel van Y-coördinaten, waarbij Y = 0 overeenkomt met de rechter gootwand (gezien vanaf het golfschot, dus de halzijde).
Een plattegrond van de testsectie en de belijning is weergegeven in bijlage B.2. Voorafgaand aan serie 1 zijn de niveaus van de lijnen ingemeten met een waterpasinstrument. Deze niveaus, welke relevant zijn voor de analyse van de golfoploopmetingen, zijn weergegeven in bijlage A.2.

Tijdens het onderzoek zijn proeven uitgevoerd bij meerdere waterstanden (zie paragraaf 3.4): de ingolfproeven zijn uitgevoerd bij een waterstand h = 5,4 m, en de overige proeven zijn uitgevoerd met een waterstand tussen 5,6 m en 6,0 m.
Bij een waterstand h = 5,4 m snijdt de stilwaterlijn het oorspronkelijke taludoppervlak bij circa x' = 9,5 m. Bij een waterstand tussen h = 5,6 m en 6,0 m snijdt de stilwaterlijn het oorspronkelijke taludoppervlak tussen respectievelijk circa x' = 10,1 m en 11,4 m.



Figuur 3.8 Aansluiting van de steenzetting tegen de gootwand (schematische dwarsdoorsnede).

3.3 Metingen

Gedurende het onderzoek zijn de volgende metingen uitgevoerd:

- Golfcondities
- Profielmetingen
- Beweging van de toplaag
- Uitspoeling van het inwasmateriaal
- Golfoploopmetingen

Bovengenoemde metingen worden in de onderstaande paragrafen toegelicht.

3.3.1 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 108,5 m, 114,5 m en 117,5 m vanaf het golfschot.

Door het toepassen van drie golfhoogtemeters met de juiste onderlinge afstanden kunnen de inkomende en de door de constructie gereflecteerde golven van elkaar worden onderscheiden en geanalyseerd 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 op basis van het met de gemeten reflectiecoëfficiënt C_r gecorrigeerde tijdsignaal van golfhoogtemeter WHM1:

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

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

Voor de golfhoogtemeters is tijdens de proeven B01 t/m B07 een bemonsteringsfrequentie van 30 Hz gebruikt, en tijdens de proeven B08 t/m B14 een bemonsteringsfrequentie van 500 Hz. Een frequentie van 30 Hz is voor golfhoogtemetingen voldoende.

3.3.2 Profielmetingen

Het niveau van het taludoppervlak is ingemeten 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 die een digitale reproductie van het werkelijke taludoppervlak vormen. De laserscanner bevindt zich tijdens de meting boven de goot (zie Figuur 3.9) 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.

De laserscans zijn standaard uitgevoerd vanaf drie locaties: een scan vanaf een loopbrug boven het hart van de goot ter hoogte van de teen van de dijk, en een scan vanaf elk van de gootwanden ter hoogte van de bovenrand van de testsectie. De resultaten van de drie 3D scans zijn gecombineerd ter vergroting van de nauwkeurigheid en om het volledige talud in te scannen (zonder schaduwen). Voorafgaand aan de metingen is eventueel op het talud liggend inwasmateriaal gewoonlijk eerst zoveel mogelijk verwijderd. De resultaten van de 3D laserscans zijn weergegeven in de bijlagen B.13 t/m B.16.

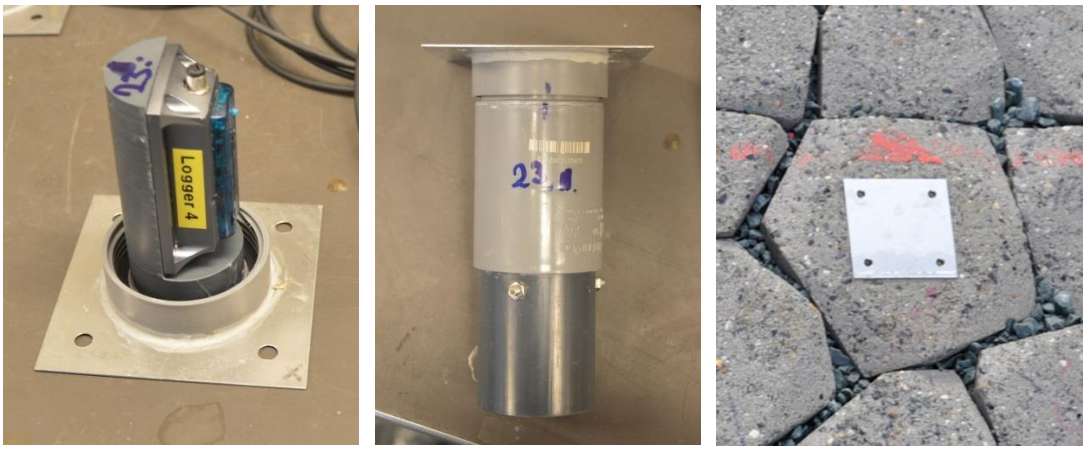


Figuur 3.9 Voor het inmeten van het taludoppervlak is gebruikgemaakt van een 3D laserscanner.

3.3.3 Beweging van de toplaag

Versnellingsopnemers:
Voor het registreren van beweging in de toplaag tijdens golfaanval zijn in de steenzetting 6 versnellingsopnemers aangebracht. De 6 versnellingsopnemers zijn geplaatst in het gebied waar de grootste belasting te verwachten was, enkele decimeters rechts van het midden van de goot. De locaties van de versnellingsopnemers zijn weergegeven op de plattegrond van de testsectie in bijlage B.2. Het niveau van het taludoppervlak ter plaatse van het hart van de versnellingsopnemers is ingemeten met een waterpasinstrument en is gegeven in bijlage A.2.

Hoewel de metingen gelukt lijken te zijn, zijn de gemeten verplaatsingen helaas onrealistisch groot (vele decimeters). Daardoor moet helaas geconcludeerd worden dat de resultaten onbruikbaar zijn (zie paragraaf 5.2).



Figuur 3.10 Links: een versnellingsopnemer. Midden: de versnellingsopnemer is ingebouwd in de behuizing. Rechts: de versnellingsopnemer is met de behuizing aangebracht binnenin een uitgeboorde Basalton 30 STS+ zuil.

De versnellingsopnemers zijn aangebracht binnenin uitgeboorde Basalton 30 STS+ zuilen. Elke versnellingsopnemer (Figuur 3.9, links) is in een waterdichte behuizing geplaatst (zie Figuur 3.9, midden). De behuizing is vervolgens in een uitgeboord gat in het midden van een zuil geplaatst en met schroeven vastgezet (zie Figuur 3.9, rechts). De behuizingen, welke

deels bestaan uit holle ruimte, zijn verzwaard met metaal, zodanig dat het gewicht van een geïnstrumenteerde zuil hetzelfde is als dat van een niet-geïnstrumenteerde zuil. De versnellingsopnemers zijn draadloos en zijn na elke proef uit de zuilen gehaald voor het uitlezen van de meetdata, zie Figuur 3.11.

De metingen met de versnellingsopnemers zijn uitgevoerd met een frequentie van 50 Hz. De sensoren kunnen de versnelling in 3 richtingen meten en zijn zodanig in de zuilen geplaatst dat de y-as haaks op het talud staat (zie Figuur 3.9). Door de gemeten versnelling twee keer te integreren kan de verplaatsing van de zuilen berekend worden.

Drukopnemer:
Voor de analyse is het belangrijk om nauwkeurig te weten wanneer golven de steenzetting bereikten. Voor het registreren van naderende golven is een drukopnemer aan de linker zijkant van de testsectie geplaatst (op de liggende zijde van het metalen hoekprofiel, dat tegen de gootwand was bevestigd). De locatie van de drukopnemer is weergegeven op de plattegrond van de testsectie in bijlage B.2. Het niveau van de drukopnemer is ingemeten met een waterpasinstrument en is gegeven in bijlage A.2.
Voor de drukopnemer is, net als bij de golfhoogtemeters, tijdens de proeven B01 t/m B07 een bemonsteringsfrequentie van 30 Hz gebruikt, en tijdens de proeven B08 t/m B14 een bemonsteringsfrequentie van 500 Hz.



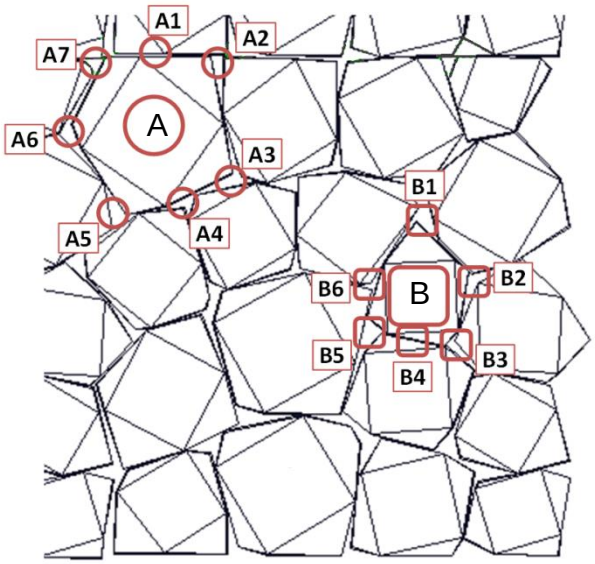
Figuur 3.11 De versnellingsopnemers zijn aangebracht binnenin uitgeboorde Basalton 30 STS+ zuilen. Na elke proef zijn ze uit de zuilen gehaald voor het uitlezen van de meetdata.

3.3.4 Uitspoeling van het inwasmateriaal

Na vrijwel alle proeven is de uitspoeldiepte van het inwasmateriaal gemeten rondom 18 vooraf gemarkeerde Basalton 30 STS+ zuilen. In bijlage B.2 zijn de locaties van de onderzochte zuilen gemarkeerd op de plattegrond van de testsectie (zie de groene symbolen). De onderzochte zuilen bevonden zich op 6 niveaus op het talud. Per niveau werd rondom 3 zuilen gemeten: een zuil in het linker-, midden- en rechterdeel van de testsectie (gezien vanaf het golfschot).

De metingen zijn uitgevoerd rondom 2 verschillende typen Basalton 30 STS+ zuilen, die in het onderhavige rapport zijn aangeduid als zuiltype A en zuiltype B (zie Figuur 3.12 voor de locatie van deze zuiltypen binnen de sets). Zuilen van het type A zijn in bijlage B.2 aangeduid met een groen rondje en de zuilen van type B met een groen vierkantje. Rondom elke zuil is de uitspoeldiepte standaard gemeten in 6 of 7 gaten en spleten (zie de meetlocaties A1-A7 en B1-B6 in Figuur 3.12). De uitspoeldiepte is gemeten met een duimstok en betreft de afstand vanaf de bovenrand van de zuil tot 'de bodem' van het gat.

In Tabel 3.2 is per niveau op het talud aangeduid rondom welk zuiltype is gemeten en op welk niveau en in welke set-rij de zuilen zich bevonden. De analyse van de meetresultaten is beschreven in paragraaf 5.1.



Figuur 3.12 Een Basalton 30 STS+ set met aanduiding van de zuiltypen A en B, en de locaties rondom deze zuilen waar de uitspoeldiepte van het inwasmateriaal is gemeten (A1-A7 en B1-B6).

Set-rij	Zuiltype	x'-coordinaat (m)	Z (m)
8	B	5,65	4,17
9	A	6,65	4,49
11	B	7,95	4,90
12	A	8,95	5,21
14	B	10,25	5,63
15	A	11,25	5,94

Tabel 3.2 Locatie en type van de zuilen, waar omheen de uitspoeldiepte van het inwasmateriaal is gemeten.

In aanvulling op de hierboven beschreven gestandaardiseerde uitspoeldieptemetingen, is na enkele proeven ook op meerdere niveaus de diepte gemeten van de diepst ogende gaten. Deze verspreid over het talud liggende metingen geven een indruk van de maximale uitspoeldiepte. Ook bij deze individuele metingen is onderscheid gemaakt tussen gaten in het linker-, midden- en rechterdeel van de goot.

3.3.5 Golfoploopmetingen

Tijdens de meeste proeven zijn ook golfoploopmetingen uitgevoerd. Deze golfoploopmetingen kunnen als referentie gebruikt worden voor andere typen steenzettingen binnen het onderzoeksprogramma “Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken”. De analyse van deze golfoploopmetingen is daarom niet uitgewerkt in het onderhavige rapport.

3.4 Proevenprogramma

De steenzetting is achtereenvolgens beproefd met de volgende drie proevenseries:

- *Series 1 en 2*: eerst zijn twee proevenseries met korteduurproeven (circa 1000 golven per proef) uitgevoerd. Per serie zijn alle proeven uitgevoerd met dezelfde golfsteilheid: de proeven van serie 1 zijn uitgevoerd met relatief lange golven (golfsteilheid van 2%), en de proeven van serie 2 zijn uitgevoerd met relatief korte golven (golfsteilheid van 4%). Binnen deze series is de golfhoogte bij elke volgende proef weer een stukje verhoogd totdat de steenzetting is bezweken, of totdat de maximaal op te wekken golfhoogte was bereikt.
- *Serie 3*: tijdens de laatste serie (serie 3) is een langeduurproef uitgevoerd met gelijkblijvende golfcondities. 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 niet hadden geleid tot bezwijken. De langeduurproef is voortgezet totdat de steenzetting is bezweken.

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 de steenzetting wel bezweken en is het talud wel eerst waar nodig gerepareerd voor aanvang van serie 3.

De gerealiseerde golfcondities (in modelwaarden) zijn weergegeven in Tabel 3.3 en in bijlage A.1. Alle 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.
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.5 t/m B.7.

Na elke proef van de series 1 en 2 is het uitgespoelde inwasmateriaal weer aangevuld en is de steenzetting 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 (langeduurproef) is de bekleding niet tussentijds ingewassen en aangetrild, maar alleen na de ingolfproef voor proef B14.

Aan het begin van de proevenseries 1 en 3 is op de nieuw aangelegde steenzetting eerst een ingolfproef uitgevoerd met een duur van 0,5 uur om de steenzetting en het inwasmateriaal zich zo goed mogelijk te laten zetten.
De ingolfproeven zijn uitgevoerd met een waterstand van 5,4 m boven de gootbodem. Tijdens de andere proeven is een waterstand aangehouden tussen 5,6 m en 6,0 m boven de gootbodem, afhankelijk van de beoogde golfhoogte. Hoe groter de waterdiepte, des te groter

de golfhoogte die kan worden opgewekt. Na afloop van elke proef is de waterstand verlaagd en de bekleding geïnspecteerd om te zien of er al schade was ontstaan.

Een proef werd gestopt zodra de steenzetting is bezweken of zodra de vooraf gestelde duur was bereikt. Een proevensérie werd beëindigd bij het optreden van bezwijken tijdens een proef, of wanneer de capaciteit van de Deltagoot het niet toeliet om nog grotere golven te maken. De genoemde waarden in Tabel 3.3 betreffen de condities zoals gemeten in de Deltagoot (schaal 1:1,6). De overeenkomstige belastingduur is op ware grootte √1,6 groter (zie paragraaf 2.2.2).

Serie	Proef	h [m]	H_s [m]	T_p [s]	$T_{m-1,0}$ [s]	s_{op} [-]	s_{om} [-]	ξ_{op} [-]	ξ_{om} [-]	N [-]	duur [h]	$H_s/(\Delta D)$ [-]
1	B01	5,42	0,76	5,02	4,60	0,019	0,023	2,41	2,21	468	0,50	3,26
	B02	5,62	0,99	5,69	5,21	0,020	0,023	2,38	2,18	994	1,43	4,29
	B03	5,62	1,13	6,09	5,59	0,020	0,023	2,38	2,19	996	1,53	4,89
	B04	5,62	1,33	6,48	5,93	0,020	0,024	2,34	2,14	1155	1,63	5,76
	B05	5,62	1,51	6,94	6,40	0,020	0,024	2,35	2,17	1148	1,75	6,50
	B06	5,62	1,66	7,40	6,75	0,019	0,023	2,40	2,19	1153	1,83	7,15
	B07	5,88	1,83	7,69	6,99	0,020	0,024	2,37	2,15	1244	1,95	7,91
2	B08	5,62	1,09	4,37	4,08	0,037	0,042	1,74	1,63	1046	1,10	4,70
	B09	5,62	1,36	4,77	4,41	0,038	0,045	1,70	1,57	1089	1,20	5,86
	B10	5,82	1,56	5,09	4,75	0,039	0,044	1,70	1,58	1103	1,28	6,75
	B11	5,93	1,74	5,40	5,10	0,038	0,043	1,71	1,61	1117	1,37	7,50
	B12	6,01	1,96	5,69	5,43	0,039	0,043	1,69	1,62	1062	1,42	8,47
3	B13	5,42	0,75	3,58	3,32	0,037	0,044	1,72	1,60	565	0,50	3,23
	B14	5,62	1,45	4,90	4,55	0,039	0,045	1,70	1,58	1603	1,84	6,25

Tabel 3.3 Proevenprogramma met de gerealiseerde hydraulische condities.

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)
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: $s_{om} = H_{m0}/((g/2\pi)\cdot T_{m-1,0}^2)$ (-)
ξ_{op} = brekerparameter op basis van de piekperiode: $\xi_{op} = \tan(\alpha)/\sqrt{(s_{op})}$ (-)
ξ_{om} = brekerparameter op basis van de spectrale golfperiode: $\xi_{om} = \tan(\alpha)/\sqrt{(s_{om})}$ (-)
g = versnelling van de zwaartekracht (m/s^2)
α = taludhelling (°)
N = aantal golven (-)
$H_s/(\Delta D)$ = belastingparameter (-)

4 Proefresultaten en observaties

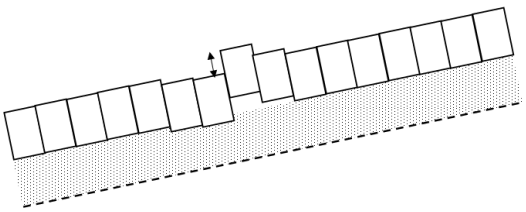
4.1 Indeling in schadecategorieën

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

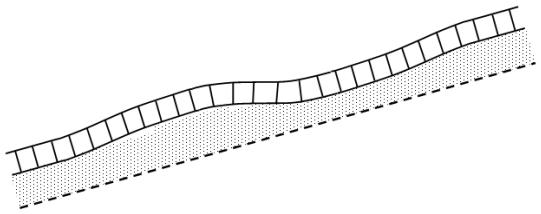
a) De verplaatsing van een zetsteen ten opzichte van een naastliggend zetsteen is kleiner dan 10 % van de dikte van de toplaag (0,1·D, met D = toplaagdikte) (zie Figuur 4.1), of de amplitude van de vervorming (S-vormig taludoppervlak, zie Figuur 4.2) is kleiner dan 20% van de toplaagdikte. In de praktijk 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 (proeven B01 – B07)

Proef B01 (ingolfproef, s_{op} = 0,02, H_s = 0,76 m, N = 468 golven)
Proef B01 was een ingolfproef met een relatief kleine waterdiepte van 5,42 m en een duur van 30 minuten. Na de proef waren geen veranderingen aan de steenzetting geconstateerd (schadecategorie a).

Noemenswaardige uitspoeling van het inwasmateriaal vond alleen plaats boven de 5,5-m-lijn. De spleten waren in die zone over het algemeen enkele centimeters uitgespoeld. Bij 4 spleten was geconstateerd dat ze nog maar tot de helft waren gevuld en een spleet bij de 7-m-lijn in het rechterdeel van de testsectie was zelfs bijna helemaal leeg.

Proef B02 (s_{op} = 0,02, H_s = 0,99 m, N = 994 golven)
Ook na proef B02 was er op het oog nog geen vervorming van de steenzetting te zien (schadecategorie a). Uit de laserscan bleek dat er slechts enkele mm vervorming was opgetreden (zie bijlage B.13).

Na de proef was geconstateerd dat boven de 6-m-lijn de spleten doorgaans enkele cm uitgespoeld waren. Bij circa 9 spleten was gemeten dat ze bijna of geheel leeg waren. Dit was vooral het geval bij spleten in de lengterichting van de goot, waardoor de golfoploop en golfneerloop het inwasmateriaal er makkelijk kon uitspoelen (zie Figuur 4.3).



Figuur 4.3 Meting van de uitspoeldiepte in een spleet na proef B02. Er werd hier circa 19 cm gemeten, wat betekent dat het inwasmateriaal volledig uit de spleet is weggespoeld.

Proef B03 (s_{op} = 0,02, H_s = 1,13 m, N = 996 golven)
Na proef B03 was er op het oog nog steeds geen vervorming van de steenzetting te zien (schadecategorie a). Op de verschilplot van de laserscan was een vervorming van slechts enkele mm te zien (zie bijlage B.13).

Het inwasmateriaal was vanaf ca. de 5-m-lijn doorgaans enkele cm uitgespoeld. Veel spleten waren tot de helft uitgespoeld, en sommige voor 2/3^{e} deel. Bij 2 spleten is volledige uitspoeling tot op de filterlaag gemeten.

Verder viel na de proef op dat het bovenvlak van sommige stenen afgesleten was (zie Figuur 4.4). Dit komt doordat het inwasmateriaal door de golven op het talud heen en weer gespoeld wordt. Zoals in Figuur 4.4, rechts, is te zien, was dat niet bij alle stenen het geval. De stenen rondom de aangetaste steen zijn nog intact. Dit is tijdens de navolgende proeven verder verergerd.



Figuur 4.4 Het bovenvlak van sommige zuilen was afgesleten na proef B03.

Proef B04 (s_{op} = 0,02, H_s = 1,33 m, N = 1155 golven)
Na afloop van proef B04 was er op het oog geen vervorming van de steenzetting te zien (schadecategorie a, zie Figuur 4.5, rechts). Uit de laserscan blijkt dat er circa 5 mm verschil aanwezig was tussen de top en het dal van de S-vormige vervorming (zie bijlage B.13).



Figuur 4.5 Links: brekende golf tijdens proef B04. Rechts: de steenzetting na de proef B04 zonder zichtbare vervorming.

De spleten waren vanaf ongeveer de 4,5-m-lijn enkele cm uitgespoeld. Vanaf circa 6 m waren veel spleten nog maar halfvol. Ook waren er veel spleten bijna geheel leeg, met nog slechts circa 1 à 3 cm inwasmateriaal onderin de spleten.

Proef B05 (s_{op} = 0,02, H_s = 1,51 m, N = 1148 golven)
De steenzetting zag er na proef B05 nog steeds goed uit, zonder zichtbare vervorming. Op de verschilplot van de laserscan was te zien dat er circa 1 cm verschil aanwezig was tussen top en dal van de S-vormige vervorming (zie bijlage B.14, schadecategorie a).

Het inwasmateriaal was vanaf de 4-m-lijn meerdere cm uitgespoeld. Bij circa 6 spleten was bijna volledige uitspoeling gemeten.

Proef B06 (s_{op} = 0,02, H_s = 1,66 m, N = 1153 golven)
Na afloop van proef B06 was de steenzetting in goede staat met vrijwel geen vervorming (schadecategorie a). Op de laserscan was te zien dat er circa 1 cm vervorming was ontstaan ten opzichte van het begin van de proevenserie (zie bijlage B.14).

Na de proef was zichtbaar dat vanaf ongeveer de 4-m-lijn de spleten tot de helft waren uitgespoeld. Bij circa 5 spleten was het inwasmateriaal bijna helemaal uitgespoeld. Ook waren veel spleten voor 2/3^{e} deel leeg.



Figuur 4.6 Meting van de uitspoeldiepte van het inwasmateriaal na proef B06. Links is circa 19 cm gemeten en rechts circa 17 cm.

Proef B07 (s_{op} = 0,02, H_s = 1,83 m, N = 1244 golven)
Proef B07 is uitgevoerd met de grootste significante golfhoogte van serie 1 (zie Figuur 4.7, links). Na de proef was, nadat een rechte balk over het talud was gelegd, een lichte vervorming zichtbaar (zie Figuur 4.8, links). Deze vervorming betrof volgens de laserscan circa 1 cm hoogteverschil tussen top en dal van het S-profiel (zie Figuur 4.8).

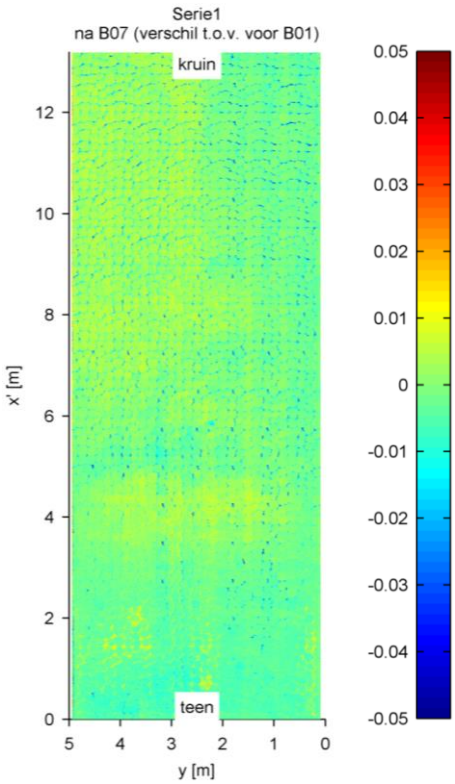
Na de proef waren weer veel spleten enkele cm uitgespoeld. Veel spleten waren tot de helft of voor 2/3^{e} deel uitgespoeld. Bij 14 spleten is gemeten dat het inwasmateriaal bijna helemaal of zelfs volledig is uitgespoeld (zie Figuur 4.9).

Omdat het golfschot bij deze golfsteilheid niet een nog grotere golfhoogte kon genereren, was de eerste serie na deze proef beëindigd. Omdat de steenzetting nauwelijks vervormd was, is in overleg met de opdrachtgevers besloten om zonder reparatie met dezelfde opstelling door te gaan naar serie 2.



Figuur 4.7 Links: inkomende golven tijdens proef B07. Rechts: golfaanval tijdens proef B07.





Figuur 4.8 Links: de steenzetting na proef B07. Onder de balk is een geringe vervorming zichtbaar. Rechts: 3D laserscan van de testsectie na de laatste proef van serie 1: na proef B07 (verschilmeting t.o.v. de situatie voor proef B01).



Figuur 4.9 Meting van de uitspoeldiepte na proef B07. Links is circa 18 cm gemeten en rechts circa 19 cm.

4.3 Serie 2: korteduurproeven (proeven B08 – B12)

Proef B08 (s_{op} = 0,04, H_s = 1,09 m, N = 1046 golven)
Omdat bij serie 2 de opstelling van serie 1 is gebruikt, was het niet nodig eerst een ingolfproef uit te voeren. Er is direct met een proef van ca. 1000 golven begonnen. Na deze proef was er geen zichtbare vervorming. Uit de laserscan bleek dat er een hoogteverschil van circa 0,5 cm tussen top en dal was, ten opzichte van de situatie aan het begin van serie 2 (zie bijlage B.15, schadecategorie a).

Het inwasmateriaal was vanaf ongeveer de 6,5-m-lijn enkele cm uitgespoeld. Sommige spleten waren bijna helemaal leeg gespoeld, op veel plekken voor 2/3^{e} deel.

Proef B09 (s_{op} = 0,04, H_s = 1,36 m, N = 1089 golven)
Na proef B09 was geen vervorming van de steenzetting op het oog zichtbaar (zie Figuur 4.10, rechts). De verschilplot van de laserscan laat echter circa 1 cm hoogteverschil tussen de maximale vervormingen van het S-profiel zien (zie bijlage B.15, schadecategorie a).

Uit de metingen van de uitspoeldiepte van het inwasmateriaal bleek dat de spleten vanaf ongeveer de 6,5-m-lijn enkele cm tot ongeveer de helft waren uitgespoeld. Bij circa 15 spleten was gemeten dat ze bijna geheel leeggespoeld waren. Bij meerdere spleten zat er nog maar enkele cm inwasmateriaal in de spleet.



Figuur 4.10 Links: brekende golf tijdens B09. Rechts: de steenzetting na proef B09.

Proef B10 (s_{op} = 0,04, H_s = 1,56 m, N = 1103 golven)

Na afloop van proef B10 was een lichte vervorming van de steenzetting zichtbaar (zie Figuur 4.11). Uit de laserscans volgde een hoogteverschil van deze vervorming van 1,5 cm (zie bijlage B.15, schadecategorie a). De vervorming had een top bij de 7,5-m-lijn en een dal tussen de 8,5-m-lijn en 9-m-lijn.

Vanuit de uitspoeldieptemetingen in de spleten bleek dat vanaf de 6,5-m-lijn de spleten enkele cm tot ongeveer de helft waren uitgespoeld. Er waren meerdere spleten die bijna of helemaal leeg gespoeld waren en veel spleten die voor 2/3^{e} deel leeg waren.



Figuur 4.11 Vervorming van de steenzetting na proef B10, zichtbaar met behulp van een balk langs het talud (links) en dwars op het talud (rechts)

Proef B11 (s_{op} = 0,04, H_s = 1,74 m, N = 1117 golven)

De vervorming is tijdens proef B11 nog wat groter geworden (zie Figuur 4.12). In de verschilplot van de laserscan is af te lezen dat het hoogteverschil circa 4 cm was (zie Figuur 4.14, links). Dit betreft nog steeds schadecategorie a.

Het inwasmateriaal was boven de 6-m-lijn behoorlijk uitgespoeld. Er waren veel spleten waaruit bijna al het inwasmateriaal was weggespoeld. In sommige spleten was zelfs een uitspoeldiepte van meer dan 18 cm gemeten, wat duidt op uitspoeling van het onderliggende filtermateriaal (zie ook Figuur 4.12, rechts). Op veel plekken waren de spleten voor 2/3^{e} deel uitgespoeld.
Na de proef zijn wat steentjes op het talud aangetroffen, die groter waren dan het inwasmateriaal. Deze steentjes waren afkomstig vanuit de filterlaag en zijn uitgespoeld door de volledig leeggespoelde spleten.



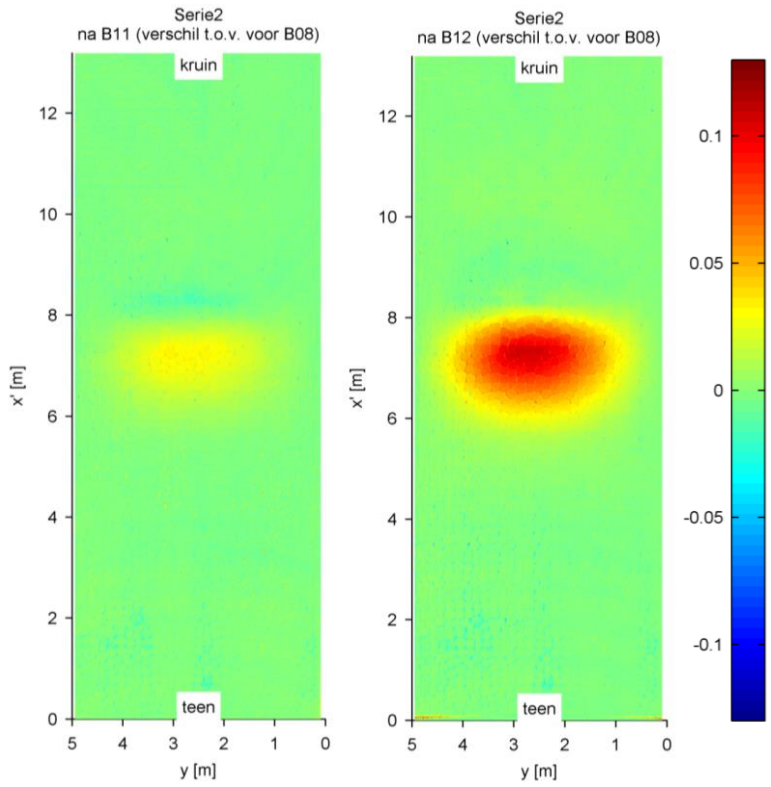
Figuur 4.12 Links: vervorming van het talud na proef B11. Rechts: meting van de uitspoeldiepte van het inwasmateriaal na proef B11. Op deze locatie is een diepte van circa 19,5 cm gemeten.

Proef B12 (s_{op} = 0,04, H_s = 1,96 m, N = 1062 golven)

Na proef B12 was de vervorming duidelijk toegenomen (zie Figuur 4.13, rechts). In de verschilplot van de laserscans is een hoogteverschil tussen de top en het dal van het S-profiel af te lezen van 11,5 cm (zie Figuur 4.14, rechts). Dit valt onder schadecategorie c, wat betekent dat de steenzetting bezweken is.



Figuur 4.13 Links: golfaanval tijdens proef B12. Rechts: vervorming van de steenzetting na proef B12.



Figuur 4.14 3D laserscan van de testsectie na de laatste twee proeven van serie 2: na proef B11 en na proef B12 (verschilmeting t.o.v. de situatie voor proef B08).

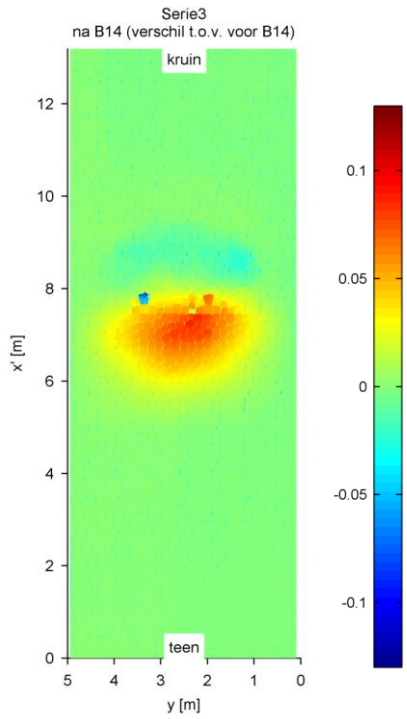
Uit de spleten was het inwasmateriaal boven ongeveer de 5,5-m-lijn enkele cm tot ongeveer de helft uitgespoeld. Ook waren er weer veel spleten, waaruit het inwasmateriaal helemaal was weggespoeld. Verder was uit veel spleten 1/2^{e} tot 2/3^{e} deel uitgespoeld.

Omdat de steenzetting bezweken was, en de serie daarmee was beëindigd, is de steenzetting vervolgens afgebroken tot circa x' = 5,20 m. Ook is het filtermateriaal uit dit deel van de opstelling verwijderd en nieuwe filtermateriaal aangebracht. De steenzetting is opnieuw ingebouwd, waarbij is gebruikgemaakt van de zuilen van de voorgaande series, mits ze niet beschadigd waren. Daarna is de steenzetting weer zorgvuldig ingewassen en aangetrild.

4.4 Serie 3: langeduurproef (proeven B13 – B14)

Proef B13 (ingolfproef, s_{op} = 0,04, H_s = 0,75 m, N = 565 golven)
Na deze ingolfproef waren geen veranderingen aan de steenzetting te zien. Omdat de ingolfproef niet relevant is voor de langeduurproef, zijn geen metingen gedaan ten aanzien van de uitspoeldiepte van het inwasmateriaal en er is geen verschilplot met de laserscan gemaakt.
Na deze proef is het inwasmateriaal voor de laatste keer aangevuld en is het aangetrild met de trilplaat.

Proef B14 (s_{op} = 0,04, H_s = 1,45 m, N = 1603 golven)
Tijdens deze proef is na circa 1:50 uur geconstateerd dat vlak onder de 8-m-lijn een afzonderlijke zuil uit de steenzetting omhoog stak, waarna de proef is gestopt. Door de inkomende golven die nog onderweg waren van het golfschot naar de modelopstelling is de zuil uiteindelijk uit de steenzetting gedrukt. Na het afpompen van het water was zichtbaar dat vlak onder die eerst zichtbare steen, nog een steen uit de steenzetting was gekomen (vlak boven de 7,5-m-lijn, zie Figuur 4.16). Ook was er een vrij grote vervorming zichtbaar, met een maximaal hoogteverschil van circa 9,5 cm tussen de top en het dal van het S-profiel (zie Figuur 4.16, rechts, en Figuur 4.15).



Figuur 4.15 3D laserscan van de testsectie na serie 3: na langeduurproef B14 (verschilmeting t.o.v. de situatie voor proef B14).



Figuur 4.16 De steenzetting na proef B14.

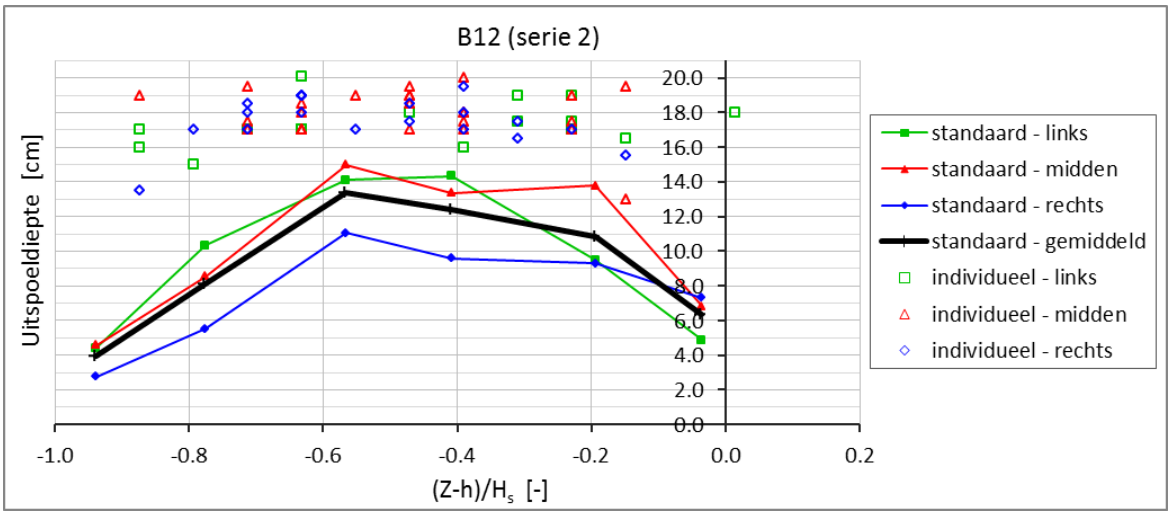
5 Analyse van de proefresultaten

5.1 Uitspoeling van het inwasmateriaal

Tijdens alle proeven spoelde een deel van het inwasmateriaal weg. Enkele opvallende zaken met betrekking tot de uitspoeling van het inwasmateriaal zijn reeds in hoofdstuk 4 beschreven per test. In de onderhavige paragraaf zijn de resultaten van de uitspoeldieptemetingen (zie ook paragraaf 3.3.4) beschreven.

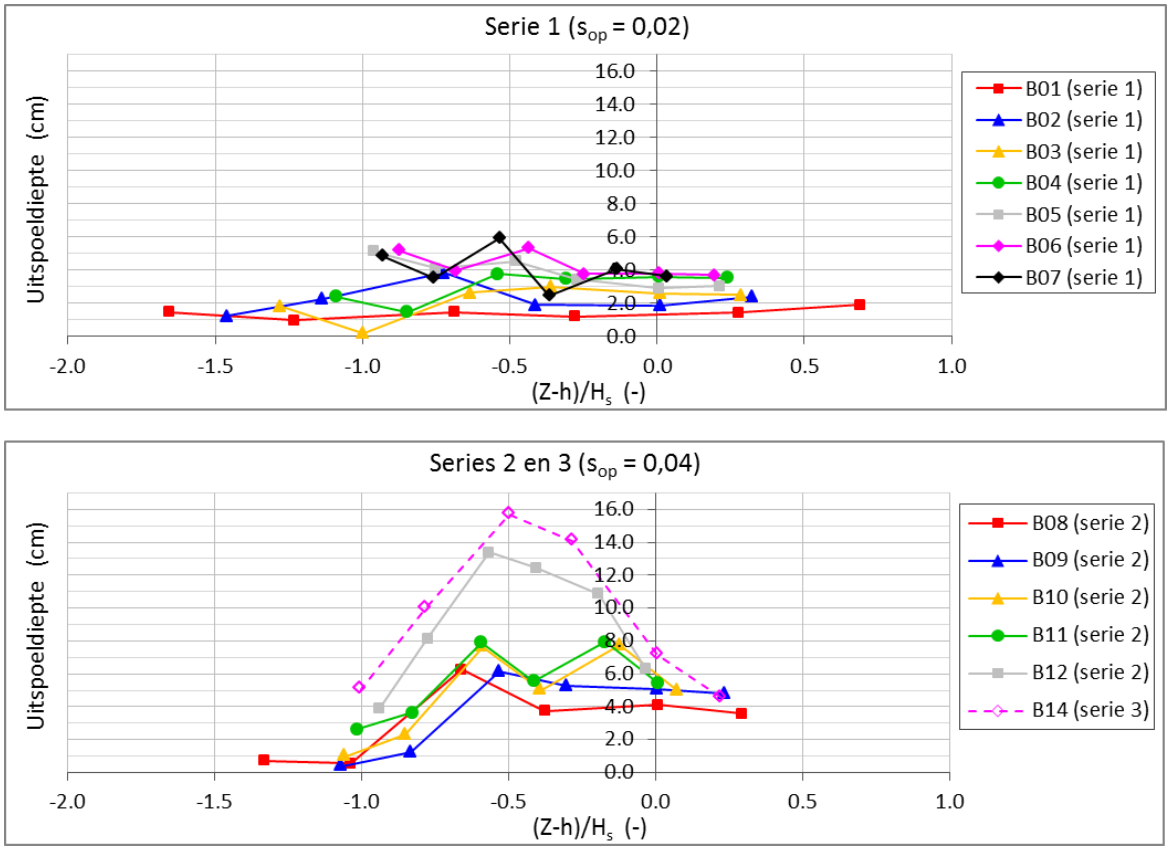
Na vrijwel alle proeven is de uitspoeldiepte van het inwasmateriaal gemeten rondom 18 vooraf gemarkeerde Basalton 30 STS+ zuilen. In bijlage B.2 zijn de locaties van de onderzochte zuilen gemarkeerd op de plattegrond van de testsectie (zie de groene symbolen), zie ook paragraaf 3.3.4.

De meetresultaten van alle proeven zijn weergegeven in de bijlagen B.8 t/m B.12 Ter illustratie zijn de uitspoeldieptemetingen van de laatste proef van serie 2 (proef B12) 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 beschouwde zuilen 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 grafieken van verschillende proeven eenvoudig met elkaar vergeleken worden ten aanzien van de locatie waar de meeste uitspoeling plaatsvindt.
De groene, rode en blauwe lijnen geven de gemiddelde uitspoeldiepte in respectievelijk het linker-, midden- en rechterdeel van de testsectie. Elk meetpunt van deze lijnen geeft de gemiddelde uitspoeldiepte van de 6 of 7 metingen rondom de zuil, op het betreffende niveau van het talud. Individuele gaten zijn dus dieper of minder diep uitgespoeld. De dikke zwarte lijn geeft het gemiddelde van de groene, rode en blauwe lijn.



Figuur 5.1 De gemeten uitspoeldiepte van het inwasmateriaal (in cm ten opzichte van de bovenrand van de zuil), uitgezet tegen het verticale niveau ten opzichte van de stilwaterlijn, dimensieloos gemaakt met de significante golfhoogte, van de laatste proef van serie 2 (proef B12). Er is onderscheid gemaakt tussen de gestandaardiseerde metingen rondom vooraf gemarkeerde zuilen en individuele metingen van de diepst ogende gaten. Tevens is onderscheid gemaakt tussen het linker-, midden- en rechterdeel van de testsectie.

In aanvulling op de vooraf gekozen locaties, is na enkele proeven ook op meerdere niveaus op het talud de diepte gemeten van de diepst ogende gaten. Deze verspreid over het talud liggende metingen geven een indruk van de maximale uitspoeldiepte, en zijn in Figuur 5.1 en de bijlagen weergegeven door middel van open meetpunten. Ook bij deze individuele metingen is onderscheid gemaakt tussen het linker-, midden- en rechterdeel van de goot.



Figuur 5.2 De gemeten gemiddelde uitspoeldiepte van het inwasmateriaal (in cm ten opzichte van de bovenrand van de zuil), uitgezet tegen het verticale niveau ten opzichte van de stilwaterlijn, dimensieloos gemaakt met de significante golfhoogte, van alle proeven.

De gemiddelde uitspoeldiepte (de zwarte lijn in Figuur 5.1 en bijlagen B.8 t/m B.12) van alle proeven is weergegeven in Figuur 5.2. De bovenste figuur geeft de resultaten van serie 1 met relatief lange golven, terwijl de onderste figuur de resultaten geeft van de series 2 (getrokken lijnen) en 3 (stippellijn) met relatief korte golven. De duur van de meeste proeven is circa N = 1000 golven, maar opgemerkt wordt dat de duur van proeven B01 (N = 468) en B14 (N = 1603) daarvan duidelijk afwijkt. In beide figuren hebben de assen dezelfde schaal, waardoor een goede vergelijking van de verschillende proevenseries mogelijk is.

In Figuur 5.2 is te zien dat bij zowel serie 1 als 2 de uitspoeldiepte van het inwasmateriaal gemiddeld toeneemt naarmate de significante golfhoogte groter wordt. Wel is er een duidelijk verschil zichtbaar tussen beide series ten aanzien van de uitspoeldiepte.

- Bij de lange golven van serie 1 vond de uitspoeling vrij gelijkmatig plaats over een grote lengte van het talud. De uitspoeldiepte is relatief gering: de gemiddelde uitspoeldiepte is in veel gevallen circa 2 tot 6 cm en maximaal circa 6 cm. Desondanks zijn individuele gaten duidelijk dieper uitgespoeld (zie bijlage B.9): in meerdere gaten is een uitspoeldiepte van 17 cm gemeten en een enkele keer zelfs 17,5 cm en 18 cm. Een

uitspoeldiepte van 18 cm heeft betrekking op een volledig, tot op het filter uitgespoeld gat. De invloed van de significante golfhoogte is tijdens serie 1 beperkt, gelet op de kleine afstand tussen de lijnen.

- Bij de relatief korte golven van serie 2 is het inwasmateriaal duidelijk dieper uitgespoeld dan tijdens serie 1. De grootste uitspoeling is op ongeveer een halve golfhoogte onder de waterlijn opgetreden. Daarnaast is de uitspoeling bij serie 2 vooral geconcentreerd in een kleinere zone van het talud (in de zone tussen de stilwaterlijn en orde $0{,}8 \cdot H_s$ onder de stilwaterlijn). Dat deze zone smaller is, ligt voor de hand, doordat bij de korte golven meer golfklappen optreden en de spreiding in de golfklaplocatie wat kleiner is dan bij de lange golven. Bij de proeven B08 t/m B11 (H_s = 1,1 m tot 1,7 m) blijkt de invloed van H_s gering: de gemiddelde uitspoeldiepte van deze proeven blijft beperkt tot maximaal 6 tot 8 cm. Na proef B12 (H_s = 2,0 m) is wel een grote gemiddelde uitspoeldiepte geconstateerd van maximaal ruim 13 cm.
  Tijdens serie 2 zijn ook individuele gaten wat dieper uitgespoeld dan tijdens serie 1. Tijdens de serie zijn meerdere gaten met een diepte van circa 20 cm gemeten. Dat betekent dat bij deze gaten zelfs steenslag uit de filterlaag is verdwenen. Dit sluit aan op de waarnemingen na de betreffende proeven van enkele op het talud liggende stenen, waarvan op basis van de grootte is aangenomen dat die afkomstig waren uit de filterlaag.

In Figuur 5.1 valt op dat het inwasmateriaal rond de zuilen van het type B (onder andere het 3^e en 5^e meetpunt van de lijnen vanaf de linkerkant) gemiddeld wat dieper is uitgespoeld dan rond de zuilen van het type A (onder andere het 4^e meetpunt vanaf de linkerzijde). Dit verklaart de dip in de lijnen. Tijdens de proeven bleek zuiltype A op het oog tamelijk representatief voor de gemiddelde uitspoeldiepte van een geheel Basalton 30 STS+ set, terwijl zuiltype B hoorde bij de diepst uitgespoelde zuilen van een set.

5.2 Beweging van de toplaag

De beweging van de zuilen is gemeten met behulp van versnellingsopnemers op 6 locaties (zie paragraaf 3.3.3 en bijlage B.2). Het niveau van het taludoppervlak ter plaatse van het hart van de versnellingsopnemers is ingemeten met een waterpasinstrument en is gegeven in bijlage A.2. Door de gemeten versnelling twee keer te integreren kan de verplaatsing van de zuilen berekend worden. Door de versnelling één keer te integreren kan de snelheid worden berekend. De volgende formules zijn in deze analyse gebruikt:

$$v(t_i) = a(t_i) \cdot \Delta t + v(t_{i-1}) \tag{5.1}$$

$$s(t_i) = \frac{a(t_i)}{2} \cdot \Delta t^2 + v(t_{i-1}) \cdot \Delta t + s(t_{i-1}) \tag{5.2}$$

Met:

a	=	versnelling (m/s^2)
v	=	snelheid (m/s)
s	=	verplaatsing (m)
Δt	=	grootte van de tijdstappen van de metingen (s)
t_i	=	beschouwde tijdstap (s)
t_{i-1}	=	tijdstap voor de beschouwde tijdstap (s)

Hoewel de metingen gelukt lijken te zijn, zijn de gemeten verplaatsingen helaas onrealistisch groot (vele decimeters). Mogelijk dat de instrumenten niet goed omgaan met trillingen van de steenzetting, die grote versnellingen met zich mee brengen, maar zonder netto verplaatsing. Daardoor moet helaas geconcludeerd worden dat de resultaten onbruikbaar zijn.

5.3 Stabiliteit van de steenzetting

De steenzetting is tijdens het onderzoek tweemaal bezweken, namelijk:

- Aan het einde van serie 2 (s_{op} = 0,04), bij H_s = 1,96 m
- Aan het einde van serie 3 (s_{op} = 0,04 met een langdurige belasting), bij H_s = 1,45 m na 1603 golven

Na elke proef is de waterstand verlaagd en is de vervorming van het taludoppervlak en eventuele 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 is berekend met de gemeten gemiddelde soortelijke massa van de zuilen. Er is gebruikgemaakt 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.
Het weergegeven hoogteverschil betreft het maximale hoogteverschil tussen de top en het dal van de kattenrug, dat na afloop van de proef is gemeten. De amplitude kan bepaald worden door deze waarde te delen door twee.

De belangrijkste proeven van elke serie zijn de proeven met de hoogste golfhoogte waarbij schadecategorie a of b is opgetreden en de proeven met de laagste golfhoogte waarbij schadecategorie c of d is opgetreden. Deze proeven zijn in de tabel gekleurd, corresponderend met de kleuren van de punten en lijnen in Figuur 5.3.

serie	proef	h [m]	H_s [m]	T_p [s]	$T_{m-1,0}$ [s]	s_{op} [-]	s_{om} [-]	ξ_{op} [-]	ξ_{om} [-]	N [-]	$\underline{H_s}$ (ΔD) [-]	scha-de	hoogte-verschil [cm]
1	B01	5,42	0,76	5,02	4,60	0,019	0,023	2,41	2,21	468	3,26	a	0
	B02	5,62	0,99	5,69	5,21	0,020	0,023	2,38	2,18	994	4,29	a	0,5
	B03	5,62	1,13	6,09	5,59	0,020	0,023	2,38	2,19	996	4,89	a	0,5
	B04	5,62	1,33	6,48	5,93	0,020	0,024	2,34	2,14	1155	5,76	a	0,5
	B05	5,62	1,51	6,94	6,40	0,020	0,024	2,35	2,17	1148	6,50	a	1
	B06	5,62	1,66	7,40	6,75	0,019	0,023	2,40	2,19	1153	7,15	a	1
	B07	5,88	1,83	7,69	6,99	0,020	0,024	2,37	2,15	1244	7,91	a	1
2	B08	5,62	1,09	4,37	4,08	0,037	0,042	1,74	1,63	1046	4,70	a	0,5
	B09	5,62	1,36	4,77	4,41	0,038	0,045	1,70	1,57	1089	5,86	a	1
	B10	5,82	1,56	5,09	4,75	0,039	0,044	1,70	1,58	1103	6,75	a	1,5
	B11	5,93	1,74	5,40	5,10	0,038	0,043	1,71	1,61	1117	7,50	a	4
	B12	6,01	1,96	5,69	5,43	0,039	0,043	1,69	1,62	1062	8,47	c	11,5
3	B13	5,42	0,75	3,58	3,32	0,037	0,044	1,72	1,60	565	3,23	a	-
	B14	5,62	1,45	4,90	4,55	0,039	0,045	1,70	1,58	1603	6,25	d	9,5

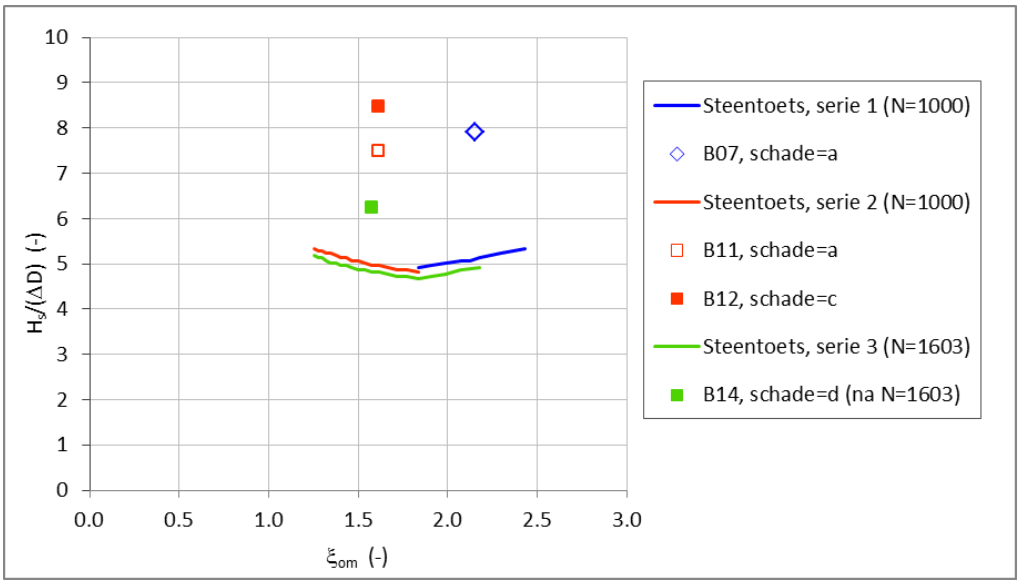
Tabel 5.1 Overzicht van het proevenprogramma met de gerealiseerde golfcondities en de gemeten schade. De belangrijkste proeven zijn gekleurd, corresponderend met de kleuren van Figuur 5.3.

Voor elke proevenserie is met Steentoets berekend bij welke significante golfhoogte de steenzetting volgens Steentoets2014, versie v14.1.2.1 (Klein Breteler, 2014), zal bezwijken, zie Tabel 5.2. In de tabel is ook de bijbehorende belastingparameter $H_s/(\Delta D)$ gegeven.
Bij de berekening met Steentoets is gebruikgemaakt van de modelwaarden zoals deze gemeten zijn in de Deltagoot. Dat geldt ook voor de waarde van de wrijvingscoëfficiënt tussen de zuilen, zie paragraaf 3.2.3. De berekeningen zijn gebaseerd op de gemeten golfsteilheid s_{om} (op basis van de spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$).

Serie	Invoer		Resultaat		
	s_{om} [-]	N [-]	H_s [m]	ξ_{om} [-]	$H_s/(\Delta D)$ [-]
1	0,024	1000	1,19	2,15	5,13
2	0,043	1000	1,15	1,62	4,97
3	0,045	1603	1,12	1,58	4,82

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 3.4 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 bezwijken) is opgetreden en de proef met de laagste significante golfhoogte waarbij schadecategorie c of d (wel bezwijken) is opgetreden. De meetpunten met de open symbolen hebben betrekking op de proeven met 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. In 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 meetpunten ruim boven de lijnen liggen die met Steentoets zijn berekend. Tijdens serie 1 is de steenzetting niet bezweken. Het meetpunt met schade a (geen bezwijken) van deze serie ligt ver boven de berekende lijn. De steenzetting voldeed tijdens deze serie beduidend beter dan aanvankelijk op basis van Steentoets werd verwacht.
Tijdens serie 2 is uiteindelijk bezwijken opgetreden. Zowel het meetpunt met schade a (geen bezwijken) als het meetpunt met schade c (wel bezwijken) liggen ver boven de berekende lijn. Hoewel de series 1 en 2 zijn uitgevoerd op exact dezelfde steenzetting trad tijdens serie 2 wel duidelijk 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. De steenzetting lijkt derhalve wat gevoeliger voor korte golven dan voor lange golven.
Na serie 2 is de steenzetting opnieuw aangebracht, met uitzondering van de onderste 7 rijen met sets. Tijdens serie 3 kwamen enkele zuilen uit het talud na 1603 golven. Dat is wat sneller dan op basis van de resultaten van de series 1 en 2 te verwachten was, maar desondanks ligt het meetpunt ruim boven de lijn die met Steentoets is berekend voor een proefduur van 1603 golven. De steenzetting voldeed tijdens alle series dus beter dan aanvankelijk op basis van Steentoets verwacht werd.

5.4 Stabiliteitsfactor

De stabiliteitsfactor voor Basalton 30 STS+ is berekend op basis van de drie uitgevoerde proevenseries. Met deze stabiliteitsfactor zal in de toekomst het resultaat van Steentoets-berekeningen zodanig gecorrigeerd worden 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 de code van Steentoets. De toplaagdikte die volgens Steentoets nodig is (zonder gebruik van de stabiliteitsfactor), zal in het programma gedeeld worden door de 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 door Rijkswaterstaat vastgestelde procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor op basis van de Deltagootproeven is gedetailleerd beschreven in bijlage C. In de onderhavige paragraaf is dit uitgewerkt voor Basalton 30 STS+.

De eerste stap bij het bepalen van de stabiliteitsfactor is het per serie vaststellen van de belasting waarbij de steenzetting is bezweken (schadecategorie c of d). Bij serie 1 en 2 (korteduurproeven met een vergelijkbaar aantal golven) is de significante golfhoogte bij bezwijken van belang: de bezwijkgolfhoogte $H_{s,bezwijk}$. Bij serie 3 (langeduurproef met dezelfde significante golfhoogte) is, naast de significante golfhoogte en golfperiode van de proef, ook het aantal golven tot bezwijken van belang.
Wanneer de steenzetting tijdens een korteduurproevenserie bezwijkt, is conform de procedure uit bijlage C aangehouden dat $H_{s,bezwijk}$ gelijk is aan het gemiddelde van de significante golfhoogte waarbij daadwerkelijk bezwijken is opgetreden (schadecategorie c of d) en de significante golfhoogte in dezelfde serie waarbij nog geen bezwijken is opgetreden (schadecategorie a of b).
Als tijdens een korteduurproevenserie bij de maximale golfhoogte nog géén schade van schadecategorie c of d is opgetreden, wordt er een fictieve proef toegevoegd met een 15% hogere significante 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 bezwijken aan de steenzetting zou zijn opgetreden. Dat resulteert in een bezwijkgolfhoogte die gelijk is aan het gemiddelde van de maximaal uitgevoerde significante golfhoogte en de significante golfhoogte van de fictieve proef.
Het voorgaande leidt tot de volgende bezwijkgolfhoogtes voor de drie proevenseries:

- *Serie 1*:
  Aan het einde van serie 1 was de steenzetting nog niet bezweken ondanks een maximale significante golfhoogte H_s = 1,83 m tijdens proef B07. Conform de procedure is aangenomen dat bij een fictieve proef met een 15% hogere significante golfhoogte wél bezwijken zou zijn opgetreden, dus bij H_s = 2,11 m. Dat resulteert in een bezwijkgolfhoogte $H_{s,bezwijk}$ = (1,83+2,11)/2 = 1,97 m.
- *Serie 2*:
  Tijdens serie 2 was nog geen bezwijken opgetreden tijdens proef B11 (H_s = 1,74 m), maar wel tijdens B12 (H_s = 1,96 m). Dat resulteert in een bezwijkgolfhoogte $H_{s,bezwijk}$ = 1,85 m.
- *Serie 3*:
  Voor de langeduurproef (proef B14) geldt, naast de significante golfhoogte en golfperiode van de proef, ook het aantal golven (N) tot bezwijken als het resultaat van de proef: $H_{s,bezwijk}$ = 1,45 m, T_p = 4,90 s en N = 1603. De eerste proef van deze serie wordt niet meegeteld omdat het een ingolfproef betreft, waarna de steenzetting opnieuw was ingewassen.

Zoals beschreven, is de stabiliteitsfactor een correctiefactor op de toplaagdikte die volgens Steentoets benodigd is. Voor het berekenen van de stabiliteitsfactor zijn conform de procedure uit bijlage C 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; met stabiliteitsfactor = 1), bij de bezwijkgolfhoogte van de betreffende serie (m).

$D_{Steentoets}$ = de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets (als gerekend wordt met klemming, etc. en met stabiliteitsfactor = 1), bij de bezwijkgolfhoogte van de betreffende serie (m).

$D_{in\ modelproeven}$ = de toplaagdikte die toegepast is in de Deltagoot (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 $H_{s,bezwijk}$ en met stabiliteitsfactor = 1) de toplaagdikte berekend die volgens Steentoets bij de geconstateerde $H_{s,bezwijk}$ 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 Steentoetsberekeningen zijn uitgevoerd met de waarden zoals gemeten in het model, dus op schaal. Er is per serie 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 gemiddelde hoogte van de zetstenen (afstand tussen het grond- en bovenvlak) aangehouden.

Conform de procedure wordt de stabiliteitsfactor vervolgens voor elke serie afzonderlijk bepaald met formule (5.3).

$$f_{stab} = \left(\frac{D_{Steentoets}}{D_{in\ modelproeven}} - \frac{D_{Steentoets}}{D_{ST\ eigen\ gewicht}} \right) / \gamma + \frac{D_{Steentoets}}{D_{ST\ eigen\ gewicht}} \qquad (5.3)$$

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: $\gamma = 1{,}1 + 1{,}89 \cdot \sigma$ (5.4)

Met:

σ = standaardafwijking in de proefresultaten van de drie series (-)

Het gemiddelde van de stabiliteitsfactoren van de afzonderlijke proevenseries is de stabiliteitsfactor die wordt aangehouden als eindresultaat voor het beproefde steenzettingtype. 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	n.v.t.	1,97*	8,51	0,179	0,267	0,400
Serie 2	n.v.t.	1,85*	7,98	0,179	0,248	0,352
Serie 3	1603	1,45	6,25	0,179	0,215	0,288

Tabel 5.3 Geschatte $H_s/(\Delta D)$ bij het begin van bezwijken conform de procedure uit bijlage C, 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	1,492			0,668	1,27
Serie 2	1,385			0,705	1,20
Serie 3	1,201			0,747	1,08
	μ	σ	γ		μ
Serie 1 t/m 3	1,36	0,15	1,38		1,18

Tabel 5.4 Berekende stabiliteitsfactor, veiligheidsfactor en enkele tussenresultaten.

Conform de door Rijkswaterstaat vastgestelde procedure (zie bijlage C) resulteren de Deltagootproeven in de volgende stabiliteitsfactor voor Basalton 30 STS+: f_{stab} = 1,18.

Hoewel de proeven zijn uitgevoerd met Basalton STS+ van 29 cm hoog (op schaal 1:1,6, dus 17,9 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 Basalton 30 STS+ onder golfaanval te onderzoeken is een dijk met een hoogte van 11,0 m en een buitentalud met een helling van 1:3 opgebouwd in de nieuwe Deltagoot van Deltares in Delft. Deze dijk is tussen Z = +2,4 m en Z = +6,6 m boven de gootbodem voorzien van een Basalton 30 STS+ bekleding met de eigenschappen zoals weergegeven in Tabel 6.1 (de genoemde maten zijn in modelschaal). De Basalton 30 STS+ zuilen zijn getest op schaal 1:1,6 ten opzichte van de ware grootte. Onder en boven de testsectie is een dummy talud toegepast van glad beton.
Tijdens de stabiliteitsproeven zijn ook golfoploopmetingen uitgevoerd, die als vergelijking kunnen dienen bij het bepalen van de golfoploopreducerende werking van andere typen steenzettingen. Deze golfoploopmetingen zijn niet in het onderhavige rapport geanalyseerd.

Eigenschap	**Serie 1**	**Serie 2**	**Serie 3**
Algemeen			
- taludhelling (tanα) [-]	1:3		
Basalton 30 STS+			
- zuilhoogte (D) [cm]	17,9		
- soortelijke massa (ρ_s) [kg/m^3]	2297		
- open oppervlak (Ω) [%]	9,4		
Filterlaag			
- filterlaagdikte (b) [cm]	7,9		7,8
- karakteristieke korrelgroottes [mm]	D_{f15} = 11,3 D_{f50} = 18,0 D_{f90} = 30,1		D_{f15} = 12,4 D_{f50} = 19,4 D_{f90} = 30,1
Inwasmateriaal (Noors graniet)			
- karakteristieke korrelgroottes [mm]	D_{i15} = 5,8 D_{i50} = 9,8 D_{i90} = 16,4		

Tabel 6.1 Overzicht van de belangrijkste eigenschappen van de testsectie (tussen Z = +2,4 m en + 6,6 m).

De steenzetting is achtereenvolgens beproefd met de volgende drie proevenseries:

- *Series 1 en 2*: eerst zijn twee proevenseries met korteduurproeven (circa 1000 golven per proef) uitgevoerd. Per serie zijn alle proeven uitgevoerd met dezelfde golfsteilheid: de proeven van serie 1 zijn uitgevoerd met relatief lange golven (golfsteilheid van 2%), en de proeven van serie 2 zijn uitgevoerd met relatief korte golven (golfsteilheid van 4%). Binnen deze series is de golfhoogte bij elke volgende proef weer een stukje verhoogd totdat de steenzetting is bezweken, of totdat de maximaal op te wekken golfhoogte was bereikt.
- *Serie 3*: tijdens de laatste serie (serie 3) is een langeduurproef uitgevoerd met gelijkblijvende golfcondities. 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 niet hadden geleid tot bezwijken. De langeduurproef is voortgezet totdat de steenzetting is bezweken.

De resultaten van deze proevenseries zijn samengevat in Tabel 5.1 en Figuur 5.3 (paragraaf 5.3). Conform de door Rijkswaterstaat vastgestelde procedure (zie bijlage C) resulteren de

Deltagootproeven in de volgende stabiliteitsfactor voor Basalton 30 STS+: f_{stab} = 1,18. Deze factor is opgenomen in Steentoets2015.

Hoewel de proeven zijn uitgevoerd met Basalton STS+ van 29 cm hoog (op schaal 1:1,6, dus 17,9 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. (2016), *Stabiliteit van Basalton 30 STS steenzetting bij golfaanval, Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken*, Deltares, rapport 1208618-007-HYE-0008, versie 4.0, maart 2016

A Tabellen

Serie	Proef	h [m]	H_s [m]	T_p [s]	$T_{m-1,0}$ [s]	s_{op} [-]	s_{om} [-]	ξ_{op} [-]	ξ_{om} [-]	N [-]	duur [h]	$H_s/(\Delta D)$ [-]	Schade-categorie	Max. hoogteverschil S-profiel [cm]
1	B01 (ingolven)	5.42	0.76	5.02	4.60	0.019	0.023	2.41	2.21	468	0.50	3.26	a	0
	B02	5.62	0.99	5.69	5.21	0.020	0.023	2.38	2.18	994	1.43	4.29	a	0.5
	B03	5.62	1.13	6.09	5.59	0.020	0.023	2.38	2.19	996	1.53	4.89	a	0.5
	B04	5.62	1.33	6.48	5.93	0.020	0.024	2.34	2.14	1155	1.63	5.76	a	0.5
	B05	5.62	1.51	6.94	6.40	0.020	0.024	2.35	2.17	1148	1.75	6.50	a	1
	B06	5.62	1.66	7.40	6.75	0.019	0.023	2.40	2.19	1153	1.83	7.15	a	1
	B07	5.88	1.83	7.69	6.99	0.020	0.024	2.37	2.15	1244	1.95	7.91	a	1
2	B08	5.62	1.09	4.37	4.08	0.037	0.042	1.74	1.63	1046	1.10	4.70	a	0.5
	B09	5.62	1.36	4.77	4.41	0.038	0.045	1.70	1.57	1089	1.20	5.86	a	1
	B10	5.82	1.56	5.09	4.75	0.039	0.044	1.70	1.58	1103	1.28	6.75	a	1.5
	B11	5.93	1.74	5.40	5.10	0.038	0.043	1.71	1.61	1117	1.37	7.50	a	4
	B12	6.01	1.96	5.69	5.43	0.039	0.043	1.69	1.62	1062	1.42	8.47	c	11.5
3	B13 (ingolven)	5.42	0.75	3.58	3.32	0.037	0.044	1.72	1.60	565	0.50	3.23	a	-
	B14	5.62	1.45	4.90	4.55	0.039	0.045	1.70	1.58	1603	1.84	6.25	d	9.5

Bijlage A.1, Proevenprogramma met de gerealiseerde hydraulische condities

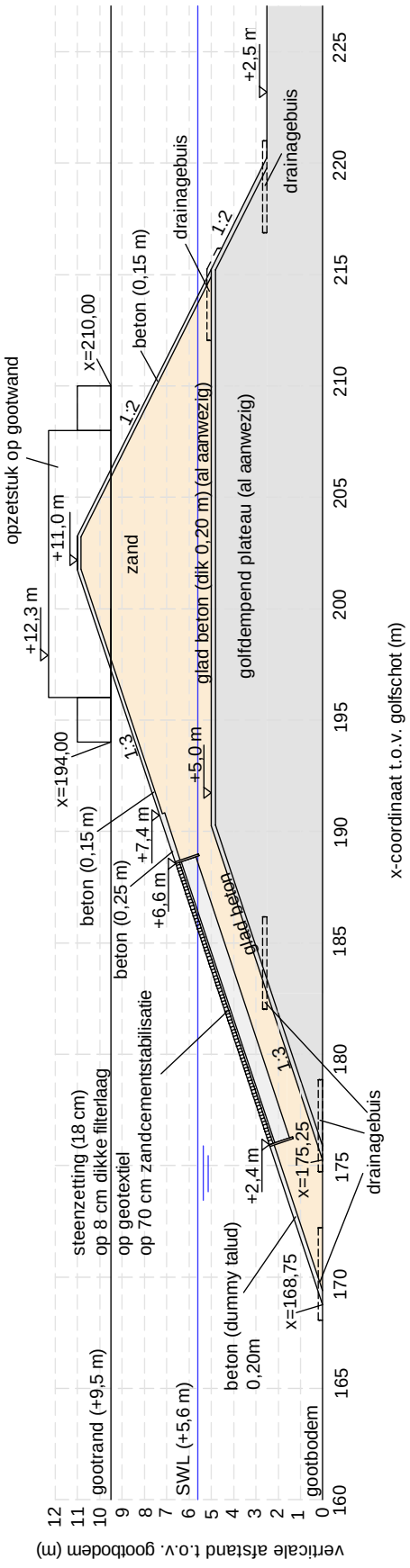
Niveau van lijnen op het talud			
testsectie		boventalud	
lijn	Z [m boven gootbodem]	lijn	Z [m boven gootbodem]
0	2.382	13.5	6.658
0.5	2.543	14	6.815
1	2.686	14.5	6.966
1.5	2.855	15	7.125
2	3.010	15.5	7.286
2.5	3.170	16	7.453
3	3.332	16.5	7.622
3.5	3.503	17	7.781
4	3.644	17.5	7.936
4.5	3.801	18	8.094
5	3.967	18.5	8.248
5.5	4.130	19	8.418
6	4.280	19.5	8.565
6.5	4.443	20	8.725
7	4.601	20.5	8.888
7.5	4.754	21	9.048
8	4.913	21.5	9.207
8.5	5.071	22	9.355
9	5.228	22.5	9.506
9.5	5.390	23	9.651
10	5.552	23.5	9.807
10.5	5.702	24	9.973
11	5.864	24.5	10.129
11.5	6.008	25	10.290
12	6.170	25.5	10.459
12.5	6.328	26	10.618
13	6.483	26.5	10.775
		27	10.915
		kruin	10.962

Niveau versnellingsopnemers	
nr	Z [m boven gootbodem]
VPL1	5.456
VPL2	5.206
VPL3	4.972
VPL4	4.739
VPL5	4.494
VPL6	4.249

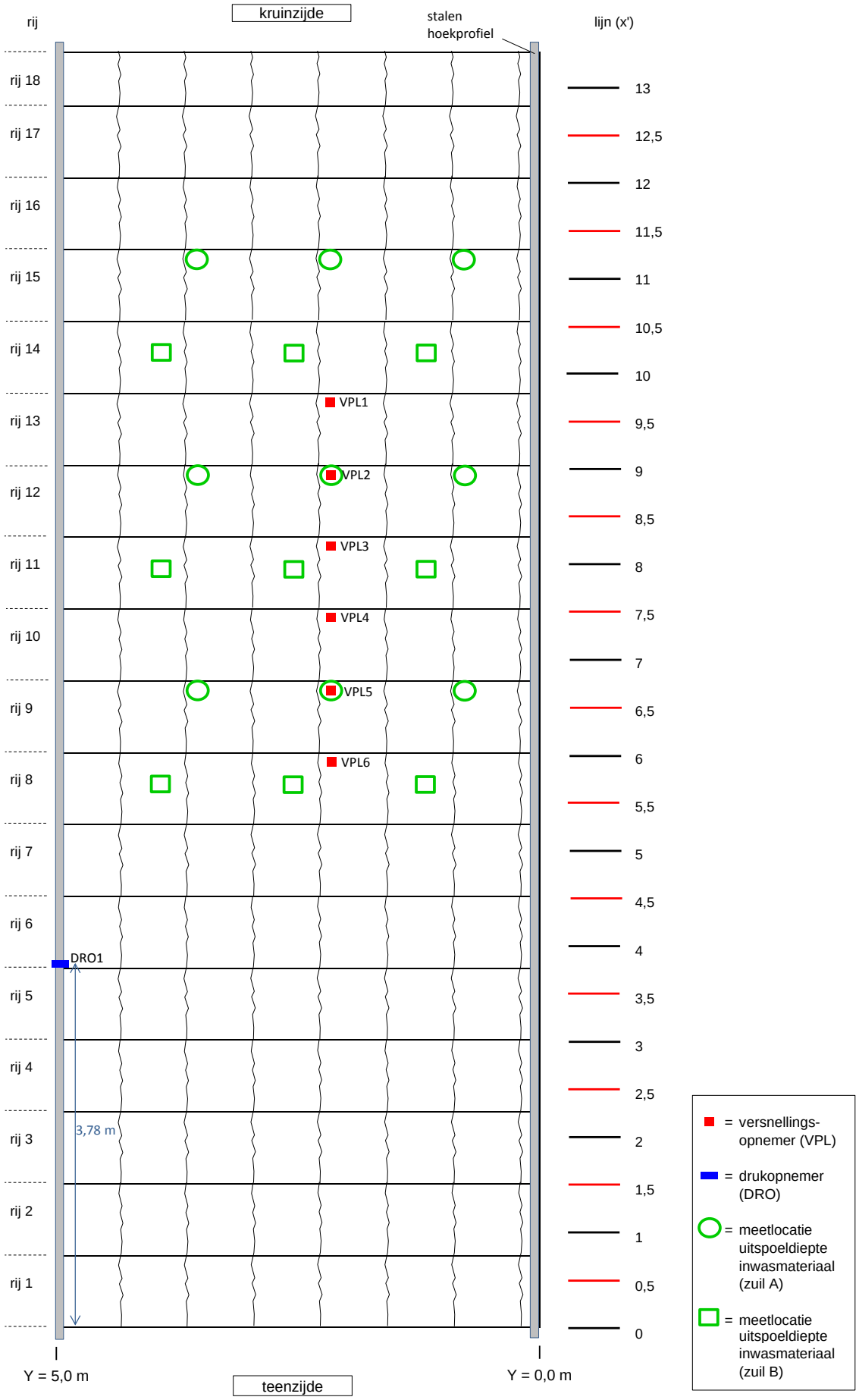
Niveau drukopnemer	
nr	Z [m boven gootbodem]
DRO1	3.628

Bijlage A.2, Gemeten niveaus van de lijnen op het talud, versnellingsopnemers en drukopnemer

B Figuren

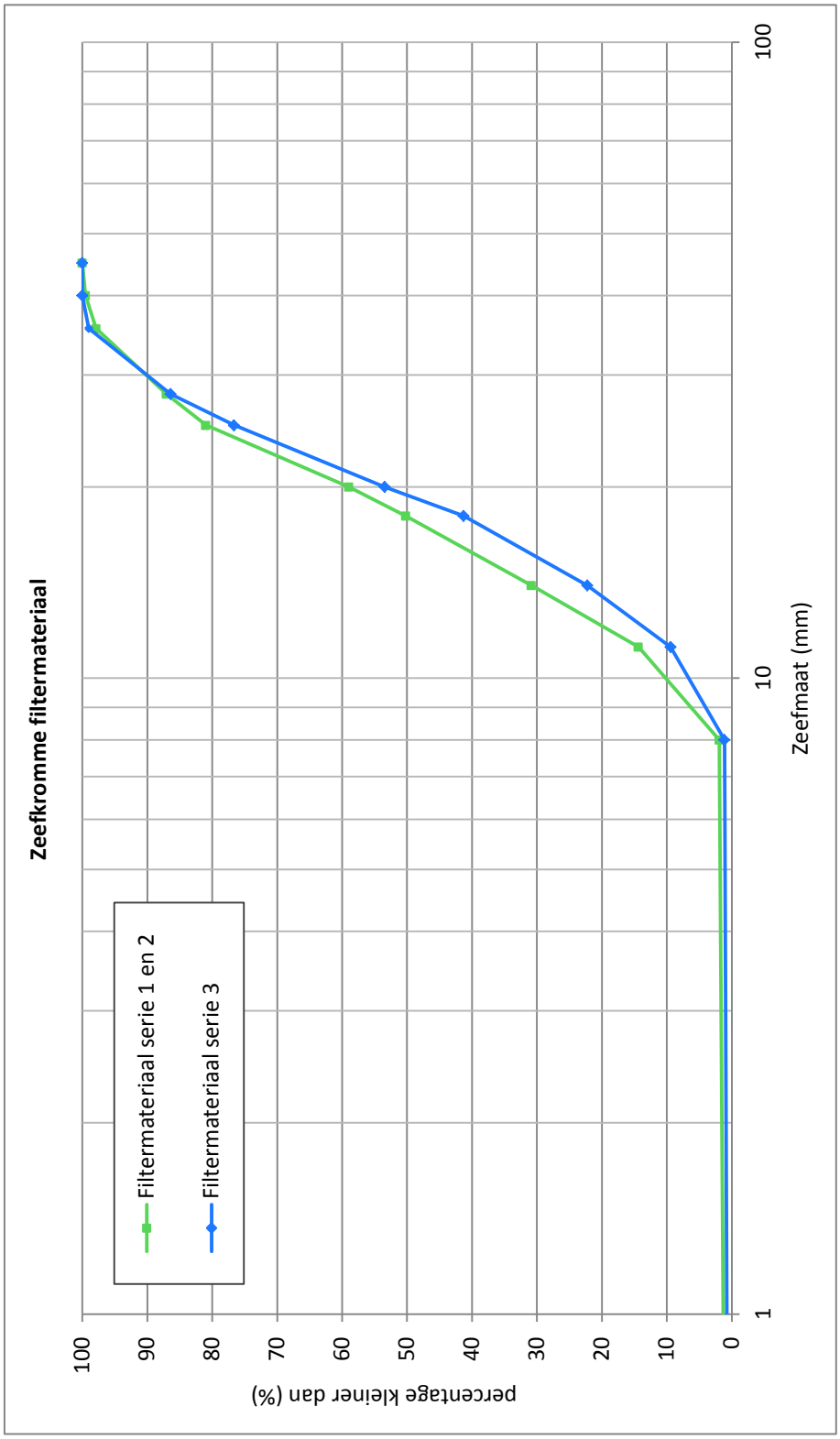


Lengtedoorsnede van de modelopstelling (schematisch)		
Deltares	1208618.008	Fig. B.1

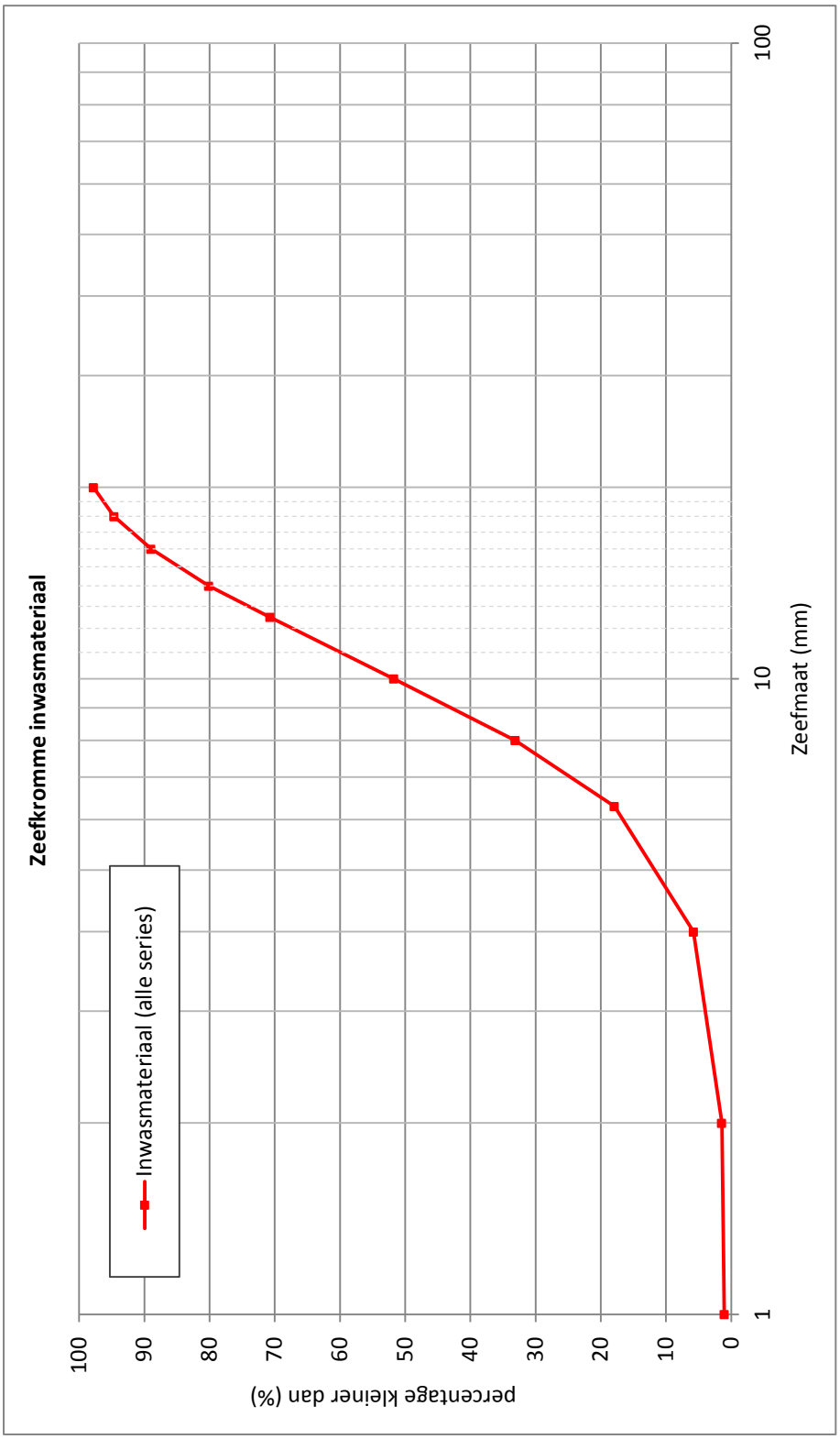


Plaatsingspatroon Basalton 30 STS+ sets, locatie versnellingsopnemers en meetlocaties van de uitspoeldiepte van het inwasmateriaal (schematisch)

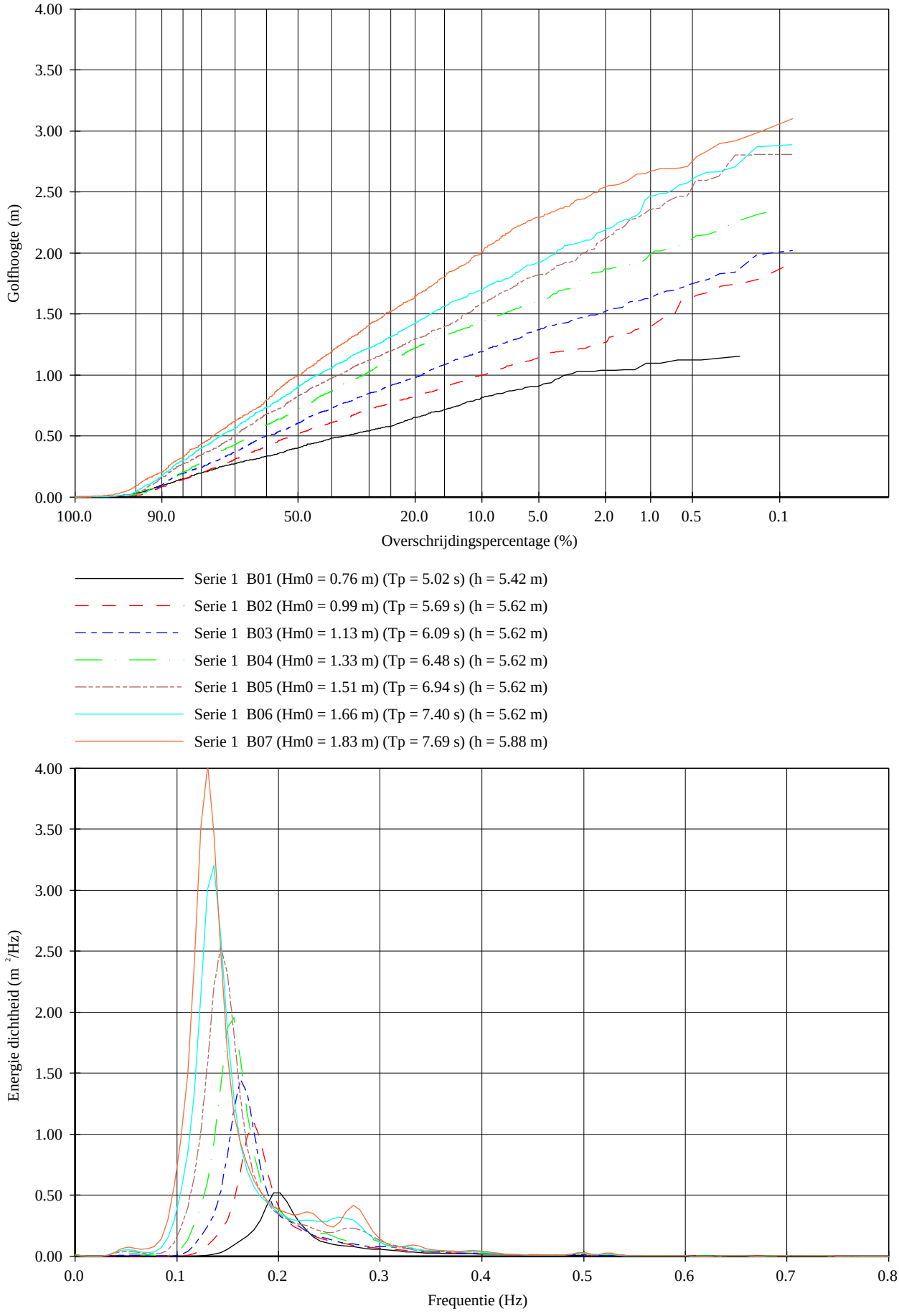
Deltares	1208618.008	Fig. B.2



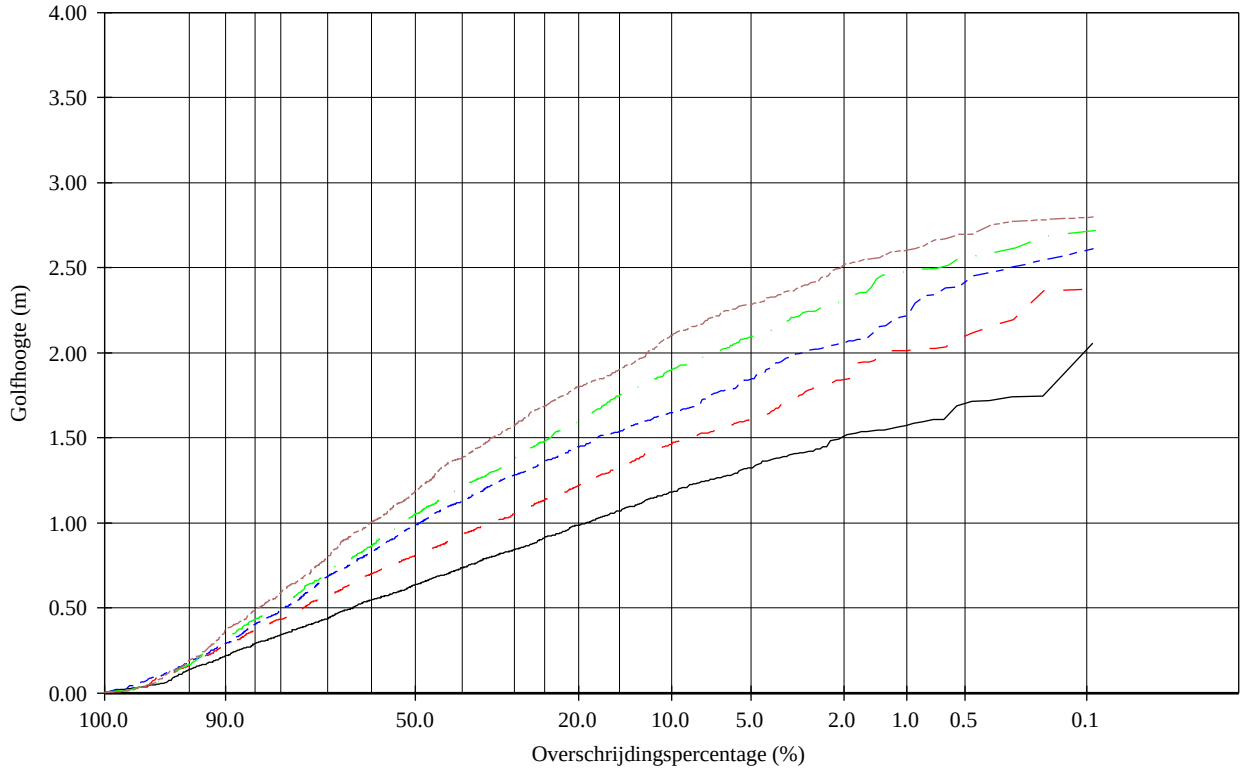
Zeefkrommes van het filtermateriaal		
Deltares	1208618.008	Fig. B.3



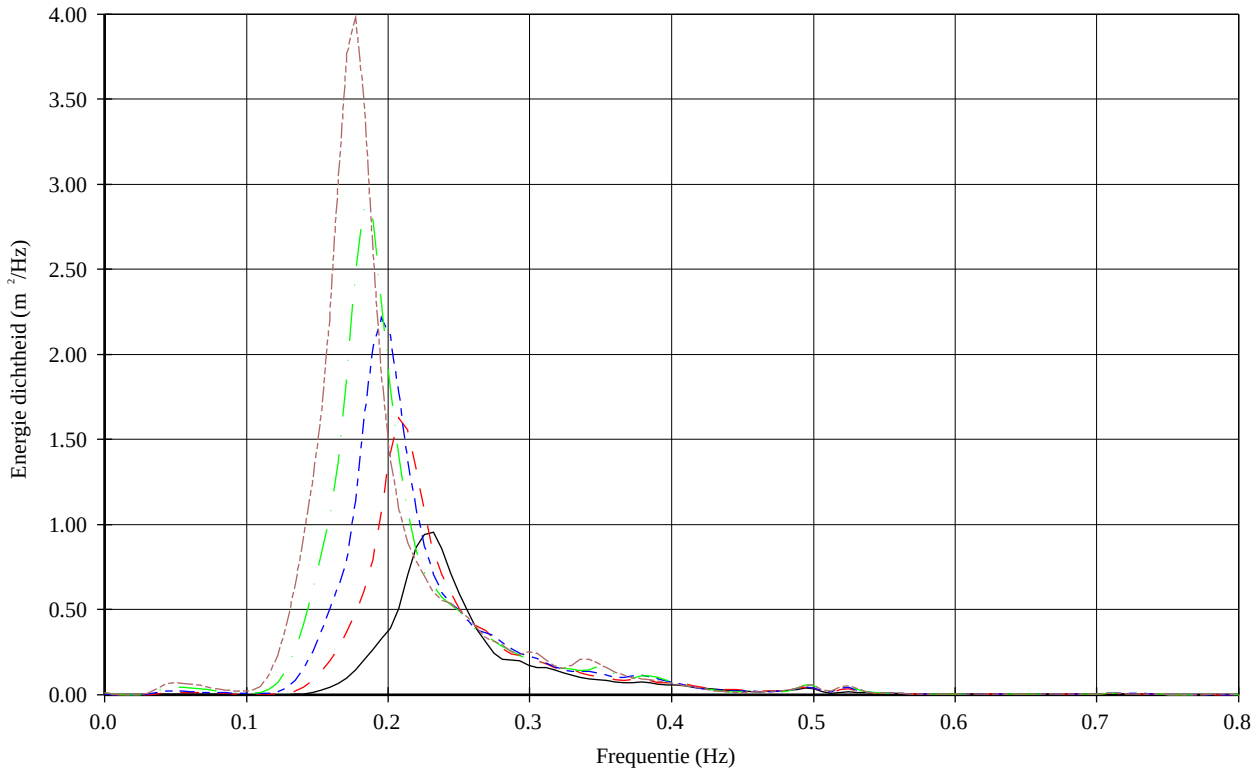
Zeefkromme van het inwasmateriaal		
Deltares	1208618.008	Fig. B.4



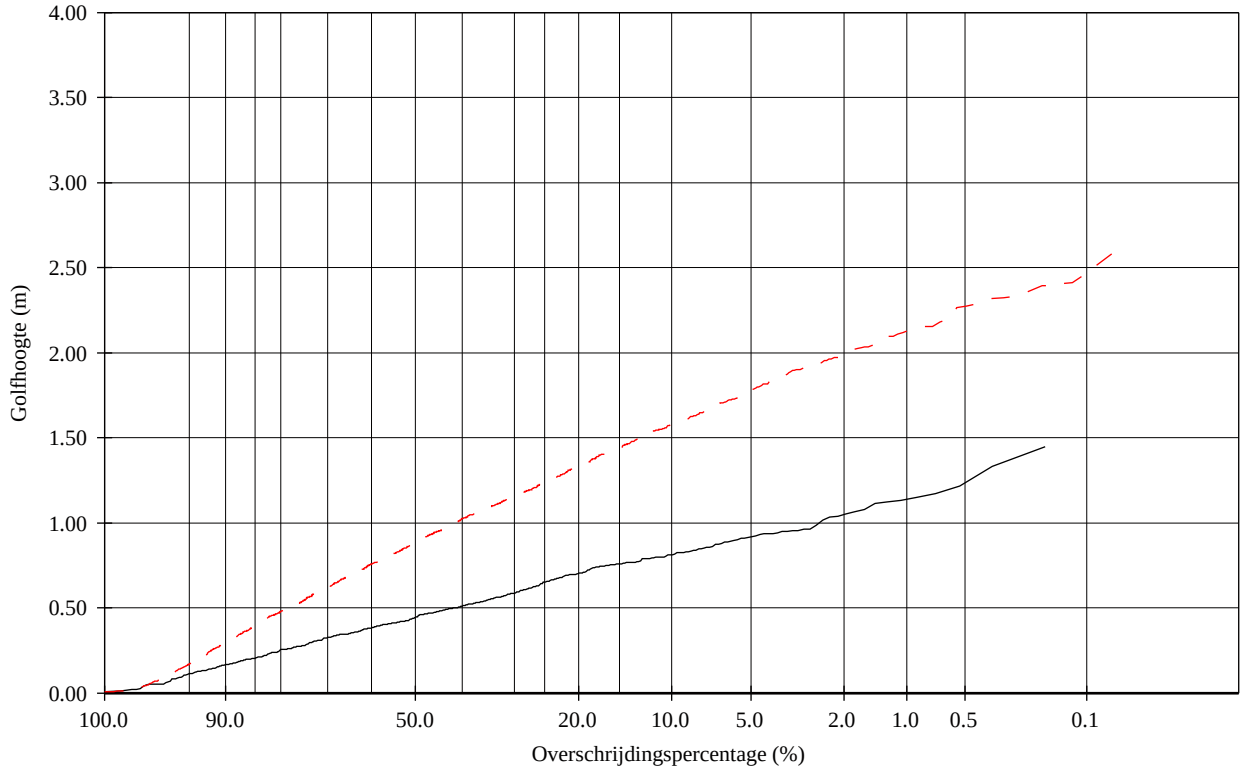
Golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra Serie 1 (proeven B01, B02, B03, B04, B05, B06, B07)		
	Inkomende golven	
Deltares	1208618.008	FIG. B.5



Serie 2 B08 (Hm0 = 1.09 m) (Tp = 4.37 s) (h = 5.62 m)
Serie 2 B09 (Hm0 = 1.36 m) (Tp = 4.77 s) (h = 5.62 m)
Serie 2 B10 (Hm0 = 1.56 m) (Tp = 5.09 s) (h = 5.82 m)
Serie 2 B11 (Hm0 = 1.74 m) (Tp = 5.40 s) (h = 5.93 m)
Serie 2 B12 (Hm0 = 1.96 m) (Tp = 5.69 s) (h = 6.01 m)

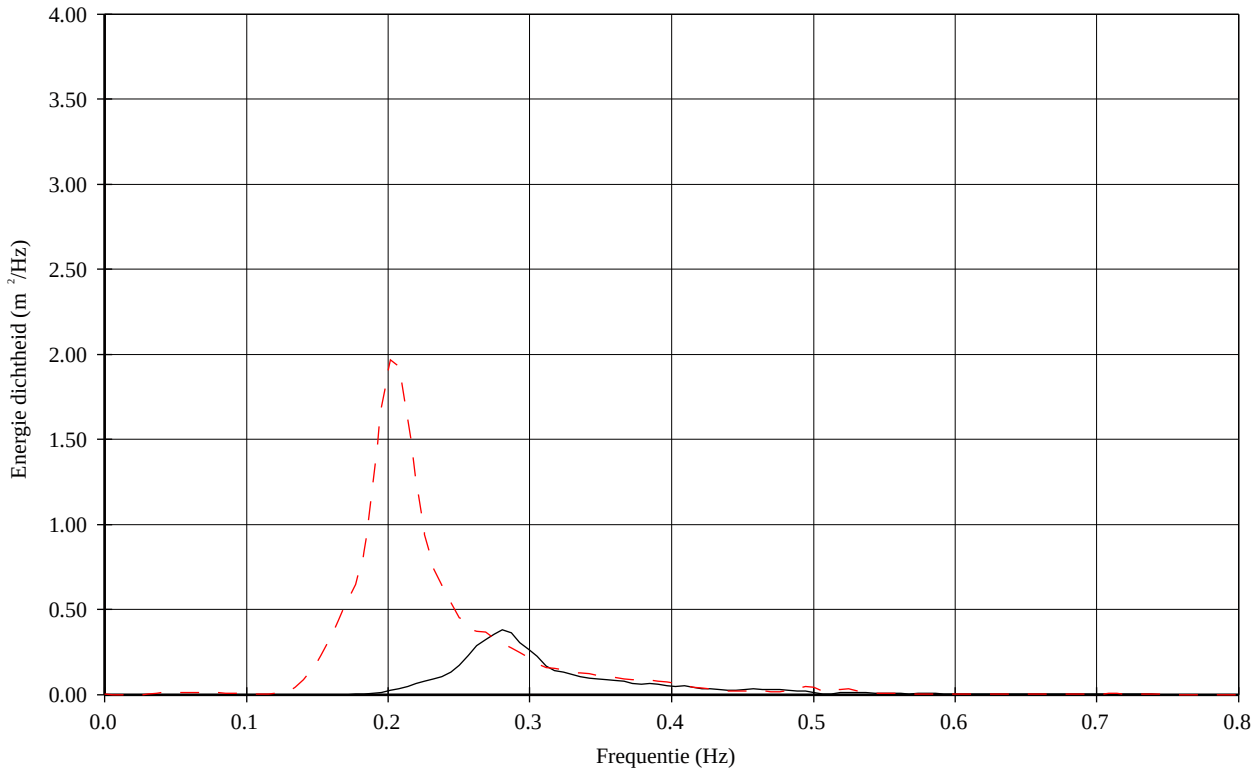


Golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra Serie 2 (proeven B08, B09, B10, B11, B12)		
	Inkomende golven	
Deltares	1208618.008	FIG. B.6



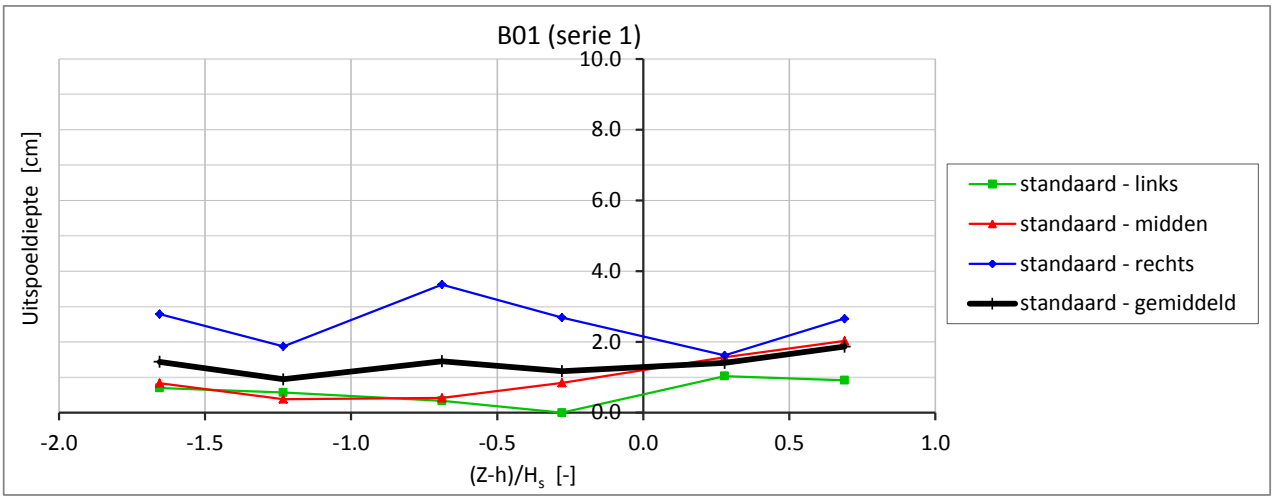
Serie 3 B13 (Hm0 = 0.75 m) (Tp = 3.58 s) (h = 5.42 m)

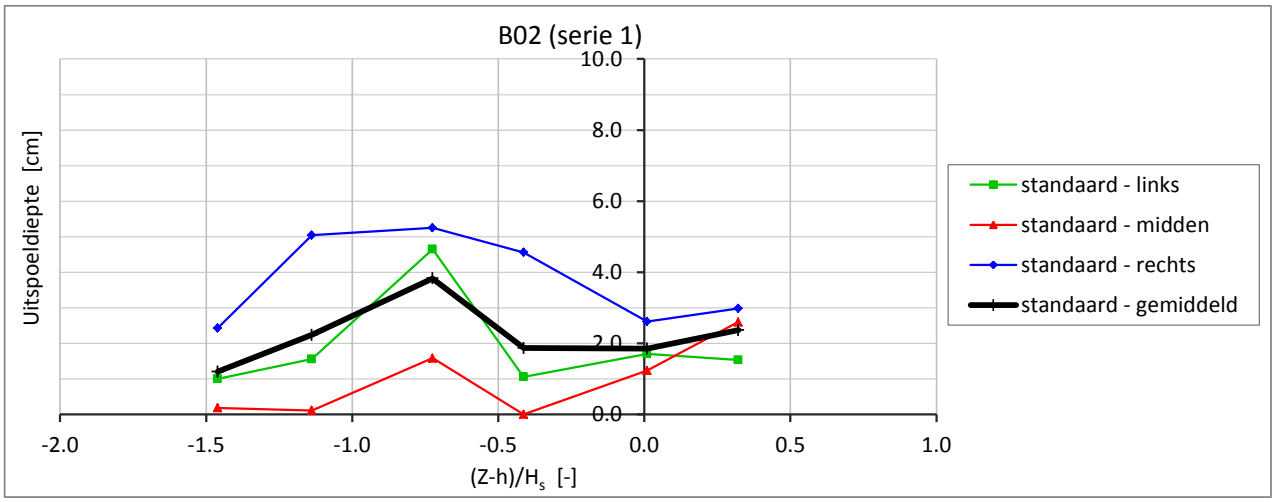
Serie 3 B14 (Hm0 = 1.45 m) (Tp = 4.90 s) (h = 5.62 m)

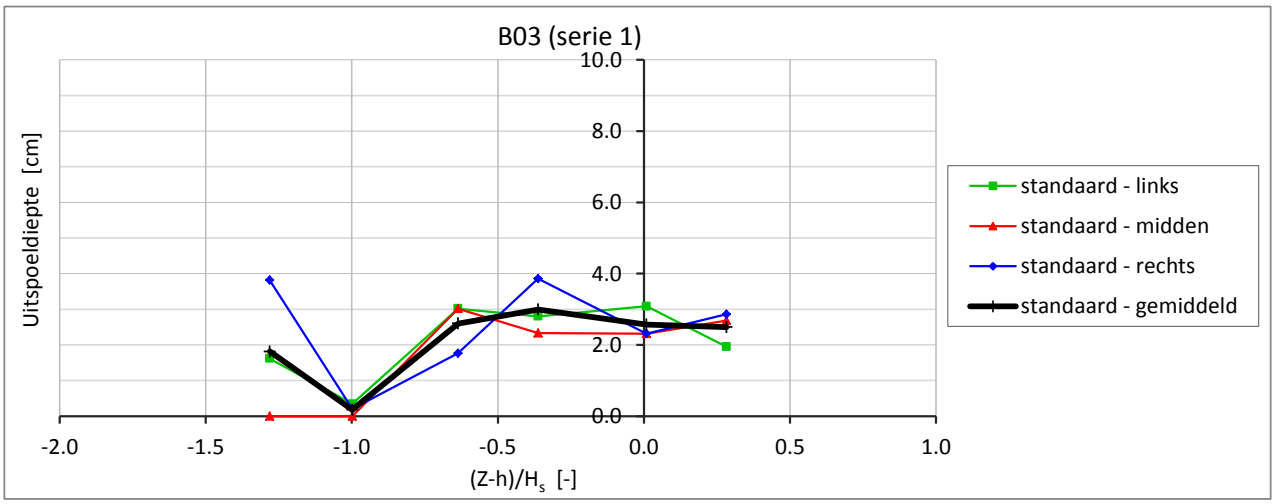


Golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra Serie 3 (proeven B13, B14)		
	Inkomende golven	
Deltares	1208618.008	FIG. B.7

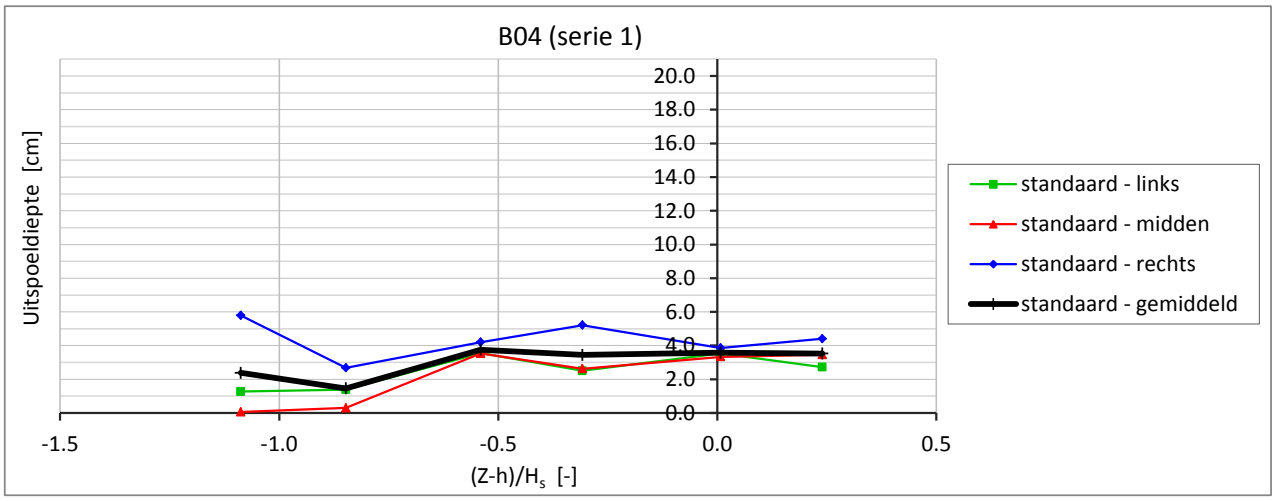
Serie 1

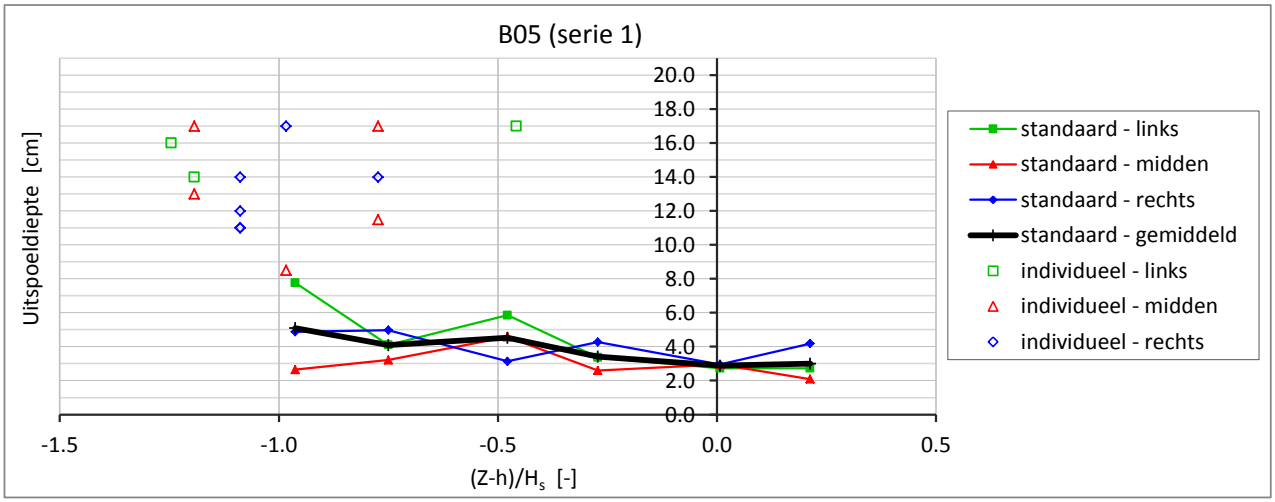


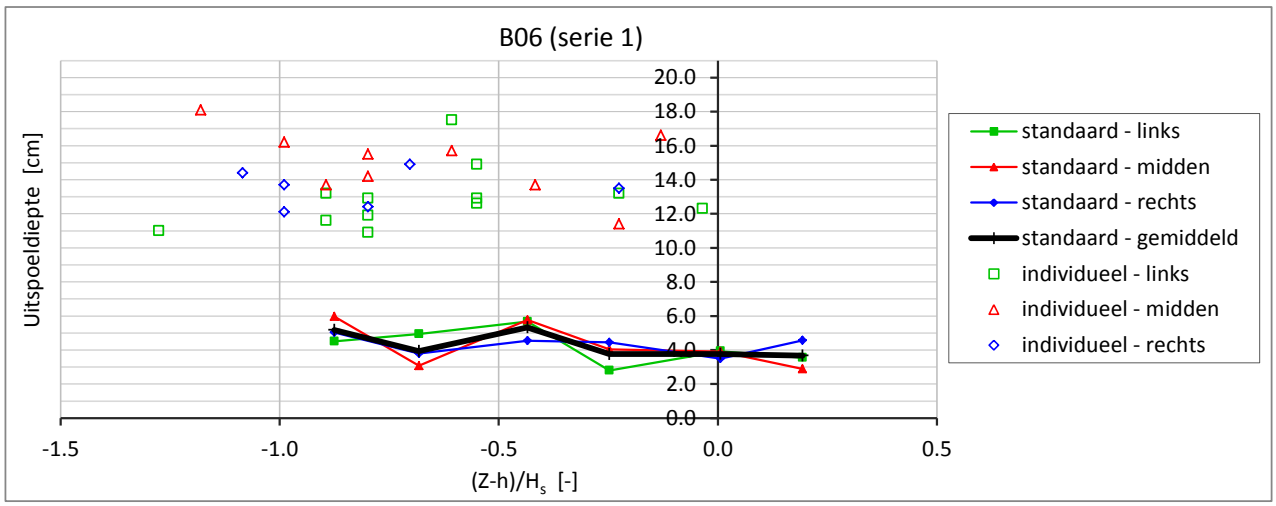




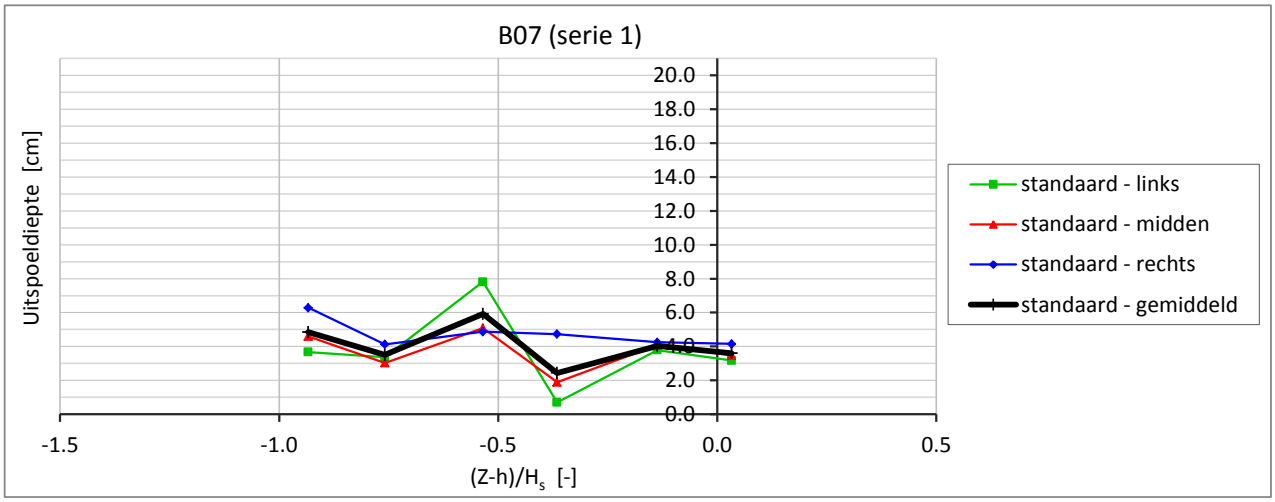
Uitspoeldiepte van het inwasmateriaal		Serie 1
	Proeven B01, B02, B03	
Deltares	1208618.008	Fig. B.8



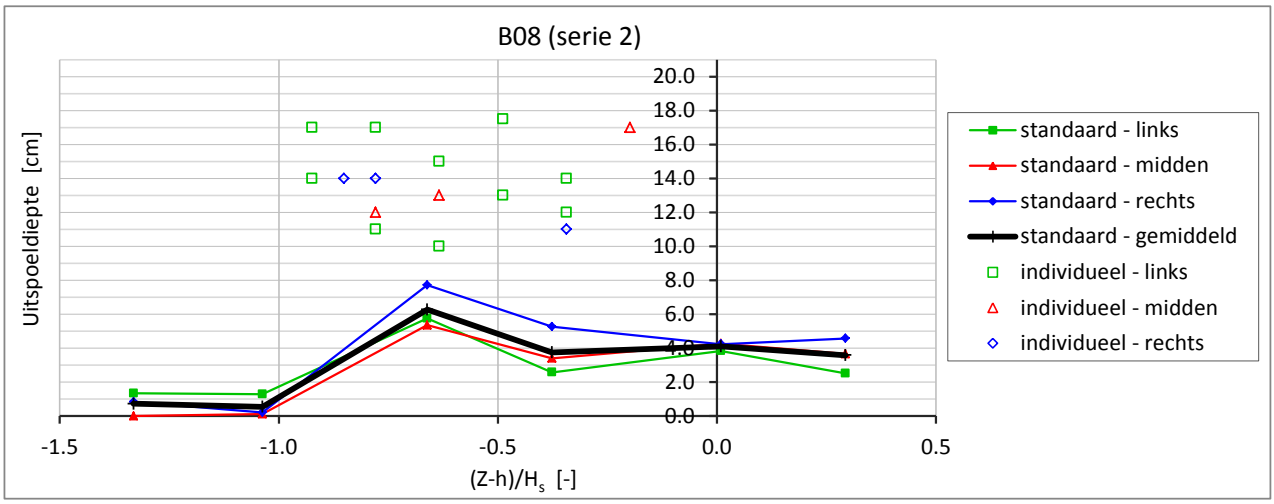


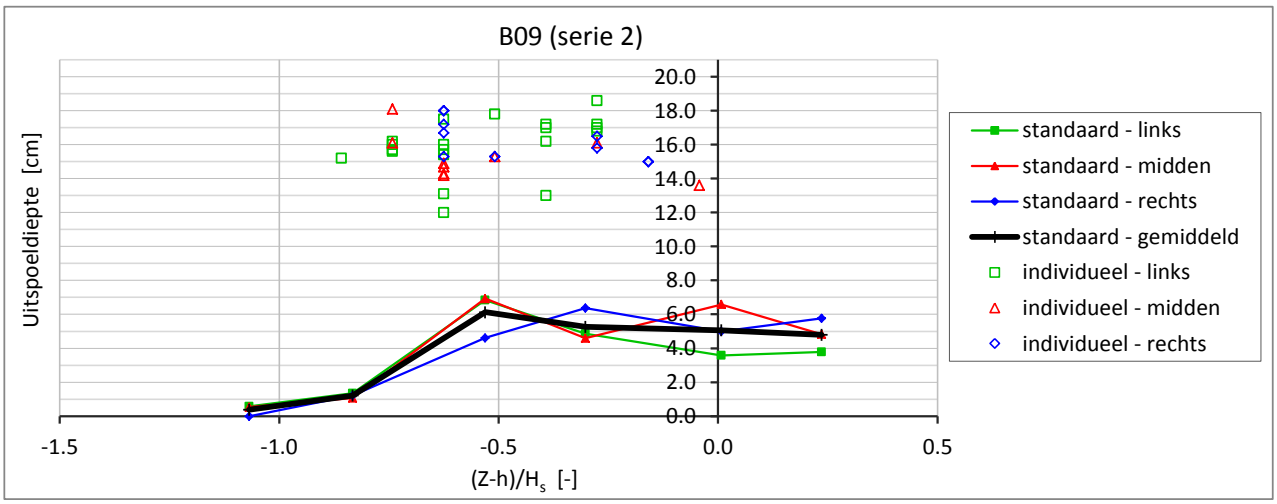


Uitspoeldiepte van het inwasmateriaal		Serie 1
	Proeven B04, B05, B06	
Deltares	1208618.008	Fig. B.9

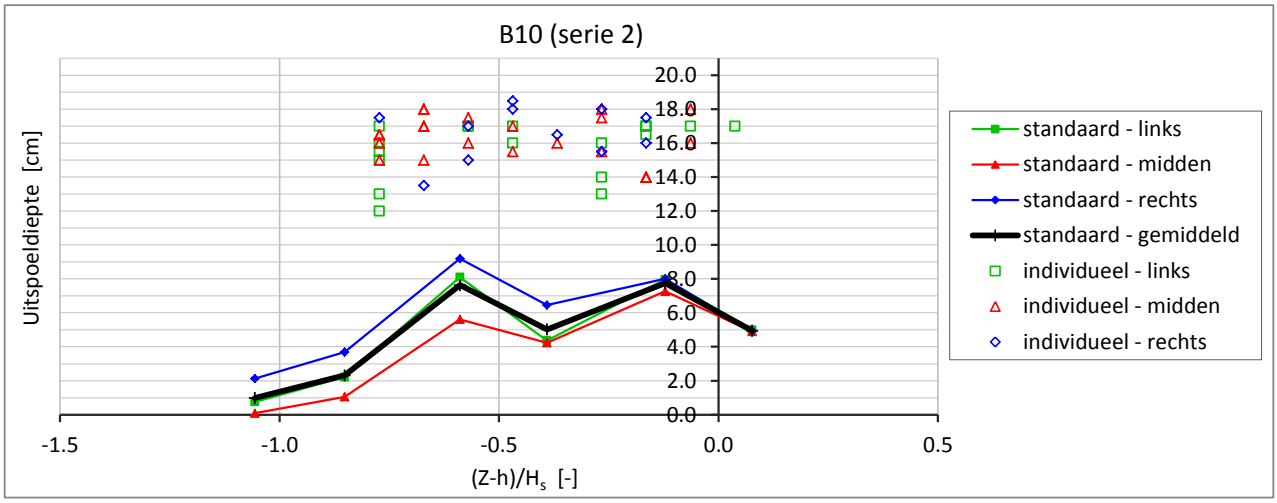


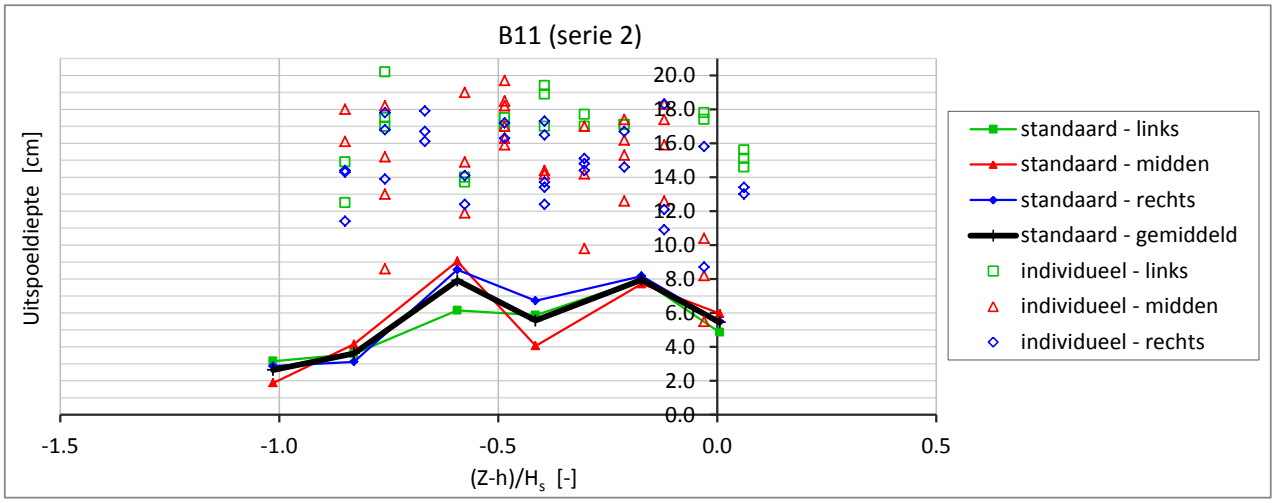
Serie 2

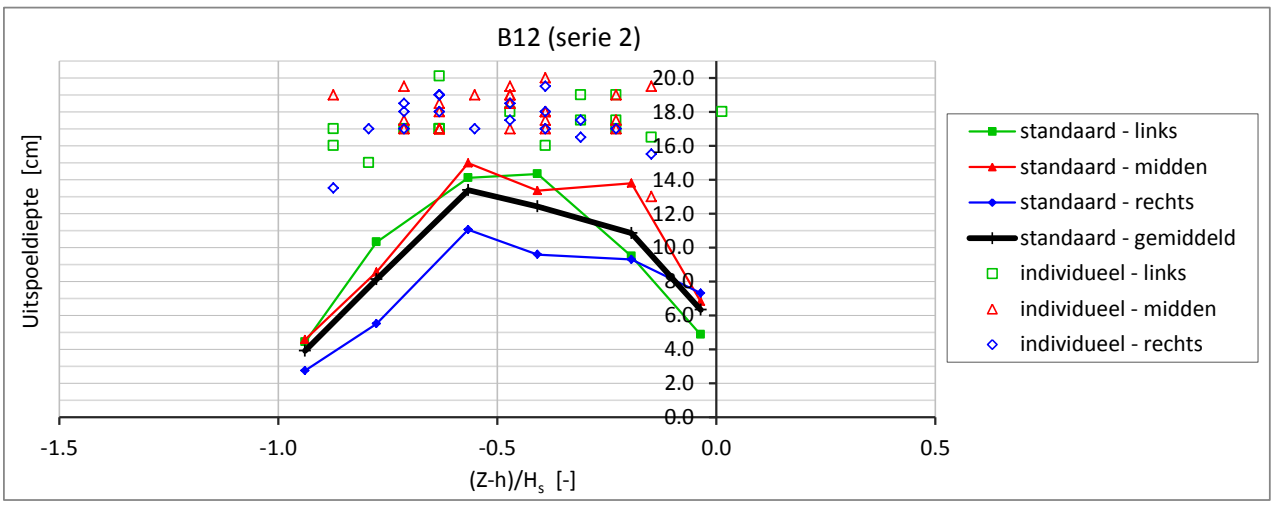




Uitspoeldiepte van het inwasmateriaal		Serie 1 en 2
	Proeven B07, B08, B09	
Deltares	1208618.008	Fig. B.10

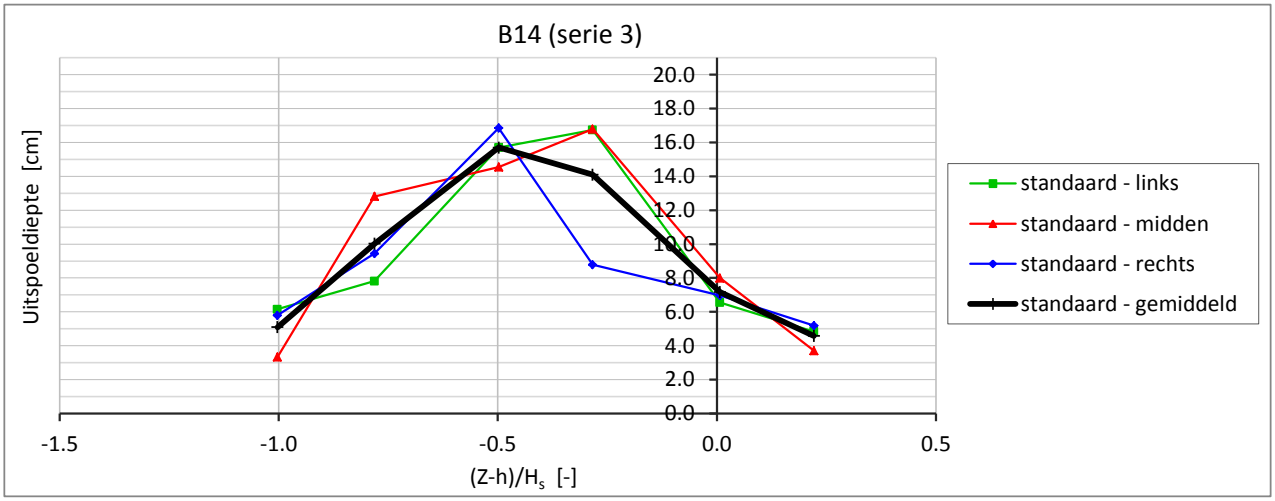




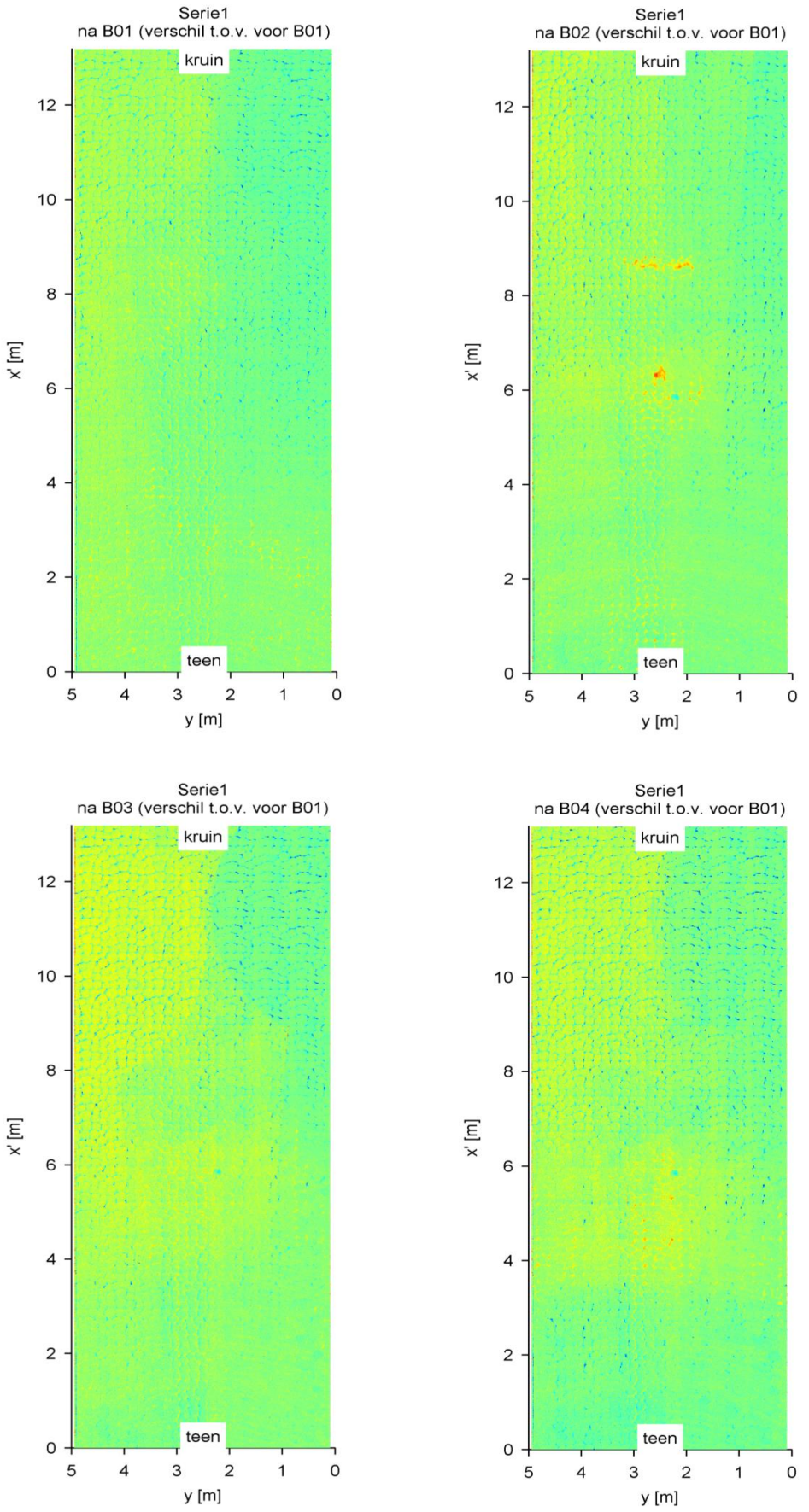


Uitspoeldiepte van het inwasmateriaal		Serie 2
	Proeven B10, B11, B12	
Deltares	1208618.008	Fig. B.11

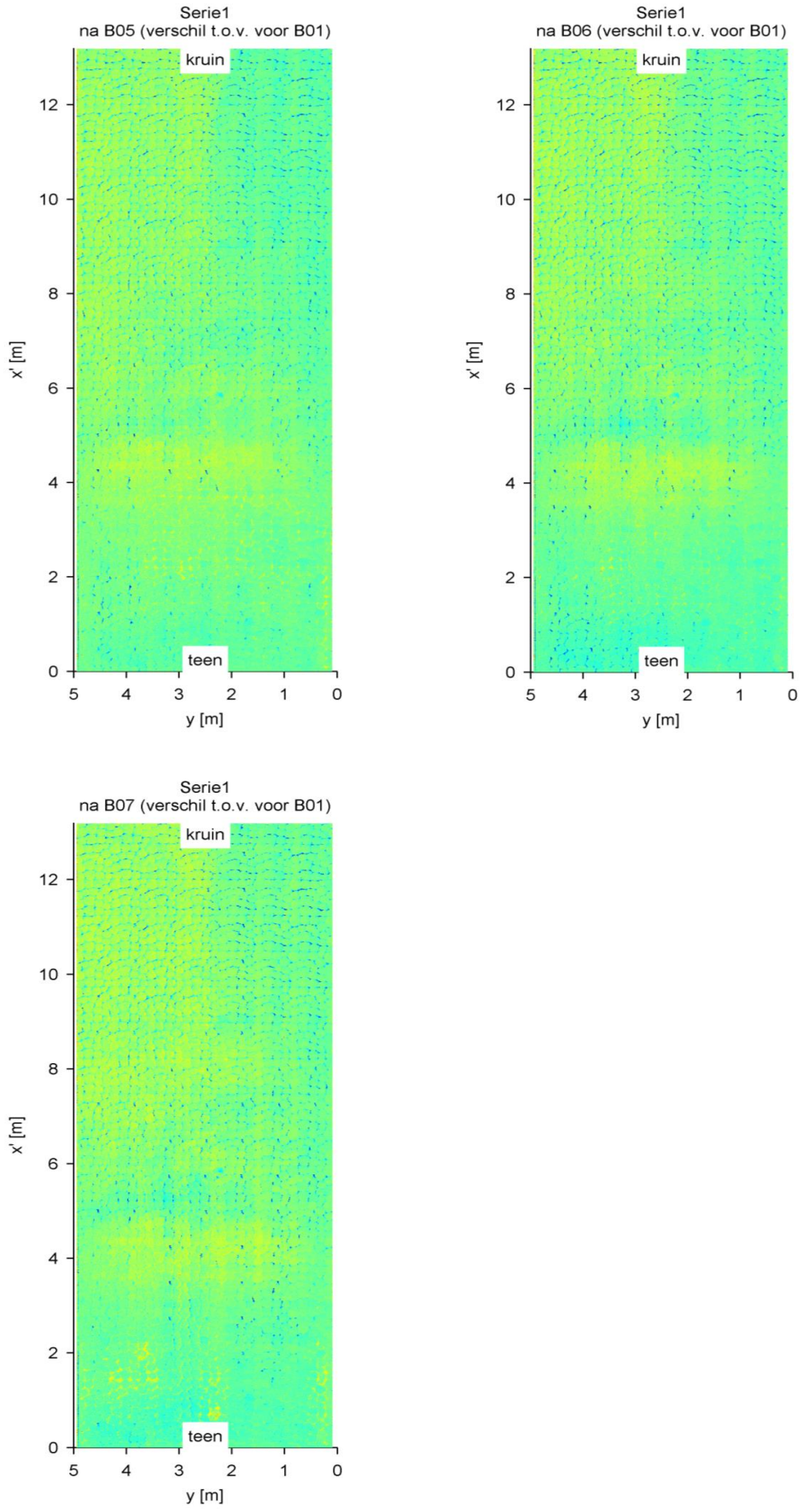
Serie 3



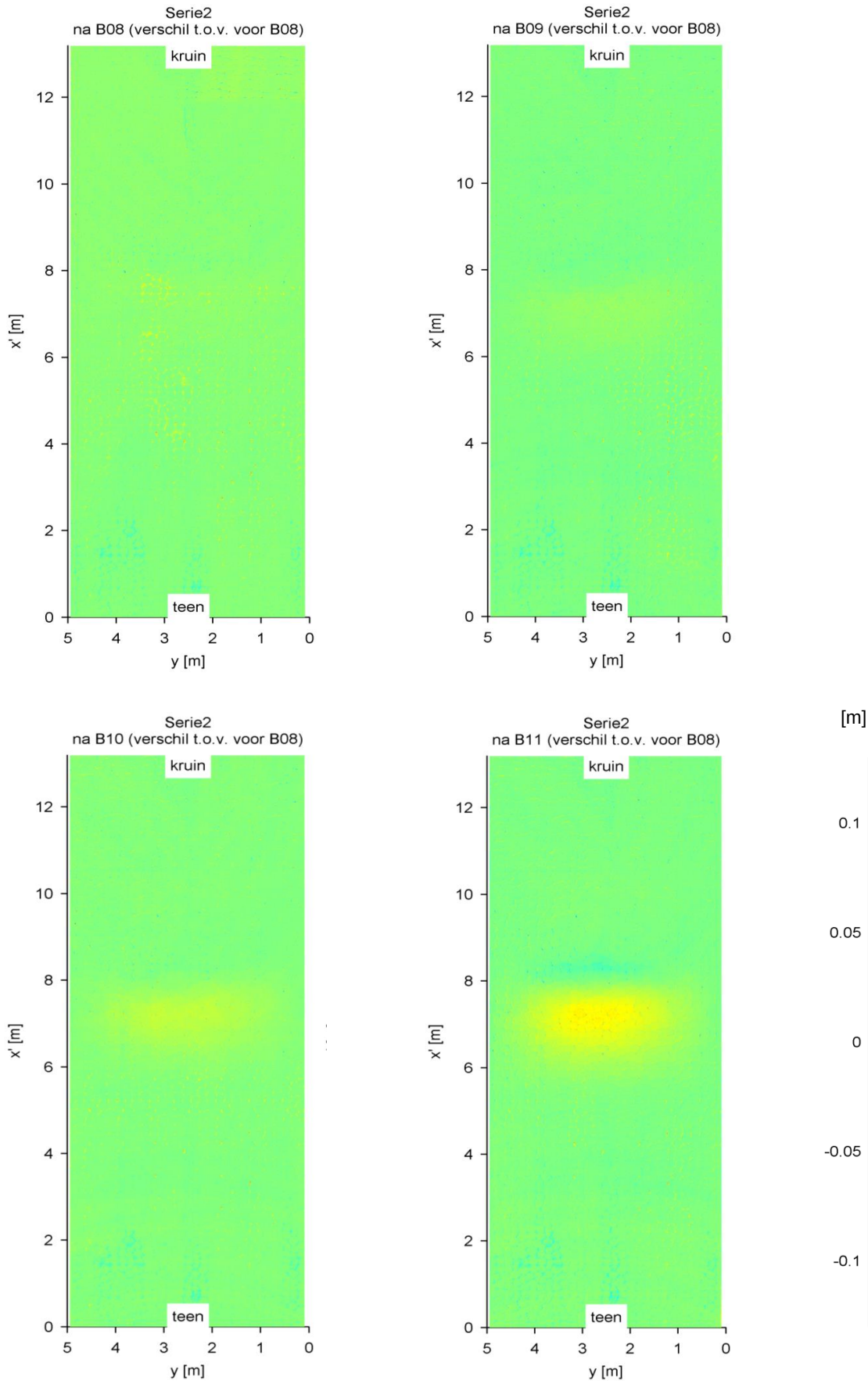
Uitspoeldiepte van het inwasmateriaal		Serie 3
	Proef B14	
Deltares	1208618.008	Fig. B.12



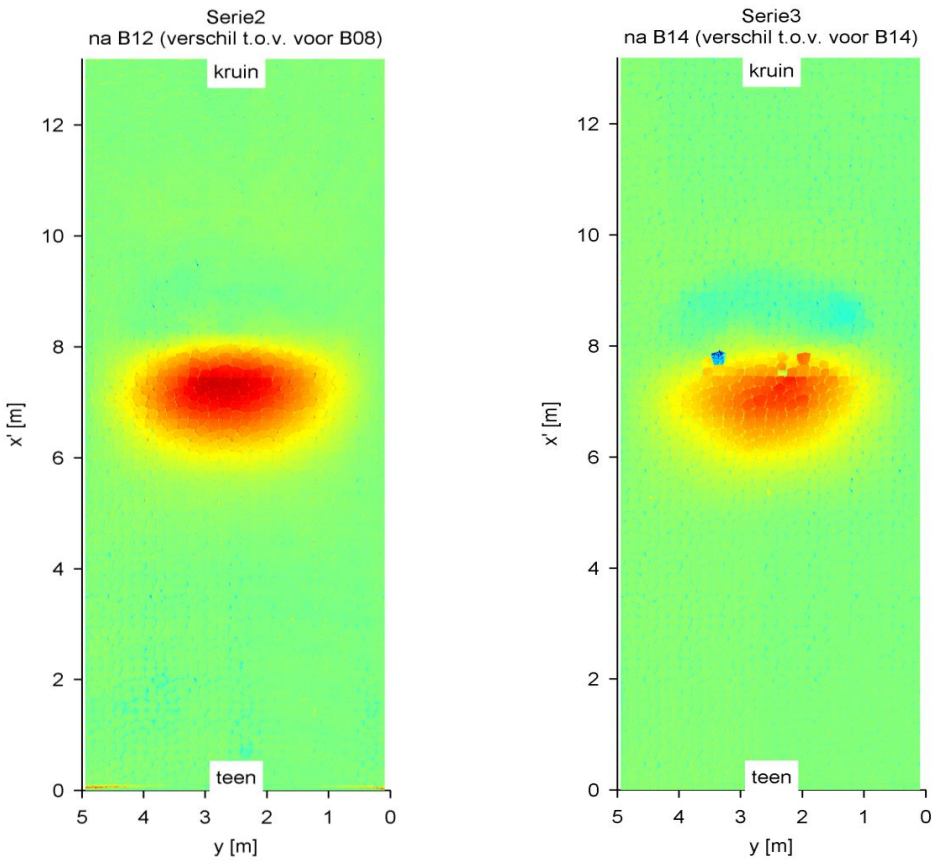
3D laserscans van taludoppervlak testsectie		Serie 1
	Proeven B01, B02, B03 en B04	
Deltares	1208618.008	Fig. B.13



3D laserscans van taludoppervlak testsectie		Serie 1
	Proeven B05, B06 en B07	
Deltares	1208618.008	Fig. B.14



3D laserscans van taludoppervlak testsectie		Serie 2
	Proeven B08, B09, B10 en B11	
Deltares	1208618.008	Fig. B.15



3D laserscans van taludoppervlak testsectie		Serie 2 en 3
	Proef B12 (serie 2) en proef B14 (serie 3)	
Deltares	1208618.008	Fig. B.16

C Procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor

C.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 C.1 Golfaanval op testsectie van Basalton 30 STS+.

C.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 die nog net geen bezwijken gaf en de H_s die net wel in bezwijken resulteerde. Bij de derde serie is de totale proefduur tot het bezwijken van de steenzetting, 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 de steenzetting te laten bezwijken, 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 bezwijken 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 bezwijken 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 bezwijken 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 bezwijken 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 de steenzetting tijdens de langeduurproef niet bezwijkt, wordt aangenomen dat er wel bezwijken zou zijn ontstaan als de proef 20% langer had geduurd.
5 Als tijdens geen enkele proevenserie bezwijken is opgetreden, wordt aangenomen dat er wel bezwijken 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 bezwijken bij een veel hogere golfhoogte optreedt dan 15% boven de maximale golfcondities.

C.3 Bepaling stabiliteitsfactor

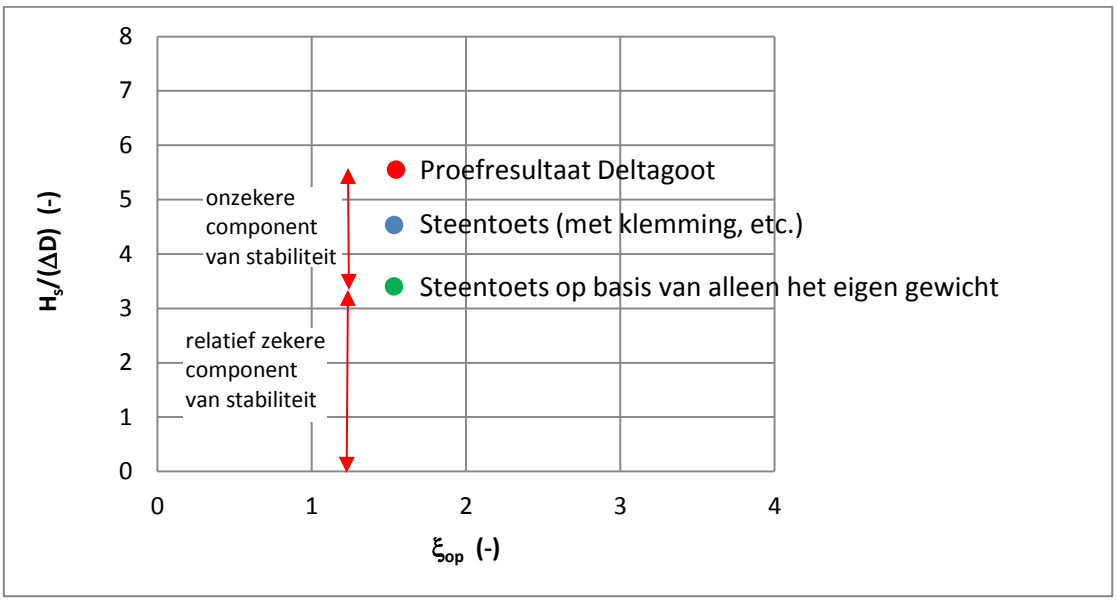
Voor het bepalen van de stabiliteitsfactor wordt zoveel mogelijk kennis en ervaring van steenzettingen benut, om een zo goed mogelijke factor te verkrijgen met de juiste veiligheids-marge. Dit wordt enerzijds gerealiseerd door gebruik te maken van het rekenmodel Steentoets en anderzijds door te bedenken 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 bezwijken gaan optreden. Aangenomen kan worden dat er bezwijken 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 C.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 bezwijken en niet bezwijken)
- $D_{Steentoets}$ = 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 C.2) en het zekere deel van de stabiliteit (groene stip in Figuur C.2). Dit kan op de volgende wijze worden bereikt:

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

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:

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

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

Met:

σ = standaardafwijking in de proefresultaten

Er is hier gekozen voor een minimumwaarde van 1,1 bij $\sigma = 0$, 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.