Deltares

Enabling Delta Life

Stabiliteit van RONA®Taille steenzetting bij golfaanval

Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken



Deltares

Stabiliteit van RONA®Taille steenzetting bij golfaanval

Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken

G.C. Mourik

1208618-017

© Deltares, 2016, B

Deltares

Titel
Stabiliteit van RONA®Taille steenzetting bij golfaanval

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat WVL Altena Infra-materialen	1208618-017	1208618-017-HYE-0005	50

Trefwoorden
Steenzetting, RONA®Taille, 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 RONA®Taille. De daartoe uitgevoerde proeven zijn in dit rapport beschreven en geanalyseerd. Tevens zijn enkele proeven uitgevoerd voor het bepalen van de golfoploop-reducerende werking van deze steenzetting. Deze golfoploopproeven zijn niet in het onderhavige rapport beschreven en geanalyseerd, maar in Van Steeg (2015). Altena Infra-materialen participeert als marktpartij in het onderzoek naar de stabiliteit van RONA®Taille.

Om de stabiliteit van RONA®Taille bij golfaanval te bepalen, is grootschalig modelonderzoek uitgevoerd in de Deltagoot van Deltares. De schaal van dit onderzoek was 1:2. 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 15 cm. Onder de RONA®Taille was een filterlaag aangebracht van steenslag met daaronder geotextiel.

De steenzetting is achtereenvolgens beproefd met de volgende proevenseries:
- *Series 1 en 2*: de eerste twee series (series 1 en 2) bestonden uit korteduurproeven. Per serie met korteduurproeven is de brekerparameter gelijk gehouden. 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 (circa 1000 golven) verhoogd totdat schade optrad.
- *Serie 1-gedraaid*: omdat tijdens serie 1 en 2 relatief snel schade ontstond, is besloten serie 1 te herhalen, maar nu met 180 graden gedraaide zuiltjes (om de denkbeeldige as loodrecht op het talud) in de testsectie. Deze serie is in dit rapport aangeduid als “serie 1-gedraaid”. Omdat opnieuw relatief snel schade ontstond, en omdat gedraaide zuiltjes de golfoploop naar verwachting minder goed reduceren dan niet-gedraaide zuiltjes, zijn de zuiltjes na deze serie weer teruggedraaid in hun oude positie. De resultaten van deze proevenserie zijn uiteindelijk niet gebruikt voor het bepalen van de stabiliteitsfactor.
- *Golfoploopproeven*: vervolgens is een serie golfoploopproeven uitgevoerd. Het doel van deze proeven is het bepalen van de golfoploopreductiecoëfficiënt.
- *Serie 3*: de laatste serie (serie 3) bestond uit een langeduurproef, met gelijkblijvende golfcondities. Deze serie is voortgezet totdat schade ontstond.

Deltares

Titel
Stabiliteit van RONA®Taille steenzetting bij golfaanval

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat WVL Altena Infra-materialen	1208618-017	1208618-017-HYE-0005	50

De stabiliteitsfactor is bepaald op basis van de proevenseries 1, 2 en 3. De stabiliteitsfactor voor RONA®Taille is: f_{stab} = 0,89. Deze factor is opgenomen in Steentoets2015.

Referenties

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

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

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	juli 2015	G.C. Mourik		M. Klein Breteler		M.R.A. van Gent	
2.0	nov. 2015	G.C. Mourik		M. Klein Breteler		M.R.A. van Gent	
3.0	mrt. 2016	G.C. Mourik		M. Klein Breteler		M.R.A. van Gent	

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding **1**
1.1 Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken 1
1.2 RONA®Taille steenzetting van Altena Infra-materialen 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 13
3.2.3 RONA®Taille 14
3.2.4 Inwasmateriaal 16
3.2.5 Afwerking van de modelranden en aanbrengen markering 17
3.3 Metingen 18
3.3.1 Golfcondities 18
3.3.2 Profielmetingen 19
3.3.3 Uitspoeling inwasmateriaal 20
3.3.4 Golfoploopmetingen 20
3.4 Proevenprogramma 20

4 Proefresultaten en observaties **25**
4.1 Indeling in schadecategorieën 25
4.2 Serie 1: korteduurproeven (proeven R01 – R02) 26
4.3 Serie 2: korteduurproeven (proeven R03 – R05) 28
4.4 Serie 3: langeduurproef (proeven R12 – R14) 30
4.5 Serie 1-gedraaid: korteduurproeven (proeven P01 – P02) 32

5 Analyse van de proefresultaten **37**
5.1 Uitspoeling van het inwasmateriaal 37
5.2 Stabiliteit van de steenzetting 40
5.3 Stabiliteitsfactor 42

6 Conclusies **47**

7 Referenties **49**

Bijlage(n)

A Tabellen **A-1**

B Figuren **B-1**

C Foto's **C-1**

D Technische tekeningen van RONA®Taille steenzetting (ware grootte) **D-1**

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

1 Inleiding

1.1 Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken

Dit rapport beschrijft de proeven met RONA®Taille, die zijn gericht op het bepalen van de stabiliteit in golfaanval. Tevens zijn enkele proeven uitgevoerd voor het bepalen van de golfoploopreducerende werking van deze steenzetting. Deze golfoploopproeven zijn niet in het onderhavige rapport beschreven en geanalyseerd, maar in Van Steeg (2015).

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



Figuur 1.1 Links: naderende golven in de Deltagoot. Rechts: golfaanval op de RONA®Taille steenzetting in de Deltagoot tijdens proef R05.

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.

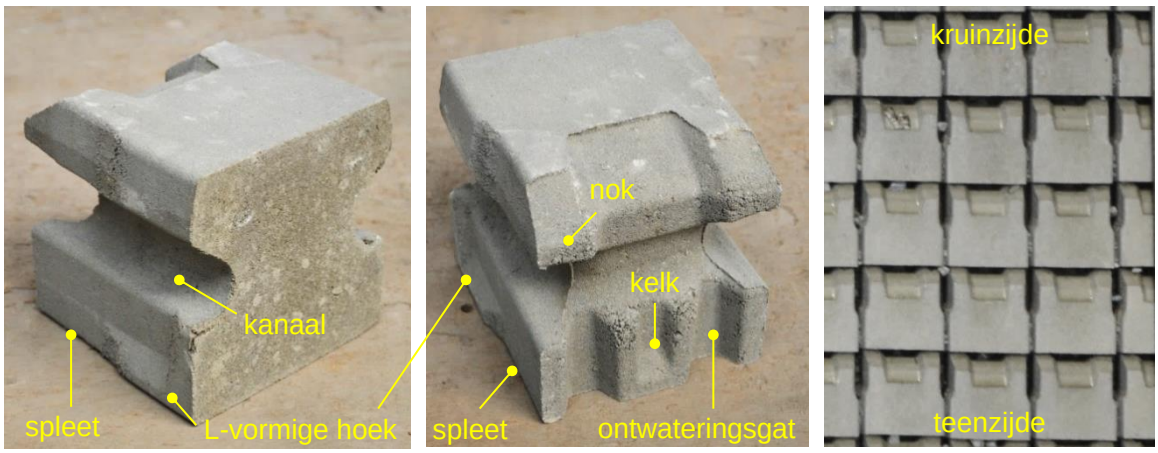
De stabiliteitsfactor is de verhouding tussen de benodigde toplaagdikte die volgt uit de resultaten van het experimentele modelonderzoek in de Deltagoot en de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets (met stabiliteitsfactor = 1), rekening houdend met een veiligheidsmarge.

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 1:2 ten opzichte van de werkelijkheid). 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 februari - mei 2015 uitgevoerd onder leiding van M. Klein Breteler en G.C. Mourik.

1.2 RONA®Taille steenzetting van Altena Infra-materialen

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



Figuur 1.2 Links en midden: een RONA®Taille zuil met de aanduiding van de kanalen, nokken, kelk, ontwateringgaten en spleten. Rechts: bovenaanzicht van een RONA®Taille steenzetting.

Een RONA®Taille steenzetting is opgebouwd uit zuilen met dezelfde vorm, die tegen elkaar geplaatst worden. Zie bijlage D voor technische tekeningen van dit type steenzetting, met afmetingen van zuilen op ware grootte. Langs de zijkanten en de voorkant van de zuilen is evenwijdig aan het grondvlak, halverwege de zuilhoogte, een uitsparing aangebracht (de kanalen, zie Figuur 1.2, links en midden). Wanneer de zuilen tegen elkaar geplaatst worden, ontstaat binnenin de steenzetting een raster van holle kanalen, die ervoor moeten zorgen dat de golfoploop op het talud wordt gereduceerd. Doordat water in de kanalen kan stromen,

neemt de waterlaagdikte op het talud af en als gevolg van de stroming door de kanalen verliest het water in de golfoplooptong energie.
Om het water extra goed de kanalen te laten instromen, bevatten de zuilen een vlakke zijde. Het water botst daar tegenaan en wordt de kanalen in gestuwd. Voor een optimale golfoploopreducerende werking dienen de zuilen dus geplaatst te worden met de vlakke zijde richting de teen van de dijk (zie Figuur 1.2, rechts). In het onderhavige rapport wordt de vlakke zijde aangeduid als de achterzijde en de zijde met de nokjes als de voorzijde van de zuilen.

Voor het genereren van extra klemming tussen de zuilen wordt de steenzetting ingewassen met gebroken steenslag. Omdat de kanalen leeg moeten blijven voor optimale doorstroming van het water wordt uitsluitend de zogenaamde ‘voet’ van de zuil ingewassen (het gedeelte van de zuil onder de kanalen).
Ten aanzien van de openingen tussen de zuilen wordt onderscheid gemaakt tussen ‘kelken’ (in het midden van de voorzijde), ‘ontwateringsgaten’ (aan beide zijden van de kelken), ‘spleten’ (voorste helft van de zijkant) en de ruimte boven de ‘L-vormige hoek’ (achterste helft van de zijkant), zie Figuur 1.2.
De ontwateringsgaten en spleten zijn vooral bedoeld voor het doorlaten van water door de toplaag, in de richting loodrecht op het talud. De ontwateringsgaten en spleten zijn bij het inbouwen van de steenzetting wel ingewassen met steenslag, maar zijn dus niet zozeer bedoeld voor het vasthouden van het inwasmateriaal. De kelken en L-vormige hoeken zijn daarentegen wel bedoeld voor het vasthouden van inwasmateriaal en het genereren van klemming tussen de zuilen. Of het inwasmateriaal inderdaad minder makkelijk uitspoelt uit de kelken is tijdens de proeven onderzocht (zie paragraaf 5.1).

Hoewel de zuilen in de Deltagoot handmatig en stuk voor stuk zijn geplaatst, kunnen de zuilen in werkelijkheid machinaal als pakketten geplaatst worden.

1.3 Opzet van het rapport

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

2 Schaling

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

2.1 Faciliteit

De proeven zijn uitgevoerd in de Deltagoot (in de Noordoostpolder) van Deltares. De Deltagoot heeft een lengte van 240 m, een breedte van 5 m en een diepte van 7 m. De gootwanden zijn lokaal nog verhoogd met 2,5 m hoge opzetstukken. De goot is voorzien van een golfschot waarmee zowel regelmatige als onregelmatige golven kunnen worden opgewekt. Tevens is het golfschot voorzien van een systeem dat 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 = 1,6 m. Met deze golfhoogte is het mogelijk de maximale golfcondities op beschutte locaties in estuaria en binnenwateren op volle schaal te reproduceren. Op veel plaatsen langs de Nederlandse kust zijn de maatgevende golven echter tot wel tweemaal zo hoog. Daarom is het onderhavige onderzoek uitgevoerd op schaal. Gekozen is voor een geometrische schaal van 1:2. Bij deze schaling komt de maximale significante golfhoogte die in de Deltagoot kan worden geproduceerd (H_s = 1,6 m) overeen met een significante golfhoogte in werkelijkheid van circa H_s = 3,2 m.

2.2 Schaling

2.2.1 Algemeen

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

Een geometrische schaal van 1:2 houdt in dat de afmetingen van de zetstenen in de modelopstelling twee maal zo klein moeten zijn als in werkelijkheid. Dit geldt voor zowel 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 RONA®Taille zuilen als uitgangspunt genomen, die in werkelijkheid 30 cm hoog zijn. De zuilen zijn speciaal voor het onderzoek op schaal gemaakt door Altena Infra-materialen. Daarvoor zijn speciale mallen gemaakt, waarbij alle maten een factor 2 kleiner zijn gekozen dan in werkelijkheid. Dit resulteerde in zuilen met een hoogte,

die ongeveer de helft is van de werkelijke hoogte: de gemiddelde hoogte van de verschaalde zuilen is ongeveer 15 cm. Ook de lengte (parallel aan de dijk-as) en breedte (loodrechts op de dijk-as) van de zuilen is circa 15 cm.

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

2.2.2 Schaling hydraulische randvoorwaarden

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

Over het algemeen wordt voor het verschalen van waterbouwkundige constructies de zogenaamde Froude schaling toegepast. Deze schaling geldt voor processen waarin traagheid en zwaartekracht een dominante rol spelen, wat het geval is in dit model. 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 $n_L = L_{prototype}/L_{model} = 2$. Uit de bovenstaande Froude schaalregel zijn dan de volgende verbanden af te leiden:

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

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

2.2.3 Schaling dimensieloze parameters

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 RONA®Taille toplaag, gedefinieerd als de afstand tussen de boven- en onderzijde van de zuilen, loodrecht op het talud gemeten (m)

In de belastingparameter is Δ dimensieloos en worden H_s en D uitgedrukt in lengte-eenheden. De belastingparameter is daardoor dimensieloos en is in het schaalmodel dus 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 = 2) voldoet hier dus ruimschoots aan.

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

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

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

De leklengte heeft de dimensie m en schaalt met de lengteschaal: $n_\Lambda = n_L = 2$. Met het rekenmodel Steentoets is de leklengte 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} = 8,6 mm in het schaalmodel en D_{f15} = 17 mm op ware grootte.
Uit de berekeningen is, uitgaand van de gehanteerde schaal van 1:2, gebleken dat in de modelopstelling een filterlaag met laagdikte van ongeveer b = 7 cm en korrelgrootte D_{f15} = 10 à 13 mm goed overeenkomt met onder andere de volgende filterlaagdiktes en korrelgroottes van steenzettingen in de werkelijkheid: b = 15 cm in combinatie met D_{f15} = 15 à 20 mm, of met D_{f15} = 17 mm in combinatie met b = 14 à 16 cm.

Ter illustratie is in Tabel 2.1 voor de situatie op ware grootte en in de Deltagoot weergegeven welke combinatie van parameters resulteren in een vergelijkbare leklengte, uitgaande van verschaling van de leklengte met de lengteschaal n_L = 2. Opgemerkt wordt dat een iets andere combinatie van parameters kan resulteren in dezelfde leklengte.

Parameter	Symbool	Eenheid	Waarde op ware grootte	Waarde op schaal (indicatief)
dikte van de toplaag	D	(m)	0,30	0,15
open oppervlak	Ω	(%)	7,9	7,9
filterlaagdikte	B	(m)	0,15	0,07
korrelgrootte filter	D_{f15}	(mm)	17	11
korrelgrootte inwasmateriaal	D_{i15}	(mm)	17	8,6
toplaagdoorlatendheid	k'	(mm/s)	55	40
leklengte	Λ	(m)	0,40	0,20

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

Omdat in de werkelijkheid 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 Deltagoot een dijk opgebouwd met een steenzetting van RONA®Taille. Zoals is beschreven in hoofdstuk 2 is de schaal van de modelopstelling 1:2. 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 en in Foto C.1.a in bijlage C.



Figuur 3.1 Overzicht van de modelopstelling met RONA®Taille zuilen (voor proef R01).

De steenzetting is achtereenvolgens beproefd met de volgende vijf proevenseries:

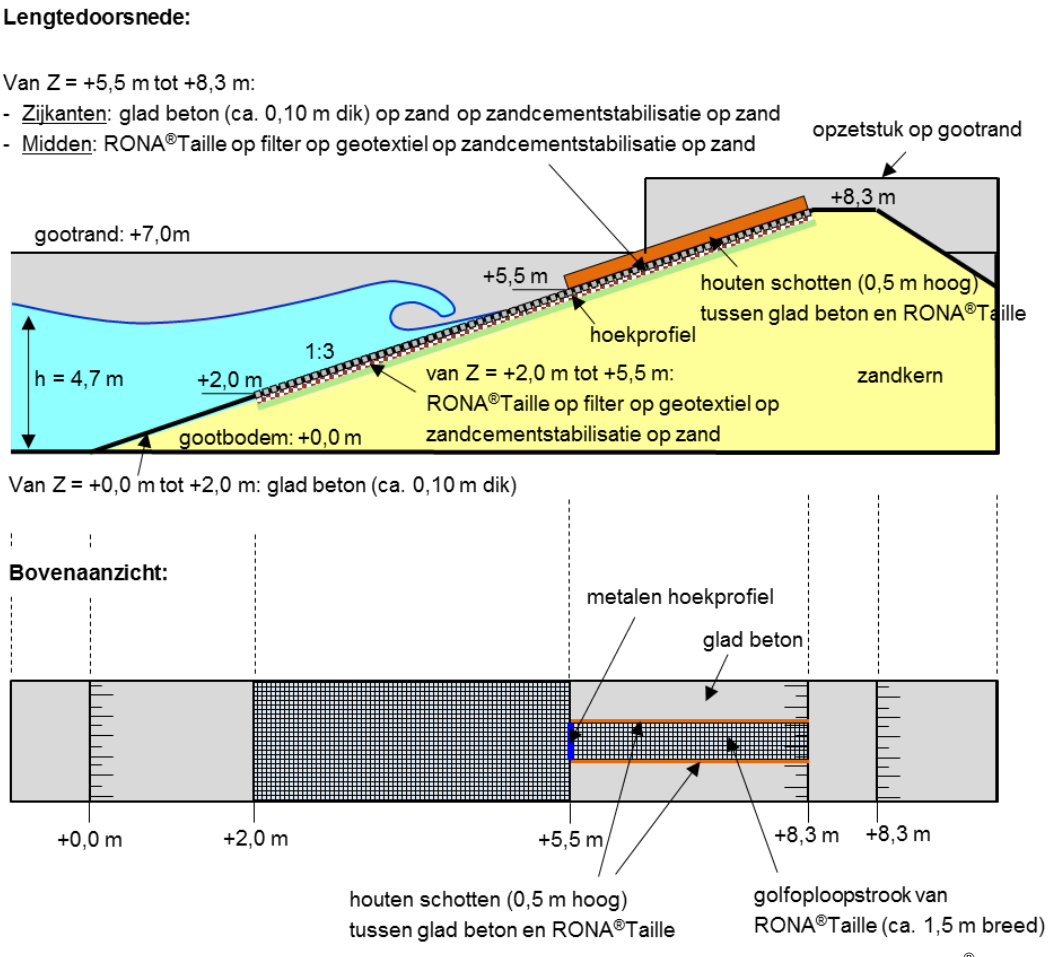
- *Series 1 en 2*: de eerste twee series (series 1 en 2) bestonden uit korteduurproeven. Per serie met korteduurproeven is de brekerparameter gelijk gehouden. De proeven van serie 1 zijn uitgevoerd met een kleine golfsteilheid (lange golven), de proeven van serie 2 met een grote golfsteilheid (korte golven). De golfhoogte is na elke proef (circa 1000 golven) verhoogd totdat schade optrad.

- *Serie 1-gedraaid*: omdat tijdens serie 1 en 2 relatief snel schade ontstond, is besloten serie 1 te herhalen, maar nu met 180 graden gedraaide zuiltjes (om de denkbeeldige as loodrecht op het talud) in de testsectie. Deze serie is in dit rapport aangeduid als “serie 1-gedraaid”. Omdat opnieuw relatief snel schade ontstond, en omdat gedraaide zuiltjes de golfoploop naar verwachting minder goed reduceren dan niet-gedraaide zuiltjes, zijn de zuiltjes na deze serie weer teruggedraaid in hun oude positie (met uitzondering van de zuiltjes in de onderste 4,5 m van de testsectie, waar geen schade en vervorming te verwachten was). De resultaten van deze proevenserie zijn uiteindelijk niet gebruikt voor het bepalen van de stabiliteitsfactor.
- *Golfoploopproeven*: vervolgens is een serie golfoploopproeven uitgevoerd. Het doel van deze proeven is het bepalen van de golfoploopreductiecoëfficiënt.
- *Serie 3*: de laatste serie (serie 3) bestond uit een langeduurproef, met gelijkblijvende golfcondities. Deze serie is voortgezet totdat schade ontstond.

3.2 Modelopstelling

3.2.1 Algemeen

De beproefde modelopstelling is schematisch weergegeven in Figuur 3.2. Het bovenste deel van de figuur geeft de lengtedoorsnede en het onderste deel van de figuur geeft het bovenaanzicht.



Figuur 3.2 Schematische lengtedoorsnede en bovenaanzicht van de modelopstelling met RONA®Taille.

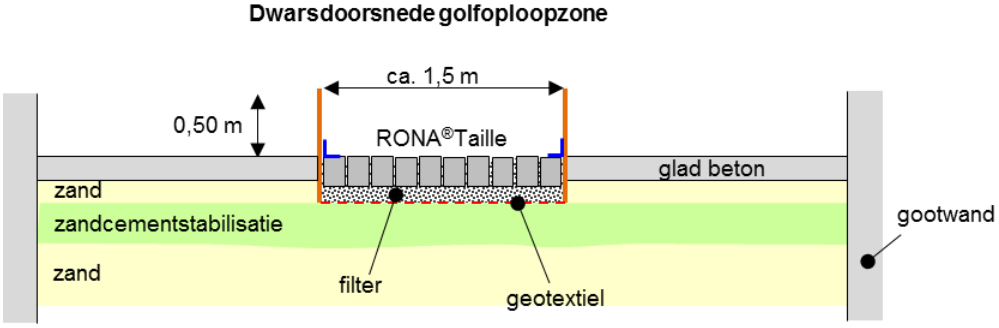
De dijk had een hoogte van 8,3 m boven de gootbodem. Om deze 8,3 m hoge dijk in de Deltagoot te kunnen bouwen, zijn de gootwanden bij de kruin van de dijk plaatselijk verhoogd met 2,5 m hoge opzetstukken. Het dijklichaam was tevens voorzien van drainage bij de teen, zodat eventuele snelle waterstandswisselingen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

- *Van Z = +0,0 m tot +2,0 m (ondertalud)*:
  Dit deel van het talud betreft een dummy sectie, bestaande uit beton op zand.

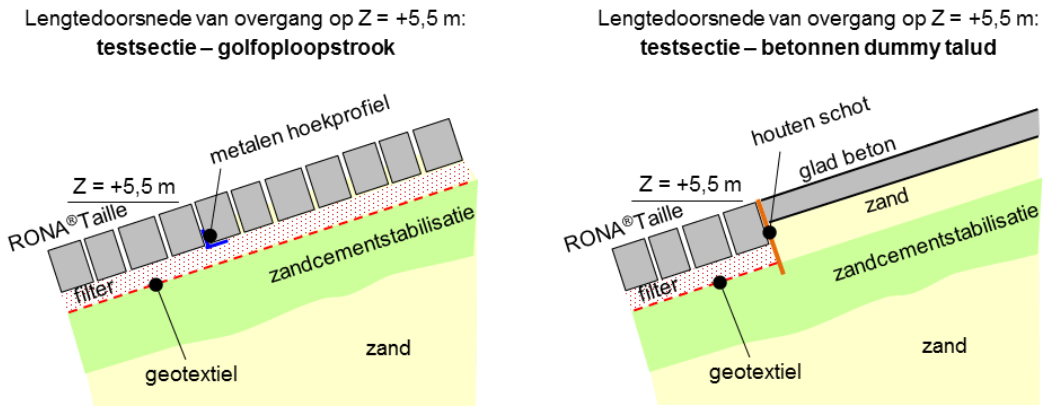
- *Van Z = +2,0 m tot +5,5 m (testsectie)*:
  Dit betreft de testsectie ten behoeve van de stabiliteitsproeven (series 1, 2 en 3). De testsectie bestaat uit RONA®Taille op een filterlaag op geotextiel (GEOPEX-NW270-S22NW-TYPE 1) op zandcementstabilisatie op zand. De laag zandcementstabilisatie simuleert 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 = +5,5 m tot +8,3 m (golfoploopzone)*:
  In het midden van dit taluddeel is tot aan de kruin een circa 1,5 m brede strook RONA®Taille aangebracht ten behoeve van de golfoploopproeven. Deze strook wordt in het onderhavige rapport aangeduid als de 'golfoploopstrook'. De RONA®Taille ligt hier, net als in de testsectie, op een filterlaag op geotextiel op zandcementstabilisatie op zand. Aan beide zijden van de golfoploopstrook is een glad dummy talud aangebracht van beton op zand. De golfoploopstrook en het gladde beton zijn van elkaar gescheiden door middel van houten schotten, om te voorkomen dat de golfoploop op de RONA®Taille en het dummy talud elkaar beïnvloeden.

Een dwarsdoorsnede van de golfoploopzone is weergegeven in Figuur 3.3. In Figuur 3.4 zijn twee lengtedoorsnedes gegeven van de overgang tussen de testsectie en de golfoploopzone (bij Z = +5,5 m). Het linkerdeel van de figuur geeft de lengtedoorsnede ter plaatse van de golfoploopstrook en het rechterdeel geeft de lengtedoorsnede ter plaatse van het betonnen dummy talud.
Door middel van een metalen hoekprofiel (zie Figuur 3.4, links), dat met beide uiteinden is verankerd aan het betonnen dummy talud, is ervoor gezorgd dat de steenzetting van de golfoploopstrook geen normaalkrachten doorgeeft aan de steenzetting in de testsectie. Met oog op de golfoploopmetingen is het hoekprofiel zodanig aangebracht dat de filterlaag onder het hoekprofiel doorgaat en de stroming in het filter niet wordt gehinderd.



Figuur 3.3 Schematische dwarsdoorsnede van de golfoploopzone.



Figuur 3.4 Links: schematische lengtedoorsnede van de overgang tussen de testsectie en de golfoploopstrook bij Z = +5,5 m. Rechts: schematische lengtedoorsnede van de overgang tussen de testsectie en het dummy talud van glad beton bij Z = +5,5 m.

Een overzicht van de belangrijkste eigenschappen van de testsectie (van Z = +2,0 m tot + 5,5 m) is gegeven in Tabel 3.1. De eigenschappen van de testsectie zijn in de volgende paragrafen meer gedetailleerd beschreven.

Eigenschap	**Serie 1**	**Serie 2**	**Serie 3**	**Serie 1-gedraaid**
Algemeen				
- taludhelling (tanα) [-]	1:3			
RONA®Taille				
- levering	1e levering	2e levering		
- zuilhoogte (D) [cm]	15,0	15,1		
- soortelijke massa (ρ_s) [kg/m^3]	2265	2239		
- open oppervlak (Ω) [%]	7,9	7,9		
Filterlaag (uitvullaag)				
- filterlaagdikte (b) [cm]	7,3	7,0	7,0	7,1
- karakteristieke korrelgroottes [mm]	D_{f15} = 10,7 D_{f50} = 19,8 D_{f90} = 33,7	D_{f15} = 11,6 D_{f50} = 20,4 D_{f90} = 34,7	D_{f15} = 10,6 D_{f50} = 18,9 D_{f90} = 32,9	D_{f15} = 11,7 D_{f50} = 20,0 D_{f90} = 41,5
Inwasmateriaal (Noors graniet)				
- karakteristieke korrelgroottes [mm]	D_{i15} = 8,6 D_{i50} = 11,1 D_{i90} = 15,4			

Tabel 3.1 Overzicht van de belangrijkste eigenschappen van de testsectie (tussen Z = +2,0 m en + 5,5 m).

Opgemerkt wordt dat tijdens het onderzoek is gebruikgemaakt van zuiltjes van twee verschillende leveringen. Zuiltjes van de eerste levering zijn gebruikt tijdens serie 1, zowel in de testsectie als in de golfoploopstrook. Bij deze zuiltjes bleek dat het beton in de nokjes tijdens de productie helaas niet goed genoeg was verdicht, waardoor van veel zuiltjes de nokjes meer of minder waren afgebrokkeld. Bij deze zuiltjes was daardoor de zuilbreedte (loodrecht op de dijk-as) bij de nokjes iets kleiner dan bij de voet van de zuil, waardoor de steenzetting gemakkelijker kan vervormen. Tijdens het inbouwen van de steenzetting is erop gelet dat de beste zuiltjes zijn gebruikt in het deel van de testsectie waar eventueel vervorming is te verwachten. Na serie 1 zijn de zuiltjes tussen Z = +2,8 en +5,5 m vervangen door zuiltjes van een nieuwe levering. In de golfoploopstrook en de onderste 2,5 m van de

testsectie zijn de zuiltjes niet vervangen, omdat daar geen vervorming te verwachten is. De nokjes van de nieuwe zuiltjes waren wel goed verdicht. Op ware grootte treedt dit productieprobleem naar verwachting niet op, doordat de nokken dan tweemaal zo groot zijn.

De golfoploopstrook is na serie 1 niet meer veranderd en bestond daardoor gedurende alle series uit zuiltjes van de eerste levering: D = 15,0 cm, ρ_s = 2265 kg/m^3 en Ω = 7,9%. Ook het filtermateriaal in de golfoploopstrook is gedurende het onderzoek niet meer veranderd, zodat voor deze strook de karakteristieke korrelgroottes van serie 1 uit Tabel 3.1 kunnen worden aangehouden: D_{f15} = 10,7 mm, D_{f50} = 19,8 mm, D_{f90} = 33,7 mm. De filterlaagdikte in de golfoploopstrook is om praktische redenen iets dikker dan in de testsectie: b = 9,0 cm.

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

$$z = \frac{x - 174{,}855}{2{,}996} \tag{3.1}$$

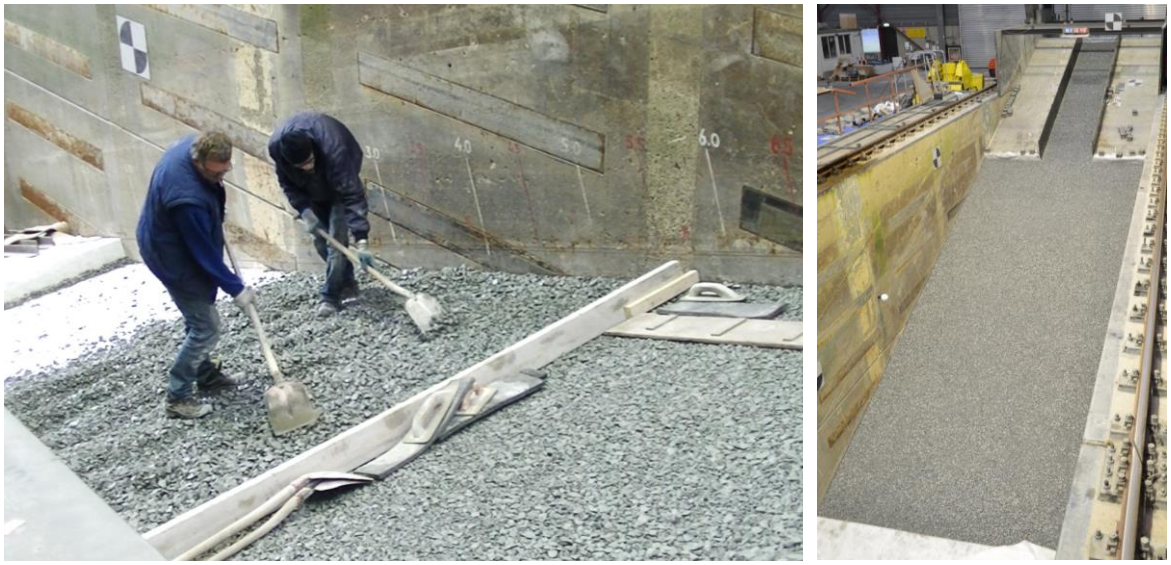
Met:
z = verticale afstand tot de gootbodem (m)
x = horizontale afstand tot het golfschot (m)

3.2.2 Filterlaag

Filterlaagdikte:
Voorafgaand aan serie 1 en na het ontstaan van schade is in (een groot deel van) de testsectie steeds een nieuwe filterlaag (uitvullaag) aangebracht (zie Figuur 3.5). Steeds is minimaal het gedeelte van de filterlaag vervangen waar eventueel vervorming aan de steenzetting te verwachten is. Elke proevenserie heeft daardoor betrekking op een nieuwe filterlaag. Elke keer werd beoogd dezelfde korrelverdeling te verkrijgen.
Van elke nieuwe filterlaag is de dikte gemeten op 24 locaties. De filterlaagdikte b is gedefinieerd als de afstand loodrecht op het talud, tussen het geotextiel en de onderzijde van de zuilen. De gemiddelde filterlaagdikte van de 24 meetlocaties is voor de uitgevoerde series als volgt: serie 1: 7,3 cm; serie 2: 7,0 cm; serie 3: 7,0 cm; serie 1-gedraaid: 7,1 cm.

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

Serie 1:	D_{f15} = 10,7 mm, D_{f50} = 19,8 mm en D_{f90} = 33,7 mm
Serie 2:	D_{f15} = 11,6 mm, D_{f50} = 20,4 mm en D_{f90} = 34,7 mm
Serie 3:	D_{f15} = 10,6 mm, D_{f50} = 18,9 mm en D_{f90} = 32,9 mm
Serie 1-gedraaid:	D_{f15} = 11,7 mm, D_{f50} = 20,0 mm en D_{f90} = 41,5 mm



Figuur 3.5 Links: aanbrengen van de filterlaag op het geotextiel. Rechts: de filterlaag in de testsectie en golfoploopstrook is gereed voor plaatsing van de zuilen.

3.2.3 RONA®Taille

Toplaagdikte:
Tijdens het onderzoek is gebruikgemaakt van zuilen van twee verschillende leveringen. De gemiddelde dikte van de RONA®Taille zuilen is voor beide leveringen bepaald op basis van 20 zuilen:

- 1e levering: gemiddelde dikte D = 15,0 cm (met D_{min} = 15,0 cm en D_{max} = 15,1)
- 2e levering: gemiddelde dikte D = 15,1 cm (met D_{min} = 15,0 cm en D_{max} = 15,2)

Soortelijke massa:
De gemiddelde soortelijke massa van het beton van de zuilen is voor beide leveringen bepaald op basis van 10 zuilen:

- 1e levering: gemiddelde soortelijke massa ρ_s = 2265 kg/m^3 (met $\rho_{s,min}$ = 2248 kg/m^3 en $\rho_{s,max}$ = 2280 kg/m^3)
- 2e levering: gemiddelde soortelijke massa ρ_s = 2239 kg/m^3 (met $\rho_{s,min}$ = 2223 kg/m^3 en $\rho_{s,max}$ = 2250 kg/m^3).

De soortelijke massa is bepaald door de zuilen boven water en onder water te wegen, nadat ze eerst 2 uur onder water hebben gelegen en verzadigd zijn met water. De dichtheid kan daaruit afgeleid worden met de volgende formule:

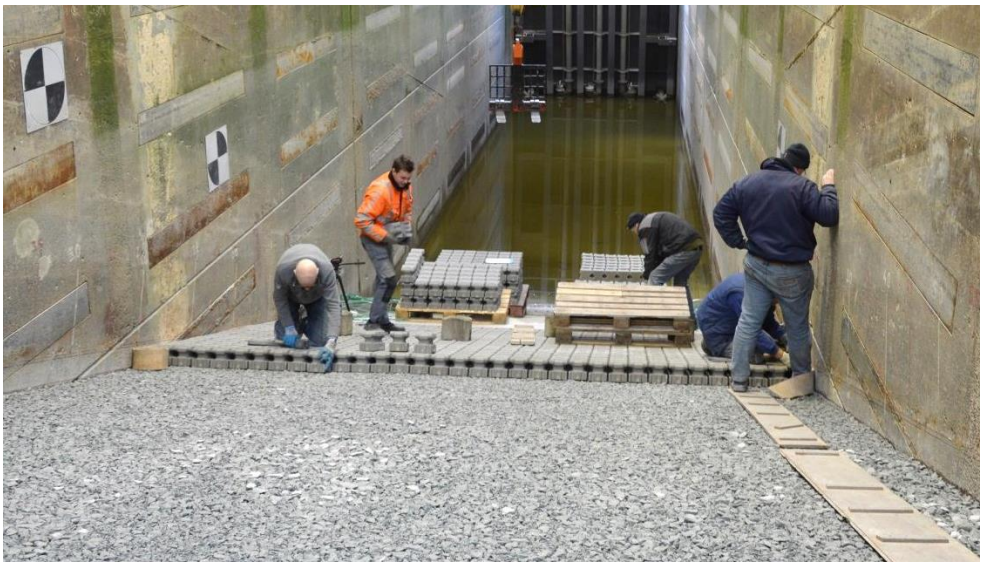
$$\rho_s = \frac{M_{boven}}{\left(M_{boven} - M_{onder}\right)} \cdot 1000 \qquad (3.2)$$

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)

Open oppervlak:
Voor doorstroming van water door de toplaag is de zuildoorsnede (evenwijdig aan het grondvlak) met het kleinste open oppervlak maatgevend. Bij de RONA®Taille zuilen is het open oppervlak het kleinst op 5,5 mm boven het grondvlak. De open oppervlakte is daar Ω = 7,9%.

Wrijvingscoëfficiënt:
De zuilen zijn vervaardigd van iets lichter beton dan in werkelijkheid gewoonlijk gebruikt wordt. Om te controleren of dat invloed heeft op de ruwheid van het betonoppervlak is de wrijvingscoëfficiënt gemeten. Uit 60 metingen volgde een gemiddelde wrijvingscoëfficiënt van 0,64. Dit is nauwelijks hoger dan bij zetstenen in de praktijk, die doorgaans een wrijvingscoëfficiënt hebben van 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. In totaal zijn 60 wrijvingsproeven uitgevoerd op zuilen van de tweede levering. Daarvan is 30 maal de onderzijde van de ene zuil geplaatst op de bovenzijde van de andere zuil, en 30 maal zijn de zuilen op hun kant gelegd, waarna de achterzijde (vlakke zijde) van de ene zuil is geplaatst op de voorzijde (zijde met de nokjes) van de andere zuil.
Voor beide sets van 30 metingen is gebruikgemaakt van 10 verschillende contactvlakparen. Per contactvlakpaar is de wrijvingsproef achtereenvolgens driemaal uitgevoerd: met extra gewichten van 0 kg (dus zonder extra gewicht), 10 kg en 20 kg bovenop de bovenste zuil. De verschillende extra gewichten en de verschillende beproefde zuilzijden hebben, zoals te verwachten is, geen noemenswaardige invloed op de wrijvingscoëfficiënt.



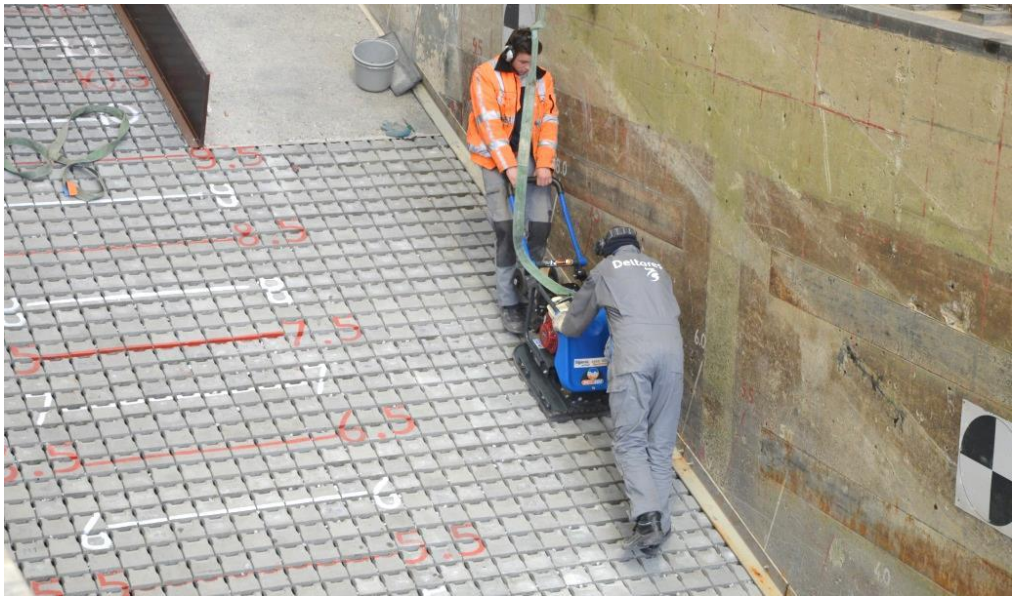
Figuur 3.6 Plaatsing van de RONA®Taille zuilen op de filterlaag.

Plaatsing:
De RONA®Taille zuilen zijn met de hand geplaatst in een recht verband (zie Figuur 1.2 en Figuur 3.6). Tijdens serie 1 is gebruikgemaakt van zuilen van de eerste levering. Omdat de kwaliteit van veel zuilen onvoldoende was (zie paragraaf 2.2.1), is tijdens het plaatsen van de zuiltjes erop gelet dat de beste zuiltjes zijn gebruikt in het deel van de testsectie waar eventueel vervorming is te verwachten.

Na serie 1 zijn de zuiltjes van de eerste levering tussen Z = +2,8 en +5,5 m vervangen door de kwalitatief betere zuiltjes van de tweede levering. In de onderste 2,5 m (gemeten langs het talud) van de testsectie en in de golfoploopstrook zijn de zuiltjes niet vervangen, omdat daar geen vervorming te verwachten is en omdat de invloed op de golfoploop verwaarloosbaar is.
De breedte van de zuilen (loodrecht op de dijk-as) was gemiddeld circa 15 cm, maar varieerde als gevolg van de productiemethode bij een deel van de zuilen tot orde 1 cm. Om te voorkomen dat de geplaatste rijen door deze maatafwijkingen teveel zouden gaan slingeren, is boven lange zuilen zoveel mogelijk gebruikgemaakt van korte zuilen, en andersom.

3.2.4 Inwasmateriaal

Voor het genereren van extra klemming tussen de zuilen is de steenzetting ingewassen met gebroken steenslag (hoekig Noors graniet). De gradering van het inwasmateriaal is in overleg met Altena Infra-materialen gekozen, zodanig dat bijna al het inwasmateriaal net klein genoeg is om in de spleten en gaten te passen, en zodanig dat het ook niet té klein is, om te voorkomen dat het te gemakkelijk uitspoelt. Er is gekozen voor een mengsel van twee standaardsorteringen: 50% van de sortering 8-11 mm en 50% van de sortering 11-16 mm. De zeefkromme van het inwasmateriaal is weergegeven in bijlage B.3.
Omdat het raster van kanalen in de steenzetting leeg moet blijven voor optimale doorstroming van het water, zijn uitsluitend de voeten van de zuilen ingewassen. Hiervoor was per vierkante meter ongeveer 10 liter inwasmateriaal benodigd.
De steenzetting is voorafgaand aan elke korteduurproef van de series 1, 2 en 1-gedraaid ingewassen en aangetrild met een trilplaat (zie Figuur 3.7). Bij serie 3 (langeduurproef) is alleen voorafgaand aan de serie ingewassen en getrild.
Het aantrillen is gedaan omdat de toplaag vers is ingebouwd met relatief los inwasmateriaal tussen de zuilen. In de werkelijkheid 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 werkelijkheid.

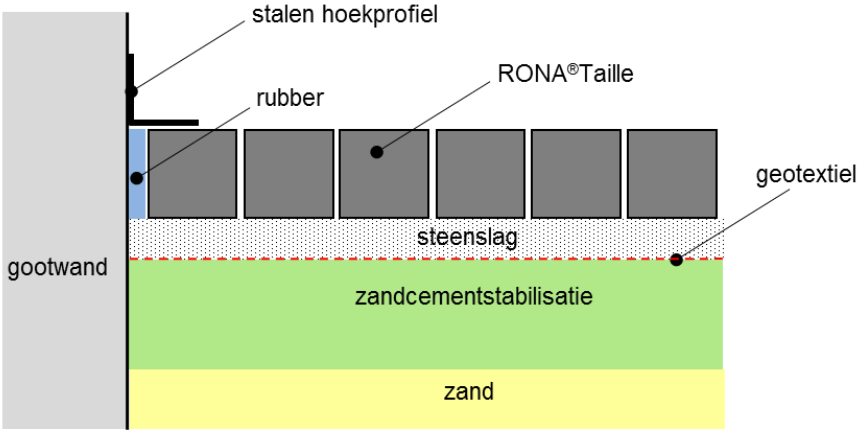


Figuur 3.7 Aantrillen van de ingewassen steenzetting.

Het inwasmateriaal heeft de volgende karakteristieke waarden: D_{i15} = 8,6 mm, D_{i50} = 11,1 mm en D_{i90} = 15,4 mm. Deze karakteristieke waarden, die betrekking hebben op het schaalmodel, kunnen vertaald worden naar ware grootte door deze te verschalen met de lengteschaal n_L = 2.

3.2.5 Afwerking van de modelranden en aanbrengen markering

Tussen de gootwand en de bekleding 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.



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

Zoals is te zien in Figuur 3.1, is op het talud belijning aangebracht ten behoeve van het uitvoeren van golfoploopmetingen (zie paragraaf 3.3.4) en ten behoeve van het vastleggen van de proefresultaten. De lijnen zijn op het talud geschilderd met een onderlinge afstand van 0,5 m, gemeten langs het talud (dit komt neer op een hoogteverschil tussen de lijnen van circa 15,8 cm). Locaties op het talud, in de richting 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. Merk op dat de teenzijde van de testsectie niet begint bij lijn 0. Dat komt doordat de belijning van voorgaande Deltagootproeven is aangehouden.
Een plattegrond van de testsectie met een indicatie van de belijning is weergegeven in bijlage B.1. Per proevenserie zijn de lijnen opnieuw op de steenzetting geschilderd. Wanneer een lijn zou samenvallen met nokjes van de zuilen, is de lijn ter bevordering van de zichtbaarheid soms enkele centimeters hoger of lager op het talud geschilderd. Daardoor kan per serie de exacte positie van de lijnen enigszins verschillen. De niveaus van de lijnen zijn voorafgaand aan elke serie ingemeten met een waterpasinstrument, zie Figuur 3.9. Deze niveaus, welke relevant zijn bij de analyse van de golfoploopmetingen, zijn weergegeven in bijlage A.2.



Figuur 3.9 Het inmeten van de lijnen op het talud met een waterpastoestel.

Tijdens het onderzoek zijn proeven uitgevoerd bij twee waterstanden: h = 4,55 m en h = 4,70 m (zie paragraaf 3.4). Bij een waterstand h = 4,70 m snijdt de stilwaterlijn het oorspronkelijke taludoppervlak bij circa x' = 7,1 m. Bij waterstand h = 4,55 m snijdt de stilwaterlijn het oorspronkelijke taludoppervlak bij circa x' = 6,6 m.

3.3 Metingen

Gedurende het onderzoek zijn de volgende metingen uitgevoerd:

- Golfcondities
- Profielmetingen
- Uitspoeling inwasmateriaal
- Golfoploopmetingen

Bovengenoemde metingen zijn 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 80 m, 85 m en 87 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 een bemonsteringsfrequentie van 30 Hz gebruikt.

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 hangt tijdens de meting boven de goot (zie Figuur 3.10) en projecteert een laserstraal vanuit een draaiende spiegel richting de in te meten oppervlakte. Na terugkaatsing via het talud wordt de straal weer opgevangen door de scanner. Vervolgens kunnen de afstand tot het talud en de relatieve verticale en horizontale hoeken worden berekend. Deze data wordt vastgelegd ten behoeve van het genereren van een 3D profiel.



Figuur 3.10 De laserscanner hangt tijdens de meting boven het midden van de goot.

De laserscans zijn standaard uitgevoerd vanaf twee locaties boven de testsectie (in het hart van de goot, bij X = 184,20 m en X = 187,73 m vanaf het golfschot), waarna de resultaten van beide 3D scans zijn gecombineerd. Dit vergroot de nauwkeurigheid. Voorafgaand aan elke meting is eventueel op het talud liggend inwasmateriaal eerst zoveel mogelijk verwijderd. De 3D resultaten van de laserscans zijn voor alle proeven weergegeven in hoofdstuk 4.

3.3.3 Uitspoeling inwasmateriaal

Na elke proef is de uitspoeling van het inwasmateriaal gemeten rondom 18 vooraf gemarkeerde RONA®Taille zuilen. Dat is gedaan door met een duimstok de afstand te meten vanaf de bovenzijde van de zuil tot 'de bodem' van de omringende gaten. Door daar achteraf de gezamenlijke hoogte van de kanalen en zuilkop van af te trekken, blijft de uitspoeldiepte over ten opzichte van de bovenkant van de zuilvoet. Uitsluitend de zuilvoeten zijn immers ingewassen.
In bijlage B.1 is een indicatie van de locatie van deze zuilen gemarkeerd op de plattegrond van de testsectie (zie de grijs gemarkeerde zuilen). Per serie lag de exacte locatie soms echter een rij hoger of lager op het talud.
De zuilen bevonden zich langs 3 raaien in de lengterichting van de goot (raaien op +1,35 m, 0,00 m en -1,35 m ten opzichte van het hart van de goot). Langs elke raai zijn 6 vooraf gemarkeerde stenen ingemeten, rond de lijnen 3, 4, 5, 6, 7 en 8.
Bij het meten van de uitspoeldiepte is onderscheid gemaakt tussen de kelken, ontwateringsgaten en spleten. Per RONA®Taille zuil zijn 2 kelken, 4 ontwateringsgaten en 2 spleten ingemeten. De analyse van de resultaten is beschreven in paragraaf 5.1.

3.3.4 Golfoploopmetingen

Naast de stabiliteitsproeven, die specifiek zijn gericht op het bepalen van de stabiliteit van RONA®Taille, zijn tevens enkele proeven specifiek uitgevoerd voor het bepalen van de golfoploopreducerende werking van deze steenzetting. Tijdens die golfoploopproeven zijn golfoploopmetingen uitgevoerd, waarvoor lijnen op het talud zijn geschilderd met een tussenafstand van 0,5 m. Daarnaast is ook tijdens de stabiliteitsproeven de golfoploop gemeten. De golfoploopproeven en de golfoploopmetingen zijn niet in het onderhavige rapport beschreven en geanalyseerd, maar in Van Steeg (2015).

3.4 Proevenprogramma

De steenzetting is achtereenvolgens beproefd met de volgende vijf proevenseries:

- *Series 1 en 2*: de eerste twee series (series 1 en 2) bestonden uit korteduurproeven. Een korteduurproef duurt circa 1000 golven, of korter indien schade optreedt. Per serie met korteduurproeven is de brekerparameter gelijk gehouden. De proeven van serie 1 zijn uitgevoerd met relatief lange golven (golfsteilheid van 2%). De proeven van serie 2 zijn uitgevoerd met relatief korte golven (golfsteilheid van 4%). Binnen deze series is bij elke volgende proef de golfhoogte steeds een stukje vergroot totdat schade optrad.
- *Serie 1-gedraaid*: omdat tijdens serie 1 en 2 relatief snel schade ontstond, is besloten serie 1 te herhalen, maar nu met 180 graden gedraaide zuiltjes (om de denkbeeldige as loodrecht op het talud) in de testsectie. Deze serie is in dit rapport aangeduid als "serie 1-gedraaid". Omdat opnieuw relatief snel schade ontstond, en omdat gedraaide zuiltjes de golfoploop naar verwachting minder goed reduceren dan niet-gedraaide zuiltjes, zijn de zuiltjes na deze serie weer teruggedraaid in hun oude positie (met uitzondering van de zuiltjes in de onderste 4,5 m van de testsectie, waar geen schade en vervorming te verwachten was). De resultaten van deze proevenserie zijn uiteindelijk niet gebruikt voor het bepalen van de stabiliteitsfactor.
- *Golfoploopproeven*: vervolgens is een serie golfoploopproeven uitgevoerd. Het doel van deze proeven is het bepalen van de golfoploopreductiecoëfficiënt.

- *Serie 3*: de laatste serie (serie 3) bestond uit een langeduurproef, met gelijkblijvende golfcondities. Deze serie is voortgezet totdat schade ontstond. Deze serie geeft inzicht in de langeduursterkte van de bekleding. De langeduurproef van de serie 3 is uitgevoerd met golfcondities die tijdens serie 2 (met dezelfde golfsteilheid) nog net geen schade hadden opgeleverd.

Voor het bepalen van de stabiliteitsfactor is uitsluitend gebruikgemaakt van de resultaten van de proevenseries 1, 2 en 3. De gerealiseerde golfcondities (in modelwaarden) zijn weergegeven in Tabel 3.2. De resultaten van serie 1-gedraaid zijn uiteindelijk niet gebruikt voor het bepalen van de stabiliteitsfactor en zijn afzonderlijk weergegeven in Tabel 3.3. De golfcondities van series 1, 2, 3 en 1-gedraaid zijn tevens weergegeven in bijlage A.1. De golfoploopproeven (proeven R06 t/m R11) zijn niet in het onderhavige rapport beschreven en geanalyseerd, maar in Van Steeg (2015).

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.4 t/m B.7.

Na elke proef van de series 1, 2 en 1-gedraaid 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. Tijdens serie 3 (langeduurproef) is de bekleding tussentijds níet ingewassen en aangetrild.

Aan het begin van de proevenseries 1, 2 en 1-gedraaid 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. Voorafgaand aan serie 3 is geen ingolfproef uitgevoerd, omdat daarvoor al enkele golfoploopproeven waren uitgevoerd. Die golfoploopproeven zijn uitgevoerd met dermate kleine golven, dat bij aanvang van proef R12 nog geen zichtbare vervorming van de steenzetting is geconstateerd.
Alle ingolfproeven zijn uitgevoerd met relatief lange golven (golfsteilheid van 2%), omdat daarbij naar verwachting de golfbelasting iets meer verspreid op het talud komt dan bij relatief korte golven.
De ingolfproeven zijn uitgevoerd met een waterstand van 4,55 m boven de gootbodem. Tijdens alle andere proeven is een waterstand aangehouden van 4,70 m boven de gootbodem. Na afloop van elke proef is de waterstand verlaagd en de bekleding geïnspecteerd om te zien of er al schade was ontstaan.

Een proef werd gestopt zodra er ernstige schade was ontstaan of zodra de vooraf gestelde duur was bereikt. Een proevensérie is beëindigd bij het bezwijken van de steenzetting (schadecategorie c of d). De genoemde waarden in Tabel 3.2 betreffen de condities zoals gemeten in de Deltagoot (schaal 1:2). De overeenkomstige belastingduur is op ware grootte $\sqrt{2}$ 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	R01	4,55	0,71	4,73	4,32	0,020	0,024	2,34	2,14	478	0,50	3,73
	R02	4,70	0,84	5,05	4,80	0,021	0,023	2,29	2,18	224	0,27	4,43
2	R03	4,55	0,70	4,73	4,31	0,020	0,024	2,36	2,15	473	0,50	3,72
	R04	4,70	0,84	3,65	3,47	0,041	0,045	1,65	1,57	994	0,88	4,50
	R05	4,70	0,99	3,97	3,77	0,040	0,045	1,66	1,58	934	0,91	5,28
3	R12	4,70	0,73	3,46	3,23	0,039	0,045	1,68	1,57	2428	2,00	3,90
	R13	4,70	0,75	3,47	3,28	0,040	0,044	1,67	1,58	4780	4,00	3,98
	R14	4,70	0,73	3,44	3,26	0,039	0,044	1,68	1,59	2182	1,83	3,88

Tabel 3.2 Proevenprogramma met de gerealiseerde golfcondities. Tijdens deze proeven waren de zuilen geplaatst met de voorzijde richting de kruin.

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-gedraaid	P01	4,55	0,70	4,74	4,31	0,020	0,024	2,37	2,15	473	0,50	3,71
	P02	4,70	0,85	5,28	4,81	0,019	0,023	2,39	2,18	487	0,58	4,52

Tabel 3.3 Proevenprogramma met de gerealiseerde golfcondities. Tijdens deze proeven waren de zuilen in de testsectie 180 graden gedraaid (met de voorzijde richting de teen van de dijk).

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

De proeven R12, R13 en R14 van serie 3 vormen gezamenlijk de langeduurproef. Tussen deze proeven is de steenzetting immers niet ingewassen en aangetrild. De langeduurproef is slechts in verschillende delen uitgevoerd om tussendoor de waterstand te kunnen verlagen, zodat de bekleding geïnspecteerd en eventuele vervorming vastgelegd kon worden.
Omdat de genoemde proeven verschillende delen van één lange proef zijn, kunnen de golfcondities van de afzonderlijke proefdelen bij elkaar worden opgeteld tot één lange proef met de onderstaande formules op basis van het gewogen gemiddelde van de energie (energie maal aantal golven).

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

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

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

Met:

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

4 Proefresultaten en observaties

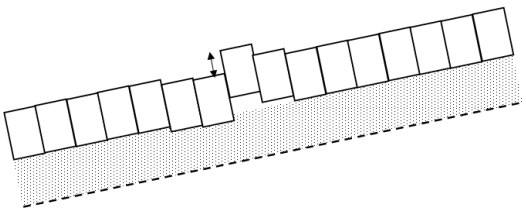
4.1 Indeling in schadecategorieën

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

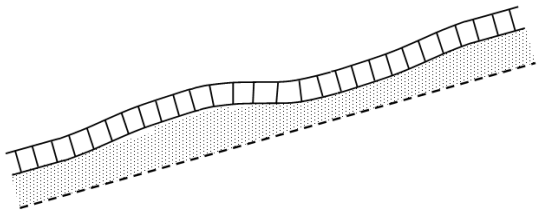
a) De verplaatsing van een zetsteen ten opzichte van een naastliggend zetsteen is kleiner dan 10 % van de dikte van de toplaag (0,1·D, met D = toplaagdikte) (zie Figuur 4.1), of de amplitude van de vervorming (S-vormig taludoppervlak, zie Figuur 4.2) is kleiner dan 20% van de toplaagdikte. In de praktijk 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 R01 – R02)

Proef R01 (ingolfproef, s_{op} = 0,02, H_s = 0,71 m, N = 478 golven)

Tijdens deze ingolfproef is geen schade opgetreden (schadecategorie a). Wel is al enige vervorming van het talud opgetreden (zie Foto C.2.a en Foto C.2.b in bijlage C). Zie Figuur 4.4 voor de 3D laserscans van de proeven van serie 1.

Tussen lijn 5,5 en lijn 6 zijn de zuilen iets omhoog gekomen, waardoor een kleine rug is gevormd. De rug is het duidelijkst rond circa 1/4^{e} en 3/4^{e} van de gootbreedte. Vanaf de top van de rug, vlak boven lijn 5,5, neemt de vervorming richting de kruin van de constructie vrij gelijkmatig af, terwijl de vervorming richting de teen juist vrij abrupt afneemt. Daardoor zijn rond lijn 5,5 hoogteverschillen tussen naast elkaar gelegen zuilen zichtbaar. Na de proef is een maximaal hoogteverschil tussen naast elkaar gelegen zuilen gemeten van 1,4 cm. Het hoogteverschil tussen de top en het dal van de rug is circa 2,5 cm (amplitude is 1 à 1,5 cm). Beide typen vervormingen vallen nog binnen schadecategorie a (geen schade). De meeste golfklappen kwamen tijdens deze proef op het talud tussen lijn 4,5 en lijn 5,5. De vervorming is derhalve net boven de golfklapzone opgetreden, maar nog onder de stilwaterlijn.

Na de proef viel op dat inwasmateriaal zich tussen lijn 1 en lijn 4,5 her en der had opgehoopt in de kanalen (Zie Foto C.2.c). In de zwaarst belaste zone van het talud was het inwasmateriaal nauwelijks uitgespoeld uit de kelken, maar wel (groten)deels uit de ontwateringsgaten en spleten. Sommige spleten en ontwateringsgaten waren na de proef zelfs geheel leeg (zie Foto C.3.a). Een meer uitgebreide analyse van de uitspoeling van het inwasmateriaal is opgenomen in paragraaf 5.1.

Zowel voor als na de proef viel op dat sommige zuilen met de hand orde een millimeter heen en weer bewogen konden worden in de lengterichting van de goot, ondanks inwassen en aantrillen van de steenzetting. De voeten van de zuilen stonden strak tegen elkaar, maar de koppen van de zuilen maakten in de lengterichting van de goot in veel gevallen net geen contact, als gevolg van de te korte nokken (zie paragraaf 3.2.1).

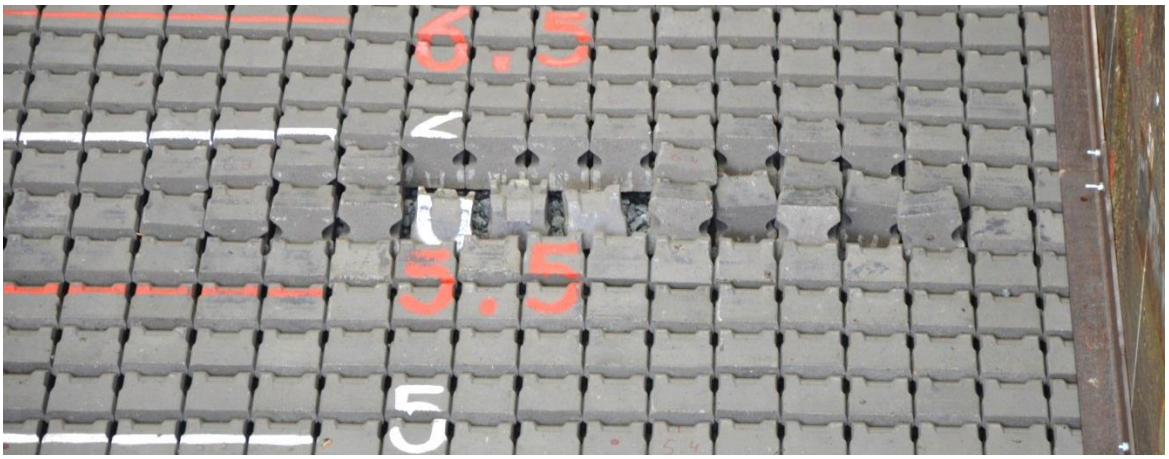
Na de proef is de vervorming zo vlak mogelijk getrild, het inwasmateriaal aangevuld en de testsectie aangetrild. Tijdens het trillen is bij lijn 6 (Y = 0,3 m) een hoek van een zuil gebroken. Deze zuil is vervangen door een andere, goed klemmende zuil.

Proef R02 (s_{op} = 0,02, H_s = 0,84 m, N = 224 golven)

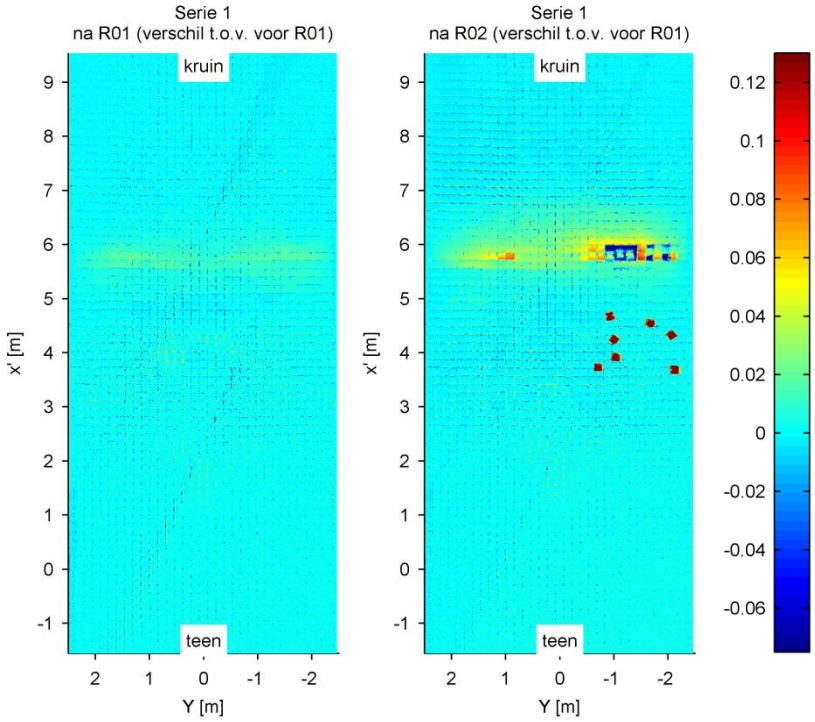
Tijdens deze proef is de steenzetting bezweken (schadecategorie d). Ongeveer 8 minuten na het begin van de proef kwam tussen lijn 5,5 en lijn 6, in de goothelft aan de meetcabinezijde (vanaf het golfschot gezien de rechter zijde), een rij van enkele naast elkaar gelegen zuilen een stukje omhoog. Water dat tijdens de golfneerloop over het talud en door de kanalen naar beneden stroomde, zorgde op die locatie voor zogenoemde ‘spuiters’ (zie Foto C.3.b). In de volgende minuten kwamen de zuilen verder omhoog en ongeveer 15,5 minuten na het begin van de proef kwam een zuil uit het talud, enkele seconden later gevolgd door nog enkele zuilen (zie Figuur 4.3, Foto C.4.a en Foto C.4.b).

Tussen lijn 5,5 en lijn 6 zijn gedurende de laatste minuten van de proef ook in de goothelft aan de halzijde (vanaf het golfschot gezien de linker zijde) enkele naast elkaar gelegen zuilen

bijna uit het talud gekomen (zie Foto C.4.a). Na de proef is geconstateerd dat de steenzetting tussen lijn 5,5 en lijn 6,5 over bijna de hele gootbreedte tot enkele centimeters boven het filter zweefde (zie Foto C.5.a).



Figuur 4.3 Schade na proef R02 (serie 1).



Figuur 4.4 3D laserscans van de testsectie na de proeven R01 en R02 (verschilmeting t.o.v. de situatie voor proef R01). De bruine stippen tussen x' = 3,5 m en x' = 5 m (proef R02) betreffen uit het talud gekomen zuilen. Het hoogteverschil is gegeven in cm (positief = verplaatsing omhoog).

Omdat de vervorming in het midden van de goot iets minder was dan daarnaast, is zowel na proef R01 als R02 gecontroleerd of de golfoploopstrook geen vergrotende invloed had op de normaalkrachten in de testsectie. Na beide proeven is geconstateerd dat de bovenste zuilen van de testsectie, die tegen het metalen hoekprofiel waren geplaatst, weliswaar geklemd waren als gevolg van inwasmateriaal, maar toch orde 0,5 mm tot enkele millimeters vrij stonden van het hoekprofiel en enigszins bewogen konden worden. Op basis hiervan is

geconcludeerd dat de golfoploopstrook de normaalkrachten in de testsectie niet heeft vergroot.

Na de proef viel op dat inwasmateriaal zich tussen lijn 0,5 en lijn 4,5 op veel plaatsen had opgehoopt in de kanalen. In de zwaarst belaste zone van het talud was het inwasmateriaal nauwelijks uitgespoeld uit de kelken, maar wel (groten)deels uit de ontwateringsgaten en spleten. Veel spleten en ontwateringsgaten waren na de proef geheel leeg.

De waarnemingen wijzen erop dat de steenzetting is bezweken doordat water direct na de golfklap vlak boven de golfklaplocatie met hoge snelheid tegen de vlakke zijden van de zuilen botst en in het filter wordt geperst. Vlak boven de golfklaplocatie ontstaat daardoor opwaartse druk tegen de onderzijde van de steenzetting, waardoor de zuilen een kracht omhoog ondervinden. Tegelijkertijd zorgt het water, dat tegen de vlakke zijde botst, ervoor dat de zuil heen en weer gewrikt wordt, wat het schadeproces mogelijk heeft versneld. Als gevolg van de iets te korte nokken (zie paragraaf 3.2.1 en Foto C.5.b) kunnen de zuilen extra makkelijk heen en weer gewrikt worden. Daarom is ervoor gekozen de volgende proevenseries uit te voeren met nieuwe zuilen, waarbij de nokken wel aansluiten op de kruinwaarts gelegen zuilen. Na de proef zijn de zuilen en het filter verwijderd en opnieuw ingebouwd vanaf lijn 1 tot aan de kruinzijde van de testsectie.

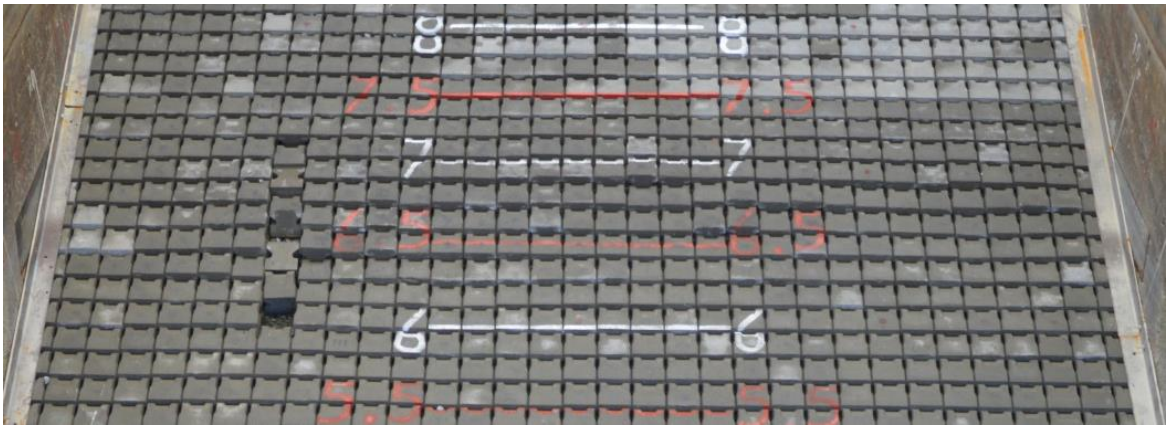
4.3 Serie 2: korteduurproeven (proeven R03 – R05)

Proef R03 (ingolfproef, s_{op} = 0,02, H_s = 0,70 m, N = 473 golven)
Tijdens deze ingolfproef is geen schade opgetreden (schadecategorie a). Wel is lichte vervorming van het talud opgetreden (zie Foto C.6.a). Zie Figuur 4.6 voor de 3D laserscans van de proeven van serie 2.
Tussen lijn 5 en lijn 6 zijn de zuilen iets omhoog gekomen, waardoor een kleine rug is gevormd. Het hoogteverschil tussen de top en het dal van deze rug is bijna 2 cm (amplitude is circa 1 cm). Na de proef is een maximaal hoogteverschil tussen naast elkaar gelegen zuilen gemeten van 0,9 cm. Beide typen vervormingen vallen nog ruim binnen schade-categorie a (geen schade).
Tijdens de proef heeft het inwasmateriaal zich teenwaarts van lijn 3,5 her en der opgehoopt in de kanalen. In de zwaarst belaste zone van het talud was het inwasmateriaal nauwelijks uitgespoeld uit de kelken, maar wel deels uit de ontwateringsgaten en spleten.
Na de proef is de vervorming zo vlak mogelijk getrild, het inwasmateriaal aangevuld en de testsectie aangetrild.

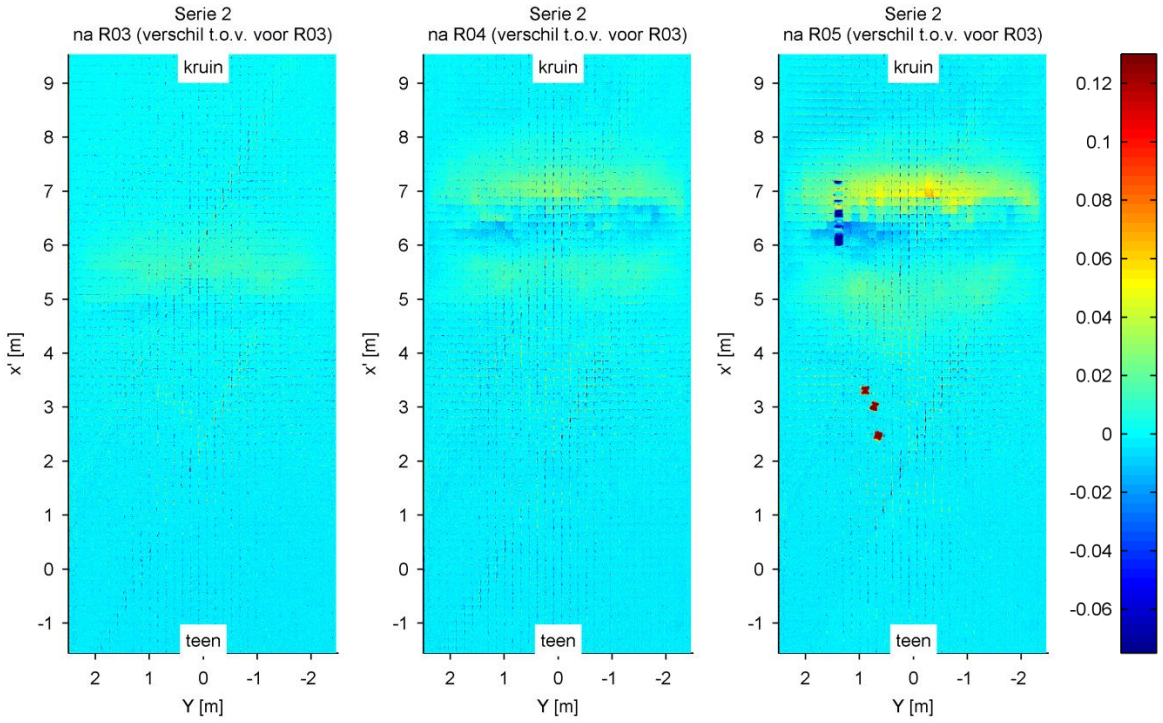
Proef R04 (s_{op} = 0,04, H_s = 0,84 m, N = 994 golven)
Tijdens deze proef is vervorming opgetreden tussen lijn 5 en lijn 7,5 (zie Foto C.7.a, Foto C.7.b en Foto C.7.c). Het hoogteverschil tussen de top en het dal van de ontstane vervorming is bijna 4 cm (amplitude is circa 2 cm). Na de proef is een maximaal hoogteverschil tussen naast elkaar gelegen zuilen gemeten van 2,9 cm. Dat is nog net kleiner dan 20% van de toplaagdikte (schadecategorie b). Dit wordt daarom nog niet als bezwijken gezien.
Tijdens de proef heeft het inwasmateriaal zich teenwaarts van lijn 4,5 her en der opgehoopt in de kanalen. In de zwaarst belaste zone van het talud was het inwasmateriaal nauwelijks uitgespoeld uit de kelken, maar wel grotendeels uit de ontwateringsgaten en spleten. Veel spleten en ontwateringsgaten waren na de proef geheel leeg.
Na de proef is de vervorming zo vlak mogelijk getrild (zie Foto C.8.a), het inwasmateriaal aangevuld en de testsectie aangetrild.

Proef R05 (s_{op} = 0,04, H_s = 0,99 m, N = 934 golven)

Tijdens deze proef is de steenzetting bezweken (schadecategorie d). Vanaf circa 7 minuten na het begin van de proef viel op dat tussen lijn 6,5 en lijn 7, in de goothelft aan de meetcabinezijde, enkele naast elkaar gelegen zuilen een stukje omhoog kwamen. Gedurende de proef kwamen deze zuilen langzaam verder omhoog en ook teen- en kruinwaarts gelegen zuilen kwamen langzaam omhoog. Tot het einde van de proef hebben de zuilen in deze goothelft echter stand gehouden.



Figuur 4.5 Schade na proef R05 (serie 2).



Figuur 4.6 3D laserscans van de testsectie na de proeven R03, R04 en R05 (verschilmeting t.o.v. de situatie voor proef R03). De bruine stippen tussen x' = 2 m en x' = 3,5 m (proef R05) betreffen uit het talud gekomen zuilen. Het hoogteverschil is gegeven in cm (positief = verplaatsing omhoog).

In de goothelft aan de halzijde zijn wel zuilen uit de bekleding gekomen. Ongeveer 41 minuten na het begin van de proef viel op dat bij lijn 6,5 enkele naast elkaar gelegen zuilen een stukje omhoog kwamen. Na 45 minuten was te zien dat daarvan de zuil bij Y = 1,35 m verder omhoog kwam dan de andere zuilen. Na 54 minuten kwam deze zuil uit het talud,

direct gevolgd door nog twee teen- en/of kruinwaarts gelegen zuilen (zie Figuur 4.5 , Foto C.8.c, Foto C.9.a en Foto C.9.b). Het hoogteverschil tussen de top en het dal van de ontstane vervorming is ruim 7 cm (amplitude is circa 3,5 cm).

Tijdens de proef heeft het inwasmateriaal zich teenwaarts van lijn 4,5 op veel plaatsen opgehoopt in de kanalen. In de zwaarst belaste zone van het talud was het inwasmateriaal nauwelijks uitgespoeld uit de kelken, maar wel uit de ontwateringsgaten en spleten: bijna alle ontwateringsgaten en spleten tussen lijn 5 en lijn 8 waren leeggespoeld.
Na de proef is geconstateerd dat de steenzetting tussen lijn 6,5 en lijn 8 over een groot deel van de gootbreedte tot enkele centimeters boven het filter zweefde.

De filterlaag en steenzetting zijn na deze proef uit de hele testsectie verwijderd en 180 graden gedraaid teruggeplaatst voor het uitvoeren van serie 1-gedraaid, zie paragraaf 4.5. De golfoploopstrook is gedurende het hele onderzoek niet aangepast.

4.4 Serie 3: langeduurproef (proeven R12 – R14)

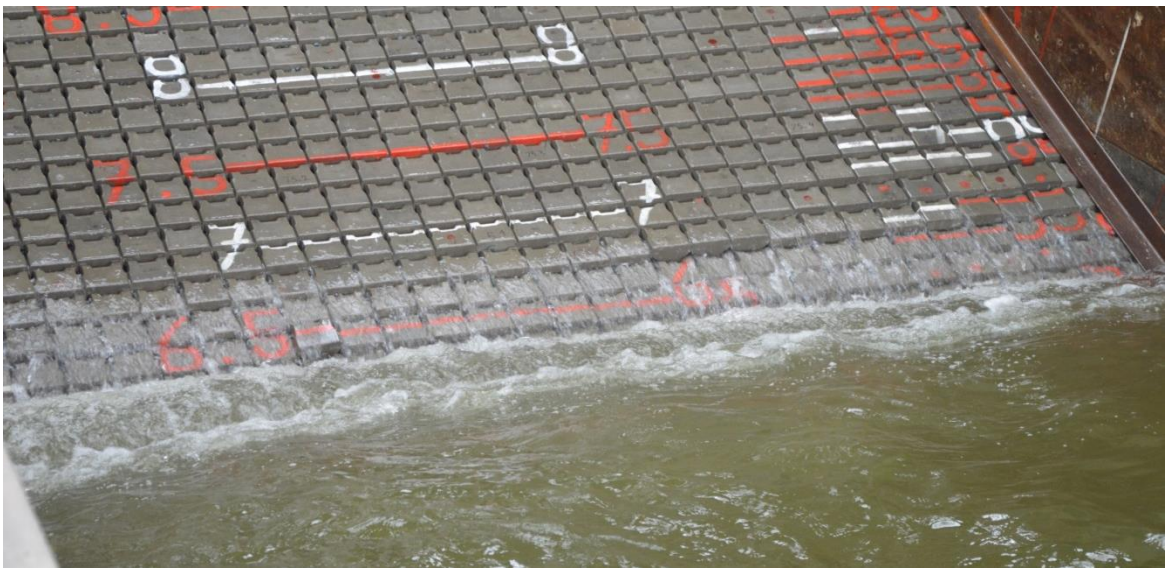
Voorafgaand aan serie 3 zijn enkele golfoploopproeven uitgevoerd voor het bepalen van de golfoploopreductiecoëfficiënt. Deze proeven zijn niet in het onderhavige rapport beschreven, maar in Van Steeg (2015). Na de golfoploopproeven was visueel nog geen vervorming geconstateerd. Vanwege de golfoploopproeven was het niet nodig om voorafgaand aan serie 3 eerst nog in te golven. Voor aanvang van serie 3 is het uitgespoelde inwasmateriaal nog aangevuld en is de steenzetting aangetrild. Tijdens serie 3 is dat níet meer gedaan.

Proef R12 (s_{op} = 0,04, H_s = 0,73 m, N = 2428 golven)
Tijdens deze proef is geen schade opgetreden (schadecategorie a). Wel is lichte vervorming van het talud opgetreden (zie Foto C.10.a). Zie Figuur 4.9 voor de 3D laserscans van de proeven van serie 3.
Tussen lijn 6,5 en lijn 7,5 zijn de zuilen iets omhoog gekomen, waardoor een kleine rug is gevormd. Tussen lijn 6 en lijn 6,5 zijn de zuilen juist iets dieper in de steenzetting komen te liggen. Het hoogteverschil tussen de top en het dal van deze vervorming is circa 2 cm (amplitude is circa 1 cm). Na de proef is een maximaal hoogteverschil tussen naast elkaar gelegen zuilen gemeten van 1,3 cm. Beide typen vervormingen vallen nog binnen schadecategorie a (geen schade).
Gedurende de proef heeft het inwasmateriaal zich teenwaarts van lijn 5 her en der opgehoopt in de kanalen. In de zwaarst belaste zone van het talud was het inwasmateriaal nauwelijks uitgespoeld uit de kelken, maar wel deels uit de ontwateringsgaten en spleten. Na de proef is het uitgespoelde inwasmateriaal niet aangevuld en is de steenzetting niet aangetrild.
De aanwezigheid van het opgehoopte inwasmateriaal in de kanalen was tijdens de proef merkbaar doordat omlaag stromend water tijdens de golfneerloop uit de kanalen werd geperst en kleine fonteintjes vormde.

Proef R13 (s_{op} = 0,04, H_s = 0,75 m, N = 4780 golven)
Tijdens deze proef is de vervorming tussen lijn 6 en lijn 7,5 toegenomen (zie Foto C.11.a, Foto C.11.b en Foto C.11.c). Na ongeveer 1 uur en 15 minuten viel op dat vooral in de goothelft aan de meetcabinezijde enkele rijen zuilen een stukje omhoog gekomen waren. Gedurende de resterende 2 uur en 45 minuten is die vervorming echter nauwelijks groter geworden.
Het hoogteverschil tussen de top en het dal van de ontstane vervorming was na de proef bijna 4 cm (amplitude is circa 2 cm). Na de proef is een maximaal hoogteverschil tussen

naast elkaar gelegen zuilen gemeten van 3,0 cm. Dat is nog net kleiner dan 20% van de toplaagdikte (schadecategorie b). Dit wordt daarom nog niet als bezwijken gezien.
Gedurende de proef heeft het inwasmateriaal zich tussen lijn 2,5 en lijn 4,5 opgehoopt in de kanalen. In de zwaarst belaste zone van het talud was het inwasmateriaal nauwelijks uitgespoeld uit de kelken. Een uitzondering daarop vormden de kelken tussen naastgelegen zuilen met een hoogteverschil van circa 2,5 à 3 cm. Vanuit die kelken kon het inwasmateriaal makkelijk wegglijden naar de filterlaag, zie Figuur 5.2. De ontwateringsgaten en spleten waren vrijwel allemaal leeggespoeld tussen lijn 6 en lijn 7,5.
Na de proef is het uitgespoelde inwasmateriaal niet aangevuld en is de steenzetting niet aangetrild.

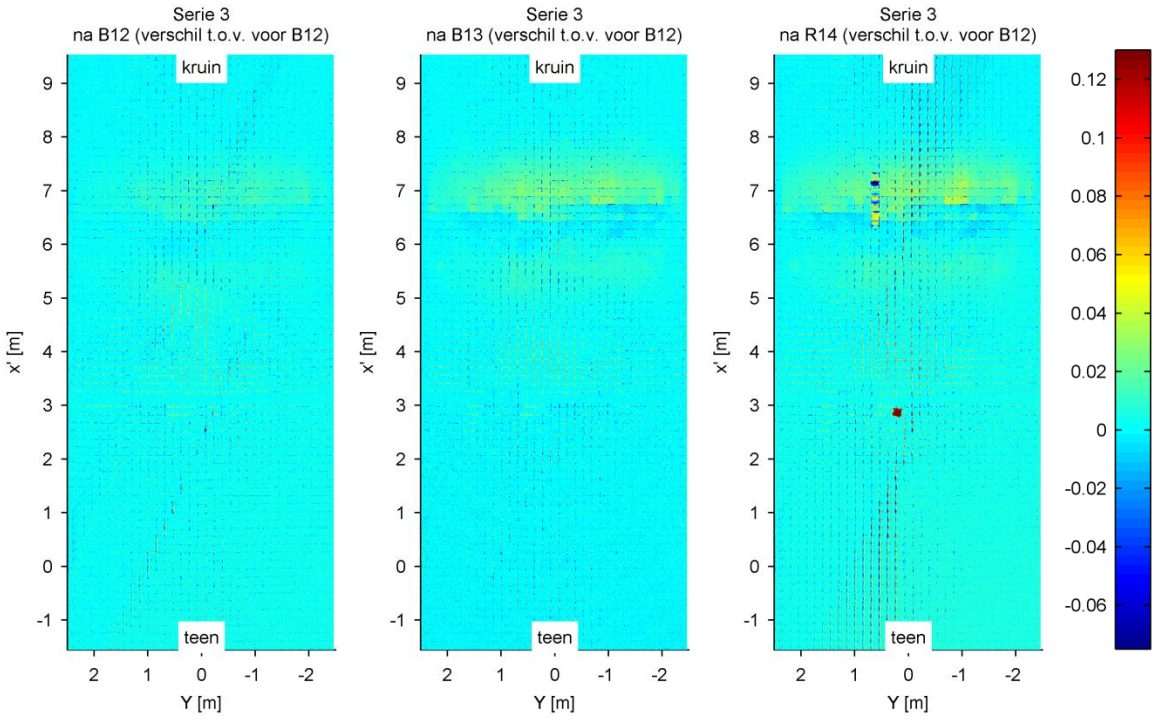
Proef R14 (s_{op} = 0,04, H_s = 0,73 m, N = 2182 golven)
Tijdens deze proef is de steenzetting bezweken (schadecategorie d). Na 44 min viel op dat een zuil in de goothelft aan de halzijde (lijn 6,5, Y = 0,60 m) circa 2 cm omhoog is gekomen. Na circa 60 minuten stak de zuil ongeveer 3 cm boven het talud uit (zie Figuur 4.7) en na ongeveer 66 min stak de zuil er bijna voor de helft uit. De zuil heeft echter nog bijna drie kwartier stand gehouden (zie Figuur 4.8, links). Pas na 1 uur en 50 minuten is deze zuil uit de bekleding gekomen. Een teenwaarts gelegen zuil en enkele kruinwaarts gelegen zuilen zijn daarna gekanteld en/of in het ontstane gat naar beneden geschoven (zie Figuur 4.8, midden en rechts, en Foto C.12.b).
Drie zuilen in de meetcabinehelft van de goot, die tijdens proef R13 al circa 3 cm omhoog gekomen waren, zijn gedurende de proef slechts 1 cm verder omhoog gekomen ten opzichte van de teenwaarts gelegen zuilen (zie Foto C.12.a).
Gedurende de proef heeft het inwasmateriaal zich tussen lijn 3 en lijn 4,5 opgehoopt in de kanalen. In de zwaarst belaste zone van het talud was het inwasmateriaal nauwelijks uitgespoeld uit de kelken, mits het hoogteverschil tussen naastgelegen zuilen in de lengterichting van de goot niet groter was dan 2,5 à 3 cm. De ontwateringsgaten en spleten waren vrijwel allemaal leeggespoeld tussen lijn 6 en lijn 7,5.



Figuur 4.7 Ongeveer 60 minuten na het begin van proef R14 stak de zuil bij lijn 6,5 (Y = 0,60 m) circa 3 cm boven het talud uit (serie 3).



Figuur 4.8 Links: de situatie 1 uur en 36 minuten na het begin van proef R14 (serie 3). Midden en rechts: direct nadat na 1 uur en 50 minuten een zuil uit de bekleding kwam, zijn een teenwaarts gelegen zuil en enkele kruinwaarts gelegen zuilen gekanteld en/of in het ontstane gat naar beneden geschoven (proef R14, serie 3).



Figuur 4.9 3D laserscans van de testsectie na de proeven R12, R13 en R14 (verschilmeting t.o.v. de situatie voor proef R12). De bruine stip bij x' = 3 m (proef R14) betreft een uit het talud gekomen zuil. Het hoogteverschil is gegeven in cm (positief = verplaatsing omhoog).

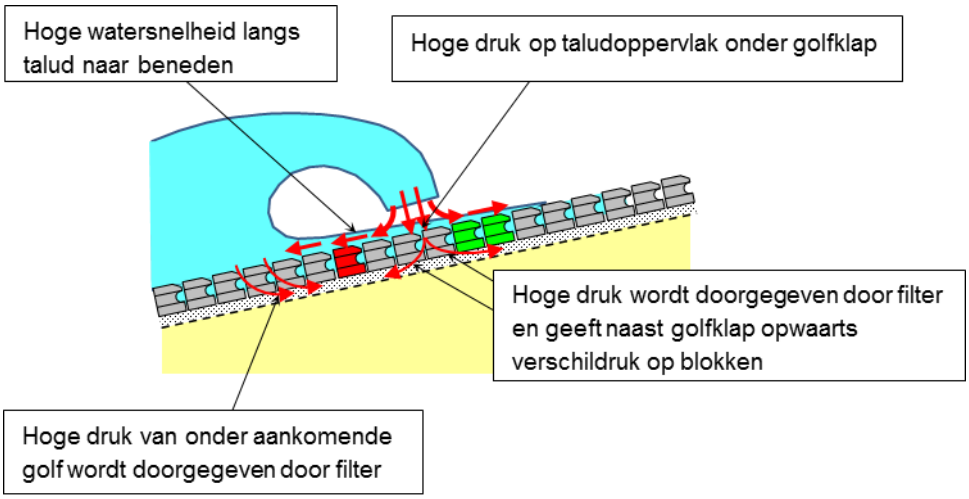
4.5 Serie 1-gedraaid: korteduurproeven (proeven P01 – P02)

Proef P01 (ingolfproef, s_{op} = 0,02, H_s = 0,70 m, N = 473 golven)

Tijdens deze ingolfproef is geen schade opgetreden (schadecategorie a). Wel is lichte vervorming van het talud opgetreden (zie Foto C.13.b). Rond lijn 4,5 en rond lijn 5,5 is gedurende de proef de steenzetting iets omhoog gekomen. Het hoogteverschil tussen de top en het dal van deze vervorming is circa 2 cm (amplitude is circa 1 cm). Na de proef is een maximaal hoogteverschil tussen naast elkaar gelegen zuilen gemeten van 0,9 cm. Beide typen vervormingen vallen nog ruim binnen schadecategorie a (geen schade). Zie Figuur 4.11 voor de 3D laserscans van de proeven van serie 1-gedraaid.

Gedurende de proef heeft zich wat inwasmateriaal opgehoopt in de kanalen onder lijn 1,5 en aan de halzijde van de goot tussen lijn 4 en lijn 5. In de zwaarst belaste zone van het talud was het inwasmateriaal nauwelijks uitgespoeld uit de kelken. Ook de meeste ontwaterings-gaten zaten na deze proef nog vol. De spleten rond en onder de golfklapzone waren nog vol en pas boven de golfklapzone werden ze richting de kruin geleidelijk leger. De L-vormige hoek was daar soms leeg, maar in de spleet zelf was doorgaans nog wat inwasmateriaal aanwezig.

De meeste golfklappen kwamen tijdens deze proef op het talud tussen lijn 4,5 en lijn 5,5. Een deel van de vervorming is derhalve net onder de golfklapzone opgetreden. Dat is wat lager op het talud dan tijdens de series 1, 2 en 3. Tijdens die series ontstond vervorming doordat water direct na de golfklap vlak boven de golfklaplocatie met hoge snelheid tegen de vlakke zijden van de zuilen botst en in het filter werd geperst (groene zuilen in Figuur 4.10). Vlak boven de golfklaplocatie ontstond daardoor opwaartse druk tegen de onderzijde van de steenzetting, waardoor de zuilen een kracht omhoog ondervinden.
Tijdens de onderhavige proef P01 met gedraaide zuilen zijn de zuilen echter met de vlakke zijden richting de kruin geplaatst. In dit geval botst het omlaag stromende water juist hard tegen de vlakke zijden aan in de zone net ónder de golfklaplocatie. Tijdens een golfklap schiet water immers zowel omhoog als omlaag over het talud. Tevens neemt de stroomsnelheid als gevolg van golfneerloop toe naarmate het water verder het talud afstroomt. Doordat onder de golfklapzone het water in de filterlaag wordt geperst, ontstaat daar een opwaartse druk tegen de onderzijde van de steenzetting, waardoor de zuilen een kracht omhoog ondervinden. Onder de golfklapzone wordt dit mechanisme nog versterkt door de aanwezigheid van stijghoogteverschillen.



Figuur 4.10 Belasting van de steenzetting tijdens een golfklap tijdens de proevenseries 1, 2 en 3.

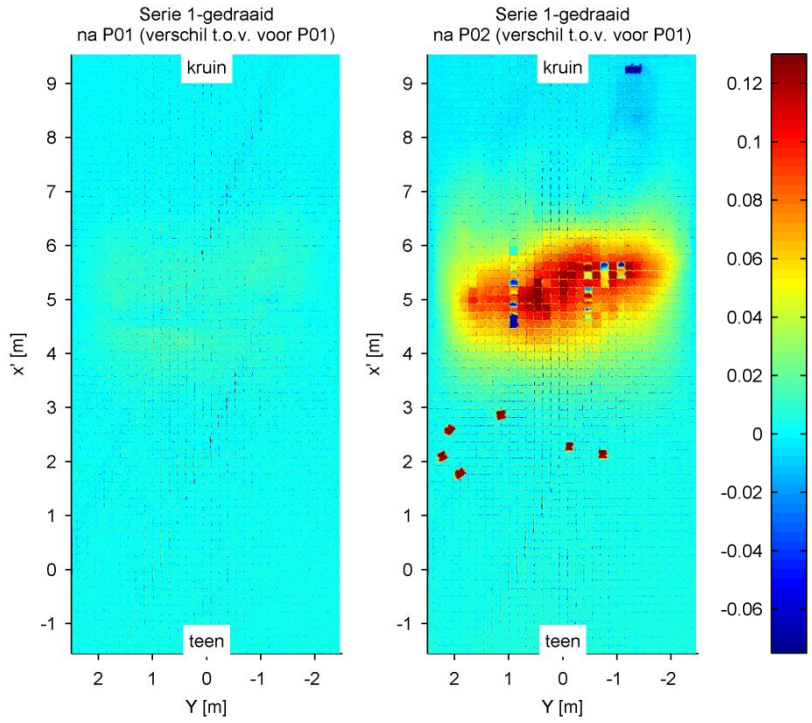
Tijdens de proef viel op dat het water tijdens de golfneerloop veel turbulenter van het talud af stroomde (zie Foto C.13.a) dan tijdens de series 1, 2 en 3. Dit wordt veroorzaakt doordat de zuilen tijdens deze proevenserie met de vlakke zijde richting de kruin zijn geplaatst. Het omlaag stromende water komt daardoor bij elke zuil een opstaand randje tegen en springt een beetje omhoog.

Na de proef maakte de steenzetting boven de golfklapzone over de hele gootbreedte een zacht knisperend geluid wanneer er overheen gelopen werd, ondanks dat de zuilen nog goed geklemd waren. Het ligt voor de hand dat de steenzetting gedurende de proef bij elke golfklap

en golfneerloop een fractie is opgelicht als gevolg van opwaartse kracht tegen de onderzijde van de steenzetting. Alhoewel op het oog nog geen migratie van filtermateriaal te zien was, ligt het voor de hand dat het filtermateriaal wel iets minder compact is komen te liggen, wat bij betreding van de steenzetting een knisperend geluid kan veroorzaken.
Na de proef is de vervorming zo vlak mogelijk getrild, het inwasmateriaal aangevuld en de testsectie aangetrild.

Proef P02 (s_{op} = 0,02, H_s = 0,85 m, N = 487 golven)
Tijdens deze proef is de steenzetting bezweken (schadecategorie d). Vanaf ongeveer 18 minuten viel op dat zich een rug vormde tussen lijn 4 en lijn 6,5. Gedurende de proef is die steeds groter geworden tot na ongeveer 35 minuten, vrijwel tegelijkertijd en verspreid over de breedte van de goot, meerdere zuilen uit het talud kwamen tussen lijn 4,5 en lijn 5,5 à 6 (Zie Figuur 4.12 en Foto C.14.a t/m Foto C.15.a). Het maximale hoogteverschil tussen de top en het dal van de rug is circa 13 cm (amplitude is circa 6,5 cm).
In de zwaarst belaste zone van het talud was het inwasmateriaal nauwelijks uitgespoeld uit de kelken, maar wel uit vrijwel alle ontwateringsgaten en spleten tussen lijn 3 en de bovenkant van de testsectie.

Tussen lijn 3 en de rug bleek de steenzetting enigszins vrij te liggen van de filterlaag. Bóven de rug bleek de steenzetting zelfs zeer vrij te liggen van het filter en grotendeels te zweven. Dit duidt op een goede klemming tussen de zuilen. Het viel op dat een deel van het filtermateriaal van boven de rug naar de rug was gemigreerd. Bovenin de testsectie was het inwasmateriaal op een aantal plekken zelfs geheel verdwenen (zie Foto C.15.b).



Figuur 4.11 3D laserscans van de testsectie na de proeven P01 en P02 (verschilmeting t.o.v. de situatie voor proef P01). De bruine stippen tussen x' = 1,5 m en x' = 3 m (proef P02) betreffen uit het talud gekomen zuilen. Het hoogteverschil is gegeven in cm (positief = verplaatsing omhoog).



Figuur 4.12 Schade na proef P02 (serie 1-gedraaid).

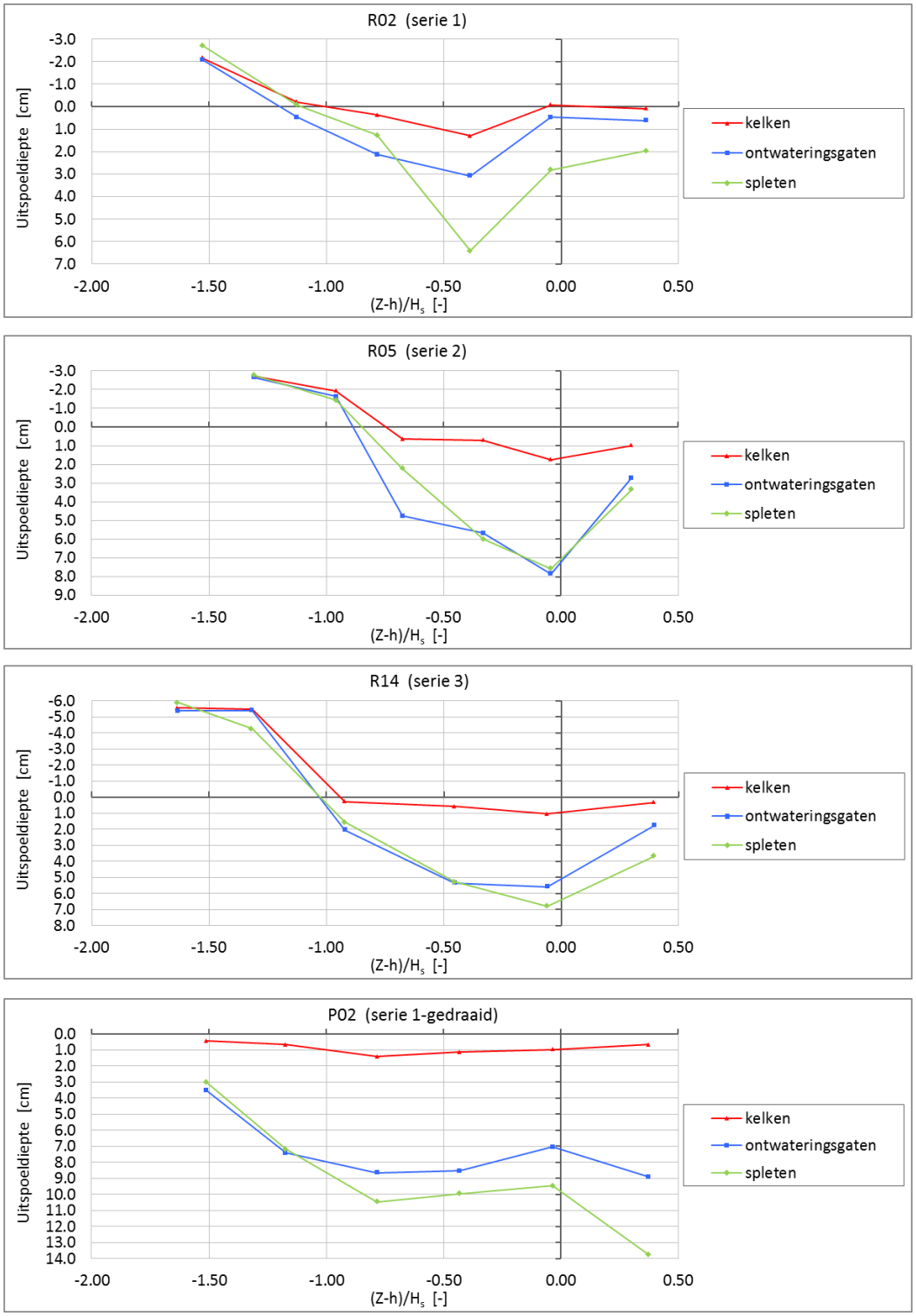
5 Analyse van de proefresultaten

5.1 Uitspoeling van het inwasmateriaal

Tijdens alle testen spoelde een deel van het inwasmateriaal weg. In hoofdstuk 4 zijn per test reeds enkele opvallende zaken met betrekking tot de uitspoeling van het inwasmateriaal beschreven. In de onderhavige paragraaf zijn de resultaten beschreven van de uitspoeldieptemetingen van het inwasmateriaal (zie ook paragraaf 3.3.3).

Na elke proef is de uitspoeling van het inwasmateriaal gemeten rondom 18 vooraf gemarkeerde RONA®Taille zuilen. Dat is gedaan door met een duimstok de afstand te meten vanaf de bovenzijde van de zuil tot 'de bodem' van de omringende gaten. Door daar achteraf de gezamenlijke hoogte van de kanalen en zuilkop (in totaal 8,9 cm) van af te trekken, blijft de uitspoeldiepte over ten opzichte van de bovenkant van de zuilvoet. Uitsluitend de zuilvoeten zijn immers ingewassen. De zuilvoeten hebben een hoogte van 6,1 cm.
In bijlage B.1 is een indicatie van de locatie van deze zuilen gemarkeerd op de plattegrond van de testsectie (zie de grijs gemarkeerde zuilen). Per serie lag de exacte locatie soms echter een rij hoger of lager op het talud. Omdat in de analyse is gebruikgemaakt van de ingemeten locaties van de zuilen, heeft dit geen invloed op de resultaten.
De zuilen bevonden zich langs 3 raaien in de lengterichting van de goot (raaien op +1,35 m, 0,00 m en -1,35 m ten opzichte van het hart van de goot). Langs elke raai zijn 6 vooraf gemarkeerde stenen ingemeten, rond de lijnen 3, 4, 5, 6, 7 en 8.
Bij het meten van de uitspoeldiepte is onderscheid gemaakt tussen de kelken, ontwateringsgaten en spleten. Per RONA®Taille zuil zijn 2 kelken, 4 ontwateringsgaten en 2 spleten ingemeten.
Per niveau op het talud is de uitspoeldiepte over de breedte van de goot doorgaans vergelijkbaar. Slechts wat lager op het talud waren soms verschillen zichtbaar doordat inwasmateriaal zich daar soms lokaal ophoopte in de kanalen. Omdat de vooraf gemarkeerde stenen representatief bleken voor de hele gootbreedte, is de uitspoeldiepte niet incidenteel gemeten rondom andere zuilen.

De meetresultaten van alle proeven zijn weergegeven in de bijlagen B.8 t/m B.11. Ter illustratie is van de laatste proef van elke serie de gemiddelde uitspoeldiepte van de kelken, ontwateringsgaten en spleten weergegeven in Figuur 5.1. De verticale as geeft de uitspoeldiepte, gedefinieerd als de afstand tussen de bovenkant van de zuilvoet en de bodem van het gat. Een positieve waarde heeft betrekking op uitspoeling van het inwasmateriaal, en een negatieve waarde op ophoping van inwasmateriaal in de kanalen. Merk op dat in de grafieken, voor een eenvoudigere interpretatie, de positieve waarden (uitspoeling) zich onder de horizontale as bevinden.
De horizontale as geeft het niveau van de ingemeten 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 de figuren eenvoudig met elkaar vergeleken worden ten aanzien van de locatie waar de meeste uitspoeling plaatsvindt.
De rode, blauwe en groene lijnen geven respectievelijk de gemiddelde uitspoeldiepte van de kelken, ontwateringsgaten en spleten. Elk meetpunt heeft betrekking op de 3 zuilen op het betreffende niveau van het talud. Elk rode en groene meetpunt geeft derhalve het gemiddelde van respectievelijk 6 kelken en 6 spleten op dat niveau, en elk blauwe meetpunt geeft het gemiddelde van 12 ontwateringsgaten. Individuele gaten zijn dus dieper of minder diep uitgespoeld.



Figuur 5.1 De gemeten uitspoeldiepte van het inwasmateriaal (in cm ten opzichte van de bovenzijde van de zuilvoet), uitgezet tegen het verticale niveau ten opzichte van de stilwaterlijn, dimensieloos gemaakt met de significante golfhoogte, voor elke laatste proef van de proevenseries 1 (R02), 2 (R05), 3 (R14) en 1-gedraaid (P02).

Zoals in paragraaf 1.2 is genoemd, zijn de kelken vooral ontworpen voor het vasthouden van het inwasmateriaal en het genereren van klemming, terwijl de ontwateringsgaten en spleten hoofdzakelijk zijn ontworpen voor het doorvoeren van water door de toplaag en niet zozeer voor het vasthouden van inwasmateriaal. Dit principe is in de proefresultaten duidelijk zichtbaar.

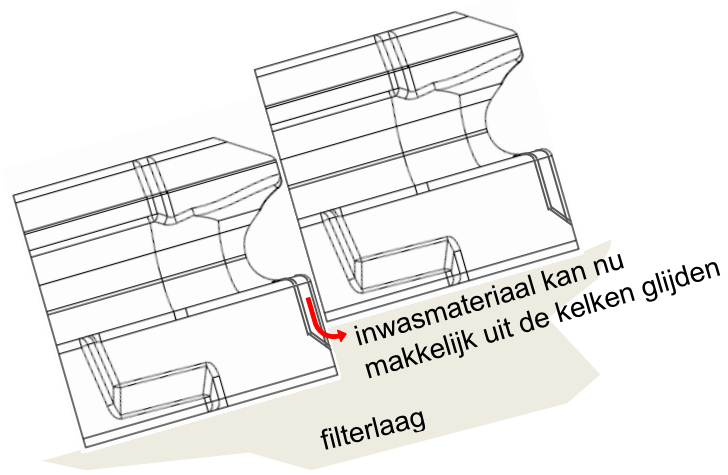
Omdat de series 1, 2 en 3 in principe betrekking hebben op een andere steenzetting dan serie 1-gedraaid, zijn de resultaten van beide typen afzonderlijk besproken.

Bij de series 1, 2 en 3 vallen de volgende aspecten op:
- In Figuur 5.1 (bovenste drie grafieken) en de bijlagen B.8 t/m B.10 is duidelijk te zien dat de uitspoeling vanuit de ontwateringsgaten en spleten veel groter is dan vanuit de kelken.
- Kelken:
  - De gemiddelde uitspoeldiepte van de kelken blijkt nauwelijks afhankelijk te zijn van de golfhoogte en blijft tijdens alle proeven beperkt tot 1 à 2 cm.
- Ontwateringsgaten en spleten:
  - De gemiddelde uitspoeldiepte van de ontwateringsgaten en spleten is naar verwachting wel afhankelijk van de golfhoogte, alhoewel dit niet duidelijk uit de metingen is af te leiden, doordat gaten in de zone met de meeste uitspoeling al tijdens de ingolfproeven bijna volledig zijn leeggespoeld.
    Aanvankelijk neemt de uitspoeldiepte nog wel enigszins toe naarmate de golfhoogte groter wordt, maar zodra de gaten en spleten tot op de filterlaag zijn uitgespoeld (reeds bij H_s = 0,70 m à 0,85 m), worden ze nauwelijks meer dieper, doordat het filtermateriaal te grof is voor uitspoeling.
  - De maximale uitspoeling treedt doorgaans op tussen de stilwaterlijn en $0{,}5 \cdot H_s$ onder de stilwaterlijn.
- Lager op het talud dan $1{,}5 \cdot H_s$ onder de stilwaterlijn is geen noemenswaardige uitspoeling van het inwasmateriaal geconstateerd.

Bij serie 1-gedraaid vallen de volgende aspecten op:
- In Figuur 5.1 (onderste grafiek) en bijlage B.11 is duidelijk te zien dat de uitspoeling vanuit de ontwateringsgaten en spleten veel groter is dan vanuit de kelken.
- Kelken:
  - De gemiddelde uitspoeldiepte van de kelken blijkt nauwelijks afhankelijk te zijn van de golfhoogte en blijft tijdens beide proeven beperkt tot 1 à 2 cm.
- Ontwateringsgaten en spleten:
  - Tijdens proef P01 (met gedraaide zuilen) spoelde enkele centimeters minder inwasmateriaal uit dan tijdens proef R01 (met niet-gedraaide zuilen), ondanks vergelijkbare golfcondities.
    Tijdens proef P02 was de uitspoeldiepte echter veel groter dan tijdens proef R02, ondanks vergelijkbare golfcondities. Dit is veroorzaakt doordat de steenzetting als gevolg van opwaartse druk enkele centimeters boven de filterlaag zweefde (zie paragraaf 4.5). De lege ruimte onder de zuilen vergroot de gemeten uitspoeldiepte aanzienlijk, doordat de ruimte tussen de steenzetting en de filterlaag wordt meegeteld bij de uitspoeldiepte als de gaten leeggespoeld zijn.
  - Het inwasmateriaal is uitgespoeld over een grotere lengte van het talud dan tijdens serie 1, met niet-gedraaide zuilen.

Uit de metingen blijkt dat het inwasmateriaal in de ontwateringsgaten en spleten snel uitspoelt, maar dat het inwasmateriaal in de kelken goed blijft zitten, mits de steenzetting niet

teveel vervormt. Tijdens het onderzoek is echter geconstateerd dat, wanneer het hoogteverschil tussen naast elkaar gelegen zuilen groter wordt dan circa 2,5 à 3 cm, het inwasmateriaal dan makkelijk vanuit de kelken kan wegglijden naar de filterlaag, zie Figuur 5.2. Het ligt voordehand dat de klemming in de steenzetting dan snel afneemt.



Figuur 5.2 Het inwasmateriaal van de kelken kan makkelijk wegglijden naar het filter als het hoogteverschil tussen naast elkaar gelegen zuilen groter is dan circa 2,5 à 3 cm.

5.2 Stabiliteit van de steenzetting

Voor het bepalen van de stabiliteitsfactor is uitsluitend gebruikgemaakt van de resultaten van de proevenseries 1, 2 en 3. De resultaten van serie 1-gedraaid zijn daarom niet beschouwd in de paragrafen 5.2 en 5.3.

De steenzetting is tijdens de series 1, 2 en 3 driemaal bezweken, namelijk:

- Aan het einde van serie 1 (s_{op} = 0,02), bij H_s = 0,84 m
- Aan het einde van serie 2 (s_{op} = 0,04), bij H_s = 0,99 m
- Aan het einde van serie 3 (s_{op} = 0,04 met een langdurige belasting), bij H_s = 0,74 m na 9390 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. 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.
Omdat de proeven R12, R13 en R14 samen één langeduurproef vormen, is de hydraulische belasting van de afzonderlijke proefdelen bij elkaar opgeteld met de formules (3.4) t/m (3.6). De totale hydraulische belasting van serie 3 is weergegeven in de onderste rij van de tabel.
Het hoogteverschil, dat is gegeven in de meest rechter kolom betreft het maximale hoogteverschil tussen naast elkaar gelegen zuilen, dat na de proeven is gemeten. Dit hoogteverschil was steeds maatgevend ten opzichte van de amplitude van de vervorming van de steenzetting.

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 [-]	$H_s/(\Delta D)$ [-]	scha-de	hoogte-verschil [cm]
1	R01	4,55	0,71	4,73	4,32	0,020	0,024	2,34	2,14	478	3,73	a	1,5
	R02	4,70	0,84	5,05	4,80	0,021	0,023	2,29	2,18	224	4,43	d	zuil eruit
2	R03	4,55	0,70	4,73	4,31	0,020	0,024	2,36	2,15	473	3,72	a	0,9
	R04	4,70	0,84	3,65	3,47	0,041	0,045	1,65	1,57	994	4,50	b	2,9
	R05	4,70	0,99	3,97	3,77	0,040	0,045	1,66	1,58	934	5,28	d	zuil eruit
3	R12	4,70	0,73	3,46	3,23	0,039	0,045	1,68	1,57	2428	3,90	a	1,3
	R13	4,70	0,75	3,47	3,28	0,040	0,044	1,67	1,58	4780	3,98	b	3,0
	R14	4,70	0,73	3,44	3,26	0,039	0,044	1,68	1,59	2182	3,88	d	zuil eruit
	R12-R14	4,70	0,74	3,46	3,26	0,040	0,044	1,68	1,58	9390	3,94	d	zuil eruit

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

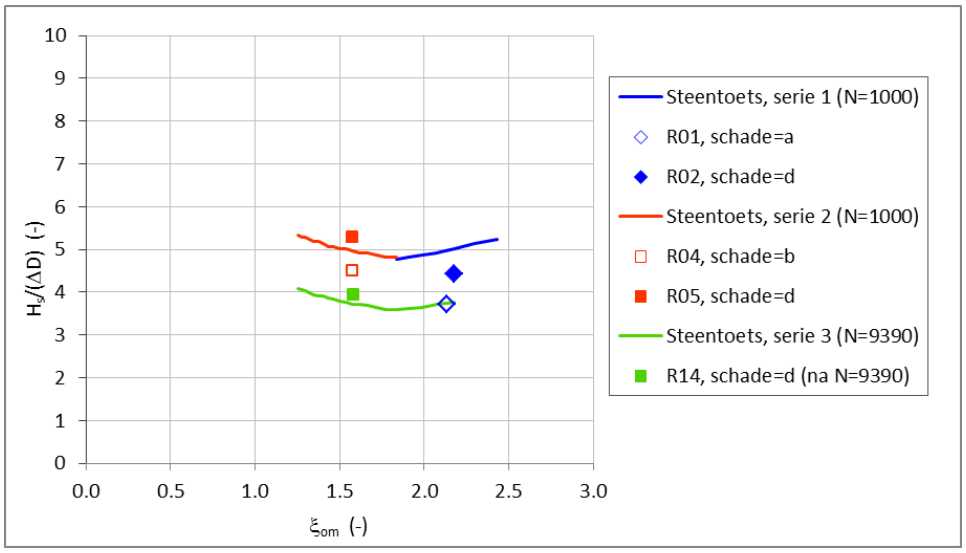
Voor elke proevenserie is met Steentoets berekend bij welke significante golfhoogte de steenzetting volgens Steentoets2014, versie v14.1.2.1 (Klein Breteler, 2014), zal bezwijken, zie Tabel 5.2. In de tabel is ook de bijbehorende belastingparameter $H_s/(\Delta D)$ gegeven.
Bij de berekening met Steentoets 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	0,023	1000	0,95	2,18	5,02
2	0,045	1000	0,93	1,58	4,97
3	0,044	9390	0,70	1,58	3,72

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 schade) is opgetreden en de proef met de laagste significante golfhoogte waarbij schadecategorie c of d (wel schade) is opgetreden. De meetpunten met de open symbolen hebben betrekking op de proeven met schadecategorie a of b, en de dichte symbolen op schadecategorie c of d.
De lijnen geven de resultaten van de Steentoetsberekeningen. De meetpunten en lijnen met dezelfde kleur horen bij elkaar. Voor de berekeningen is uitgegaan van de maten en

eigenschappen zoals gemeten in de Deltagoot. Er is gerekend met de gemeten soortelijke massa van het beton ($\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$) en de totale hoogte van de RONA®Taille zuilen.



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

In de figuur is te zien dat bij serie 1 de meetpunten van zowel schadecategorie a (geen schade) als d (schade) onder de blauwe lijn liggen, die met Steentoets is berekend.
Bij serie 2 ligt de met Steentoets berekende rode lijn ongeveer midden tussen de meetpunten met schadecategorie b (geen schade) en d (schade) in. Het resultaat van serie 2 komt daarmee overeen met het resultaat dat op basis van Steentoets werd verwacht als gerekend wordt met de totale hoogte van de zuilen en de soortelijke massa van het beton.
Tijdens serie 3 ontstond schade na 9390 golven. Dat is korte tijd later dan op basis van Steentoets te verwacht was. Het meetpunt ligt immers iets boven de groene lijn.

5.3 Stabiliteitsfactor

De stabiliteitsfactor voor RONA®Taille is berekend op basis van de proevenseries 1, 2 en 3. Met deze stabiliteitsfactor zal in de toekomst het resultaat van Steentoetsberekeningen 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 veiligheidsfactor), 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 met Rijkswaterstaat afgesproken procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor op basis van de Deltagootproeven is gedetailleerd beschreven in bijlage E. In de onderhavige paragraaf is dit uitgewerkt voor RONA®Taille.

De eerste stap bij het bepalen van de stabiliteitsfactor is het per serie vaststellen van de belasting waarbij de steenzetting is bezweken. Bij serie 1 en 2 (korteduurproeven met een vergelijkbaar aantal golven) is de significante golfhoogte bij bezwijken van belang: de

bezwijkgolfhoogte $H_{s,bezwijk}$. Wanneer tijdens een korteduurproevenserie schade ontstaat, is conform de procedure uit bijlage E 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).
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.

- *Serie 1*:
  Tijdens serie 1 was nog geen schade opgetreden tijdens proef R01 (H_s = 0,71 m), maar wel tijdens R02 (H_s = 0,84 m). Dat resulteert in een bezwijkgolfhoogte $H_{s,bezwijk}$ = 0,78 m.
- *Serie 2*:
  Tijdens serie 2 was nog geen schade opgetreden tijdens proef R04 (H_s = 0,84 m), maar wel tijdens R05 (H_s = 0,99 m). Dat resulteert in een bezwijkgolfhoogte $H_{s,bezwijk}$ = 0,92 m.
- *Serie 3*:
  Voor de langeduurproef (proeven R12-R14) geldt, naast de significante golfhoogte en golfperiode van de proef, ook het aantal golven (N) tot bezwijken als het resultaat van de proef: $H_{s,bezwijk}$ = 0,73 m, T_p = 3,46 s en N = 9390 golven.

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 E 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, en rekening houdend met de gewichtsreductie door de kanalen; met stabiliteitsfactor = 1), bij de bezwijkgolfhoogte van de betreffende serie (m)

$D_{Steentoets}$ = de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets (als gerekend wordt met klemming, en zónder gereduceerde soortelijke massa, 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 $H_{s,bezwijk}$ en met stabiliteitsfactor = 1) de toplaagdikte berekend die volgens Steentoets bij de geconstateerde bezwijkgolfhoogte nog net voldoende is. Voor het berekenen van $D_{Steentoets}$ is gerekend mét klemming en met de gemeten soortelijke massa van het beton. Voor het berekenen van $D_{ST\ eigen\ gewicht}$ is gerekend zónder klemming en met een gereduceerde soortelijke massa, ter compensatie van het volume van de kanalen en andere lege ruimtes binnen de buitenomtrek van de zuilen. Daardoor wordt als het ware gerekend met een wat lichtere zuil zonder kanalen, maar met dezelfde hoogte en het zelfde grondvlak.

Voor deze berekeningen is het werkelijke volume van de zuilen (V) nodig en het volume van een massieve zuil (zonder kanalen) met hetzelfde grondvlak en dezelfde hoogte als de RONA®Taille zuilen ($V_{massief}$). Er is daarbij gebruikgemaakt van het volume van de zuilen zoals dat gemeten is tijdens het bepalen van de soortelijke massa van het beton. Uit die metingen is gebleken dat het werkelijke volume van de zuilen van serie 1 gelijk is aan V = 2,581 liter.
Het volume $V_{massief}$ van een massieve zuil met hetzelfde grondvlak en dezelfde hoogte is als volgt berekend:

$$V_{massief} = L \cdot B \cdot D \cdot (1 - \Omega) = 0{,}15 \cdot 0{,}15 \cdot 0{,}15 \cdot (1 - 0{,}079) = 3{,}108 \text{ liter} \quad (5.1)$$

Met:

$V_{massief}$ = het volume van een massieve zuil (zonder kanalen) met hetzelfde grondvlak en dezelfde hoogte als de RONA®Taille zuilen (liter)
D = hoogte van de zuil (m)
B = breedte van de zuil (m)
L = lengte van de zuil (m)
Ω = relatief open oppervlak (bij het grondvlak) (-)

De verhouding tussen de RONA®Taille zuilen enerzijds en een massieve zuil met hetzelfde grondvlak en dezelfde hoogte als de RONA®Taille zuilen anderzijds is voor serie 1: $V/V_{massief}$ = 2,581/3,108 = 0,830.
Een massieve zuil met hetzelfde grondvlak en dezelfde hoogte als de RONA®Taille zuilen van serie 1, maar met fictieve soortelijke massa $\rho_{s,fict}$ = (2265–1000)·0,83+1000 = 2050 kg/m^3 geeft onder water dezelfde kracht op de ondergrond als een RONA®Taille zuil. Dit is in de Steentoets-berekeningen gebruikt voor het bepalen van de stabiliteit met alleen het eigen gewicht van de blokken (zonder klemming etc.: $D_{ST\ eigen\ gewicht}$). Voor zuilen van de 2e levering (series 2 en 3) is op dezelfde wijze berekend dat $\rho_{s,fict}$ = 2039 kg/m^3.

De Steentoetsberekening zijn uitgevoerd met de waarden zoals gemeten in het model, dus op schaal. Er is per serie gerekend met 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 totale 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 (5.2).

$$f_{stab} = \left(\frac{D_{Steentoets}}{D_{in\ modelproeven}} - \frac{D_{Steentoets}}{D_{ST\ eigen\ gewicht}} \right) / \gamma + \frac{D_{Steentoets}}{D_{ST\ eigen\ gewicht}} \quad (5.2)$$

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: $\gamma = 1{,}1 + 1{,}89 \cdot \sigma$ (5.3)

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.	0,776	4,09	0,150	0,128	0,219
Serie 2	n.v.t.	0,917	4,90	0,151	0,149	0,212
Serie 3	9390	0,737	3,94	0,151	0,159	0,238

Tabel 5.3 Geschatte $H_s/(\Delta D)$ bij begin van bezwijken conform de procedure uit bijlage E, de beproefde toplaagdikte en de resultaten van berekeningen met Steentoets.

Proevenserie	$D_{Steentoets}/D_{in\ modelproeven}$ [-]			$D_{Steentoets}/D_{ST\ eigen\ gewicht}$ [-]	f_{stab} [-]
Serie 1	0,853			0,584	0,79
Serie 2	0,987			0,703	0,92
Serie 3	1,053			0,668	0,97
	μ	σ	γ		μ
Serie 1 t/m 3	0,96	0,10	1,29		**0,89**

Tabel 5.4 Berekende stabiliteitsfactor, veiligheidsfactor en enkele tussenresultaten.

Conform de met Rijkswaterstaat afgesproken procedure (zie bijlage E) resulteren de Deltagootproeven in de volgende stabiliteitsfactor voor RONA®Taille: f_{stab} = 0,89.

Hoewel de proeven zijn uitgevoerd met RONA®Taille van 30 cm hoog (op schaal 1:2, dus 15 cm hoog in de Deltagoot) is de afgeleide stabiliteitsfactor toepasbaar in een brede range van zuilhoogtes, namelijk van 15 cm tot 60 cm hoog. Daarbij geldt als voorwaarde dat de vorm van de zetstenen niet wezenlijk mag worden aangepast bij het wijzigen van de zuilhoogte. Het toepassingsgebied strekt zich daardoor, afhankelijk van de omstandigheden, uit tot een significante golfhoogte van maximaal ca. 4,5 m.

6 Conclusies

Om de stabiliteit van RONA®Taille onder golfaanval te onderzoeken is een dijk met een hoogte van 8,3 m en een buitentalud met een helling van 1:3 opgebouwd in de Deltagoot (in de Noordoostpolder) van Deltares. Deze dijk is tussen Z = +2,0 m en +Z = 5,5 m boven de gootbodem voorzien van een RONA®Taille bekleding met de eigenschappen zoals weergegeven in Tabel 6.1 (maten in modelschaal).
Tevens zijn enkele proeven uitgevoerd voor het bepalen van de golfoploopreducerende werking van deze steenzetting. Deze golfoploopproeven zijn niet in het onderhavige rapport beschreven en geanalyseerd, maar in Van Steeg (2015). Met oog op de golfoploopproeven is ook tussen Z = +5,5 m en +Z = 8,3 m, te midden van een dummy talud van beton, een circa 1,5 m brede strook met RONA®Taille zuilen aangebracht.

Eigenschap	**Serie 1**	**Serie 2**	**Serie 3**	**Serie 1-gedraaid**
Algemeen				
- taludhelling (tanα) [-]	1:3			
RONA®Taille				
- levering	1e levering	2e levering		
- zuilhoogte (D) [cm]	15,0	15,1		
- soortelijke massa (ρ_s) [kg/m^3]	2265	2239		
- open oppervlak (Ω) [%]	7,9	7,9		
Filterlaag				
- filterlaagdikte (b) [cm]	7,3	7,0	7,0	7,1
- karakteristieke korrelgroottes [mm]	D_{f15} = 10,7 D_{f50} = 19,8 D_{f90} = 33,7	D_{f15} = 11,6 D_{f50} = 20,4 D_{f90} = 34,7	D_{f15} = 10,6 D_{f50} = 18,9 D_{f90} = 32,9	D_{f15} = 11,7 D_{f50} = 20,0 D_{f90} = 41,5
Inwasmateriaal				
- karakteristieke korrelgroottes [mm]	D_{i15} = 8,6 D_{i50} = 11,1 D_{i90} = 15,4			

Tabel 6.1 Overzicht van de belangrijkste eigenschappen van de testsectie (tussen Z = +2,0 m en + 5,5 m).

De steenzetting is achtereenvolgens beproefd met de volgende vijf proevenseries:

- *Series 1 en 2*: de eerste twee series (series 1 en 2) bestonden uit korteduurproeven. Een korteduurproef duurt circa 1000 golven, of korter indien schade optreedt. Per serie met korteduurproeven is de brekerparameter gelijk gehouden. De proeven van serie 1 zijn uitgevoerd met relatief lange golven (golfsteilheid van 2%). De proeven van serie 2 zijn uitgevoerd met relatief korte golven (golfsteilheid van 4%). Binnen deze series is bij elke volgende proef de golfhoogte steeds een stukje vergroot totdat schade optrad.
- *Serie 1-gedraaid*: omdat tijdens serie 1 en 2 relatief snel schade ontstond, is besloten serie 1 te herhalen, maar nu met 180 graden gedraaide zuiltjes (om de denkbeeldige as loodrecht op het talud) in de testsectie. Deze serie is in dit rapport aangeduid als “serie 1-gedraaid”. Omdat opnieuw relatief snel schade ontstond, en omdat gedraaide zuiltjes de golfoploop naar verwachting minder goed reduceren dan niet-gedraaide zuiltjes, zijn de zuiltjes na deze serie weer teruggedraaid in hun oude positie. De resultaten van deze proevenserie zijn uiteindelijk niet gebruikt voor het bepalen van de stabiliteits-factor.

- *Golfoploopproeven*: vervolgens is een serie golfoploopproeven uitgevoerd. Het doel van deze proeven is het bepalen van de golfoploopreductiecoëfficiënt.
- *Serie 3*: de laatste serie (serie 3) bestond uit een langeduurproef, met gelijkblijvende golfcondities. Deze serie is voortgezet totdat schade ontstond. Deze serie geeft inzicht in de langeduursterkte van de bekleding. De langeduurproef van de serie 3 is uitgevoerd met golfcondities die tijdens serie 2 (met dezelfde golfsteilheid) nog net geen schade hadden opgeleverd.

Voor het bepalen van de stabiliteitsfactor is uitsluitend gebruikgemaakt van de proevenseries 1, 2 en 3. De resultaten van die series zijn samengevat in Tabel 5.1 en Figuur 5.3 (in paragraaf 5.2).

Conform de met Rijkswaterstaat afgesproken procedure (zie bijlage E) resulteren de Deltagootproeven in de volgende stabiliteitsfactor voor RONA®Taille: f_{stab} = 0,89. Deze factor is opgenomen in Steentoets2015.

Hoewel de proeven zijn uitgevoerd met RONA®Taille van 30 cm hoog (op schaal 1:2, dus 15 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

Van Steeg, P. (2015), Analyse g*olfoploopreductie RONA®Taille steenzetting, Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken*, Deltares, rapport 1208618-019-HYE-0003, versie 4.0, november 2015

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	hoogteverschil tussen zuilen [cm]
1	R01 (ingolven)	4.55	0.71	4.73	4.32	0.020	0.024	2.34	2.14	478	0.50	3.73	a	1.4
	R02	4.70	0.84	5.05	4.80	0.021	0.023	2.29	2.18	224	0.27	4.43	d	zuil eruit
2	R03 (ingolven)	4.55	0.70	4.73	4.31	0.020	0.024	2.36	2.15	473	0.50	3.72	a	0.9
	R04	4.70	0.84	3.65	3.47	0.041	0.045	1.65	1.57	994	0.88	4.50	b	2.9
	R05	4.70	0.99	3.97	3.77	0.040	0.045	1.66	1.58	934	0.91	5.28	d	zuil eruit
3	R12	4.70	0.73	3.46	3.23	0.039	0.045	1.68	1.57	2428	2.00	3.90	a	1.3
	R13	4.70	0.75	3.47	3.28	0.040	0.044	1.67	1.58	4780	4.00	3.98	b	3.0
	R14	4.70	0.73	3.44	3.26	0.039	0.044	1.68	1.59	2182	1.83	3.88	d	zuil eruit
	totaal R12-R14	*4.70*	*0.74*	*3.46*	*3.26*	*0.040*	*0.044*	*1.68*	*1.58*	*9390*	*7.83*	*3.94*	*d*	*zuil eruit*

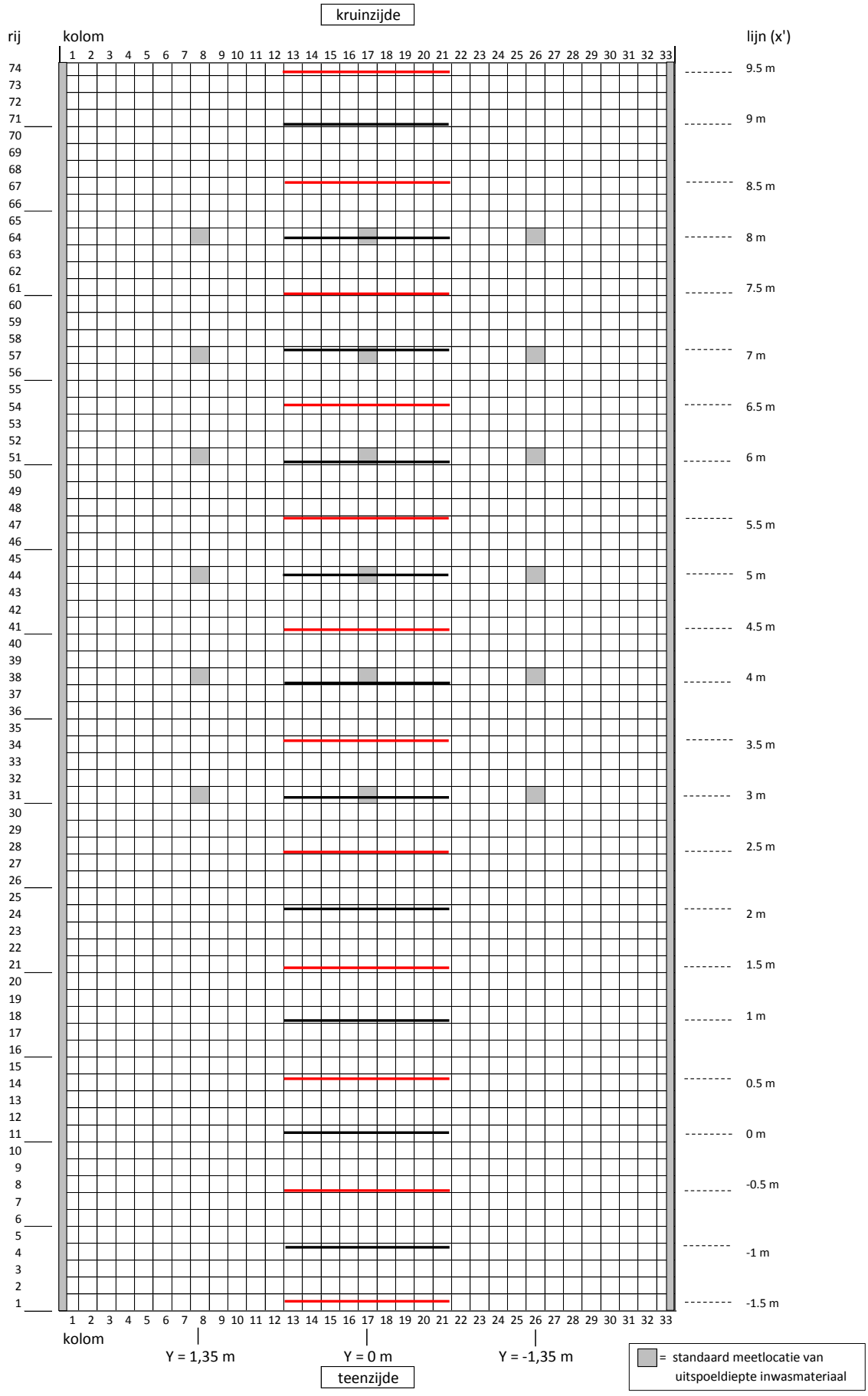
Serie	Proef	h [m]	H_s [m]	T_p [s]	$T_{m-1,0}$ [s]	s_{op} [-]	s_{om} [-]	ξ_{op} [-]	ξ_{om} [-]	N [-]	duur [h]	$H_s/(\Delta D)$ [-]	Schade-categorie	hoogteverschil tussen zuilen [cm]
1-gedraaid	P01 (ingolven)	4.55	0.70	4.74	4.31	0.020	0.024	2.37	2.15	473	0.50	3.71	a	0.8
	P02	4.70	0.85	5.28	4.81	0.019	0.023	2.39	2.18	487	0.58	4.52	d	zuil eruit

Bijlage A.1, Proevenprogramma met de gerealiseerde golfcondities

taluddeel	lijn	Gemeten niveau van de lijnen op het talud Z [m boven gootbodem]			
		Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 1-gedraaid
testsectie	-1.5	2.007	2.007	2.014	2.014
	-1	2.170	2.170	2.169	2.169
	-0.5	2.325	2.325	2.315	2.315
	0	2.470	2.470	2.486	2.486
	0.5	2.612	2.612	2.619	2.619
	1	2.781	2.781	2.773	2.773
	1.5	2.928	2.933	2.948	2.948
	2	3.088	3.089	3.090	3.090
	2.5	3.251	3.250	3.245	3.245
	3	3.402	3.400	3.419	3.419
	3.5	3.561	3.561	3.560	3.559
	4	3.719	3.730	3.736	3.722
	4.5	3.880	3.880	3.880	3.866
	5	4.039	4.038	4.040	4.040
	5.5	4.194	4.197	4.194	4.197
	6	4.357	4.354	4.361	4.350
	6.5	4.515	4.516	4.523	4.528
	7	4.673	4.670	4.676	4.677
	7.5	4.834	4.828	4.831	4.829
	8	4.994	4.996	4.994	5.016
	8.5	5.161	5.165	5.163	5.169
	9	5.320	5.337	5.337	5.324
	9.5	5.488	5.487	5.486	5.474
golfoploop-strook	10	5.649			
	10.5	5.806			
	11	5.963			
	11.5	6.112			
	12	6.279			
	12.5	6.432			
	13	6.599			
	13.5	6.755			
	14	6.912			
	14.5	7.077			
	15	7.226			
	15.5	7.379			
	16	7.541			
	16.5	7.691			
	17	7.859			
	17.5	8.024			
	18	8.175			
	Kruin	8.293			

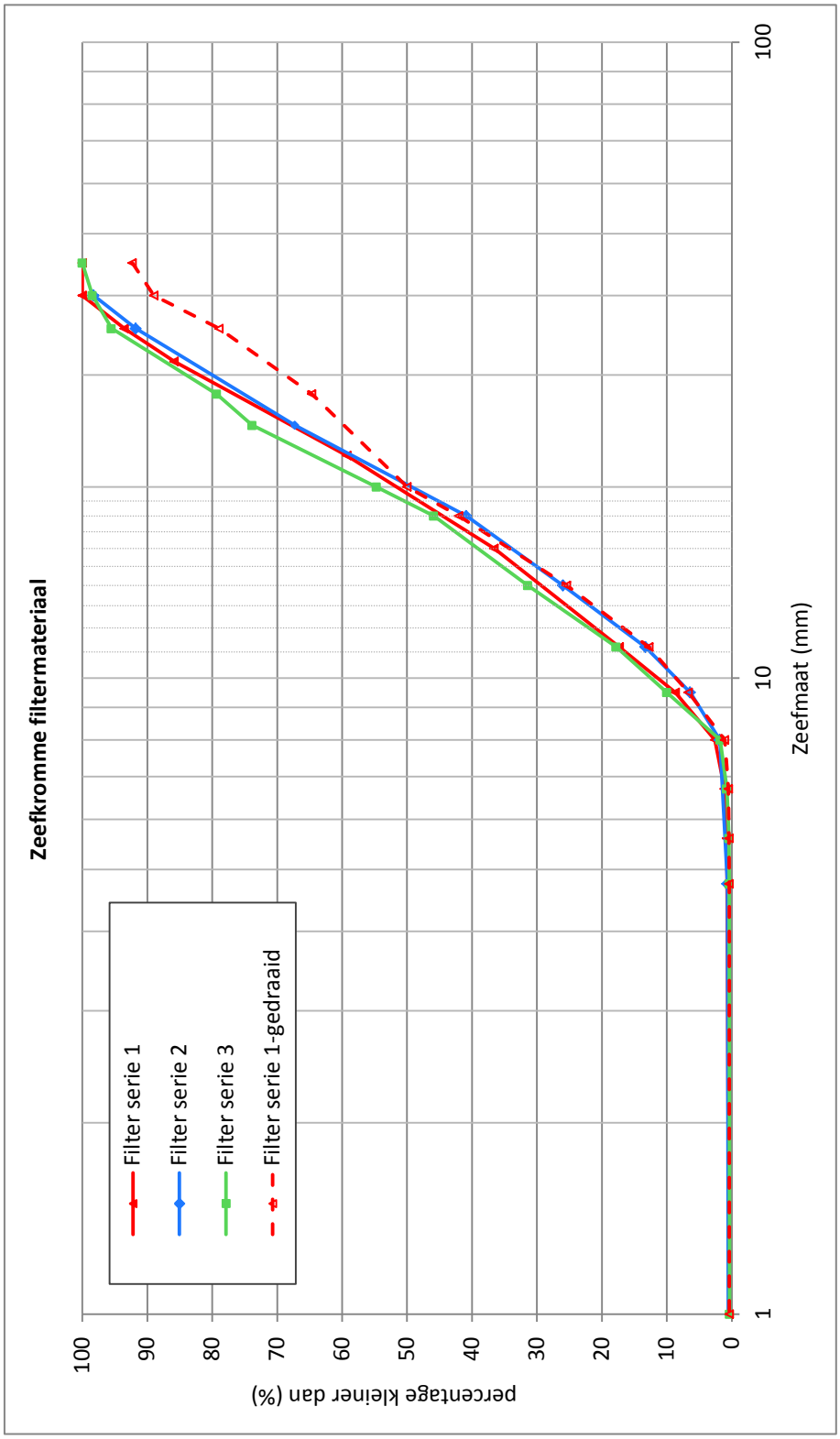
Bijlage A.2, Gemeten niveau's van de lijnen op het talud

B Figuren



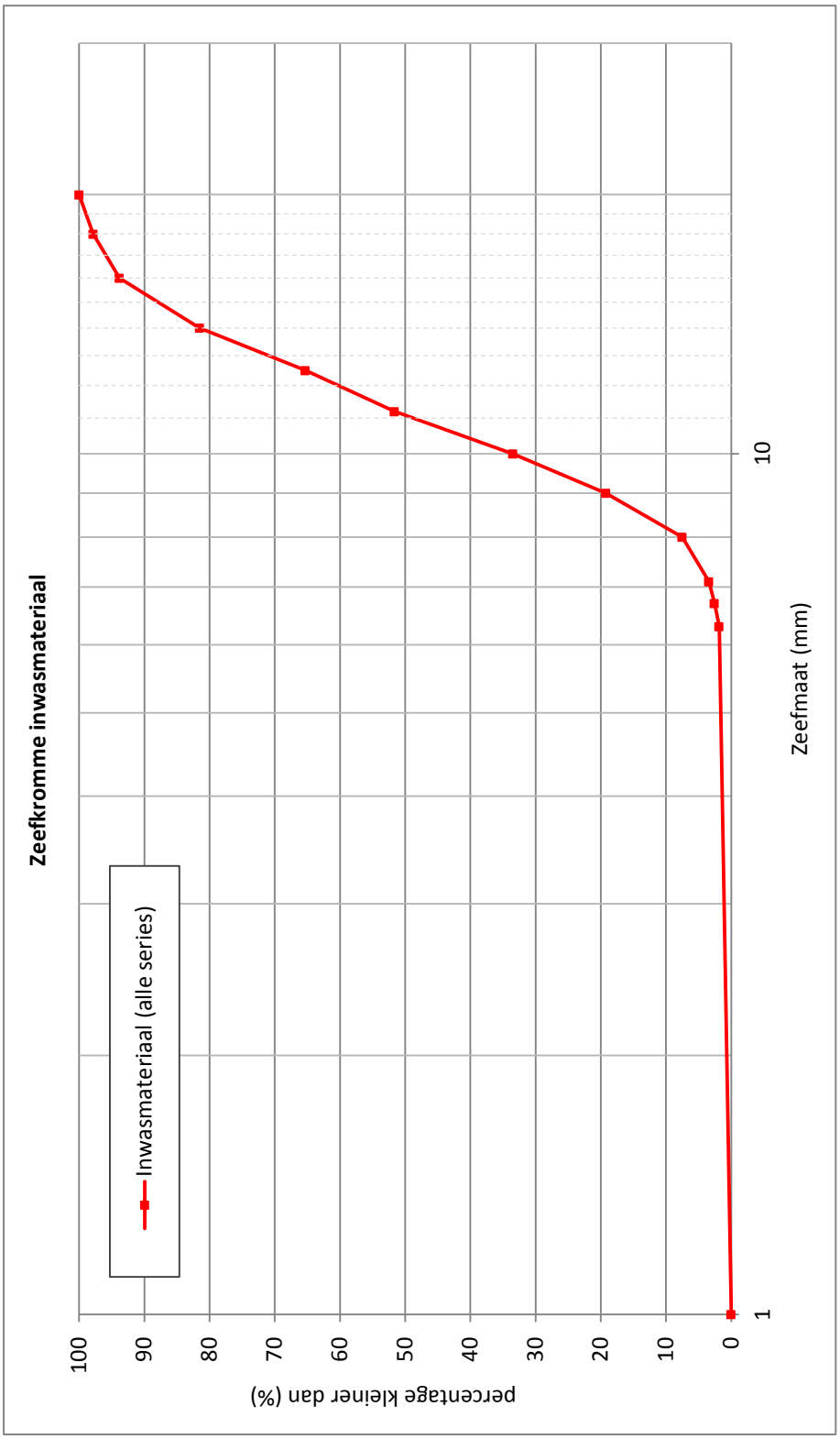
Plaatsingspatroon RONA®Taille, locatie lijnmarkering en meetlocaties van de uitspoeldiepte van het inwasmateriaal (schematisch)

Deltares	1208618.017	Fig. B.1



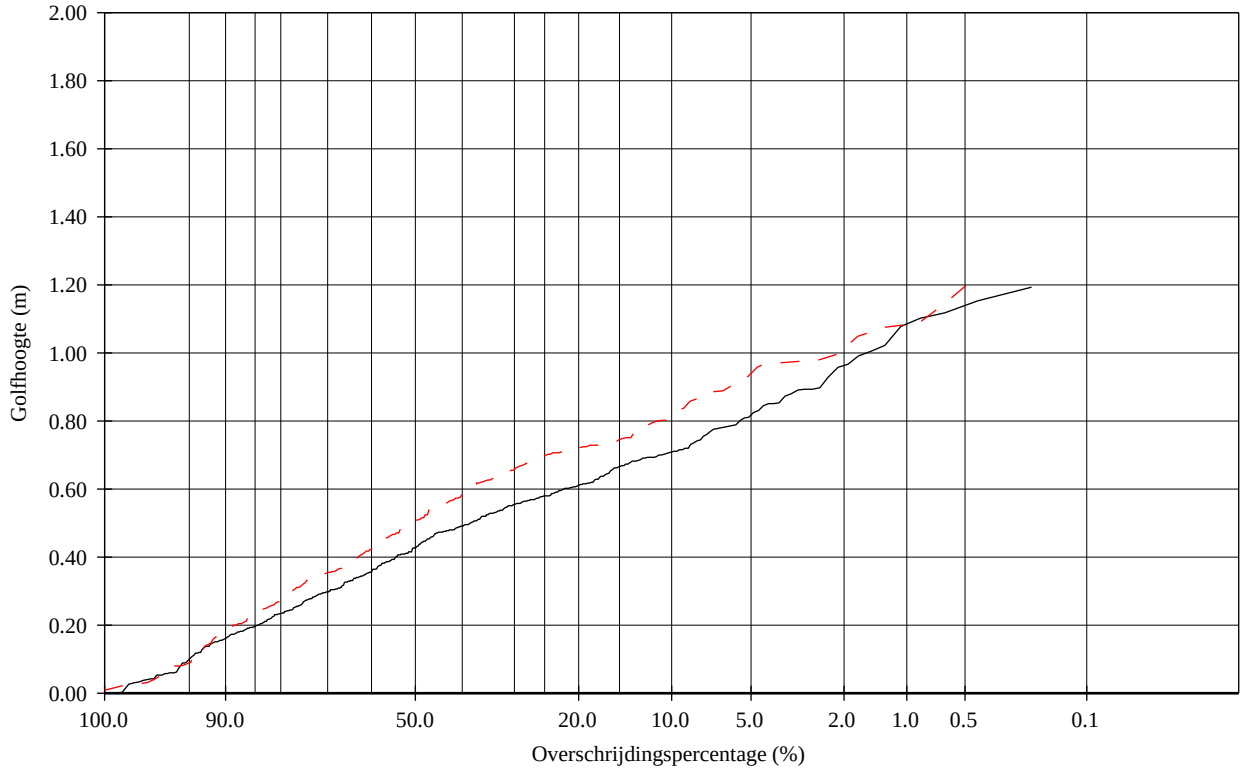
Zeefkrommes van het filtermateriaal

Deltares	1208618.017	Fig. B.2



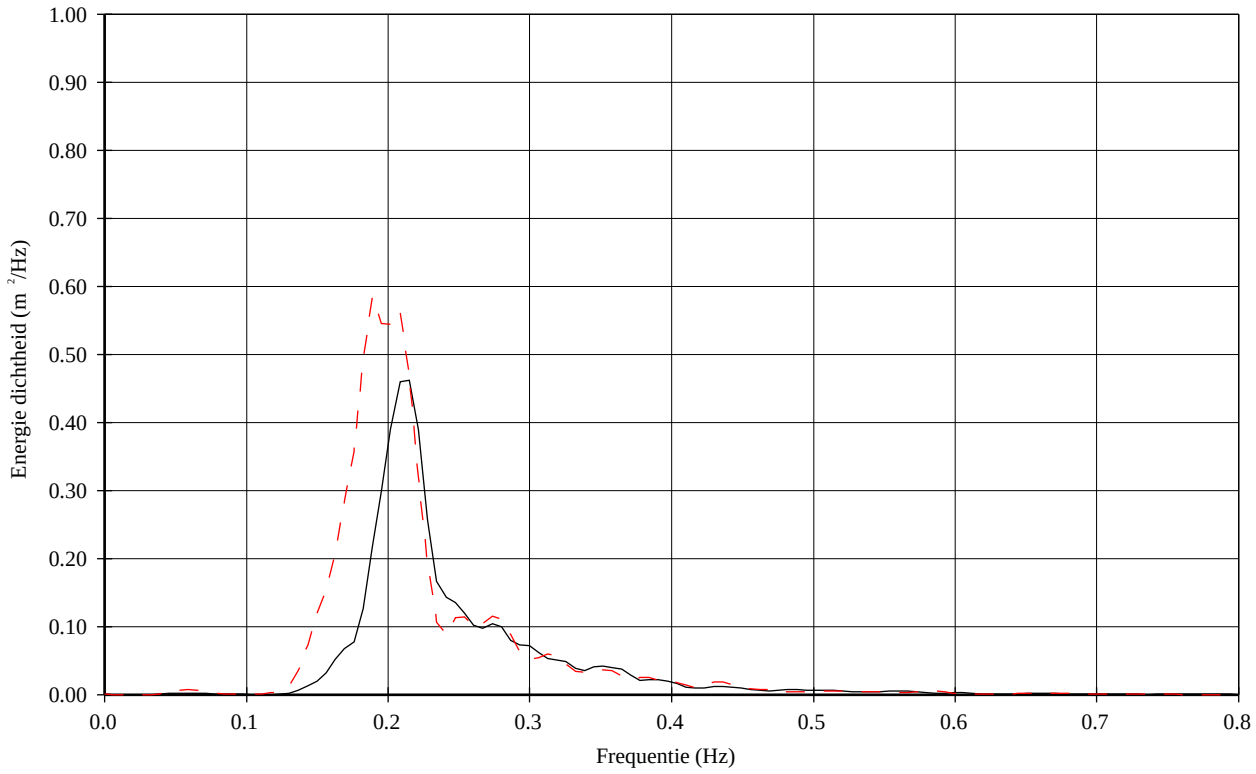
Zeefkromme van het inwasmateriaal

Deltares	1208618.017	Fig. B.3

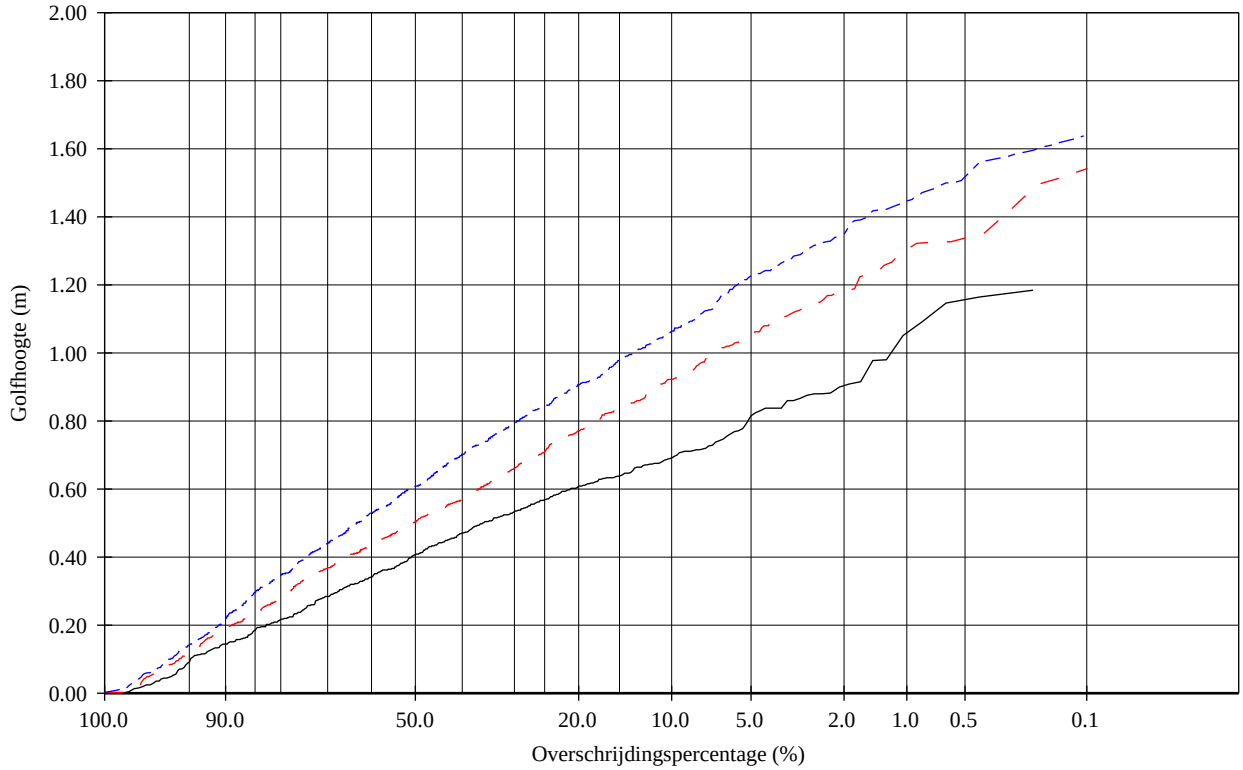


Serie 1, R01 (Hm0 = 0.71 m) (Tp = 4.73 s) (h = 4.55 m)

Serie 1, R02 (Hm0 = 0.84 m) (Tp = 5.05 s) (h = 4.70 m)



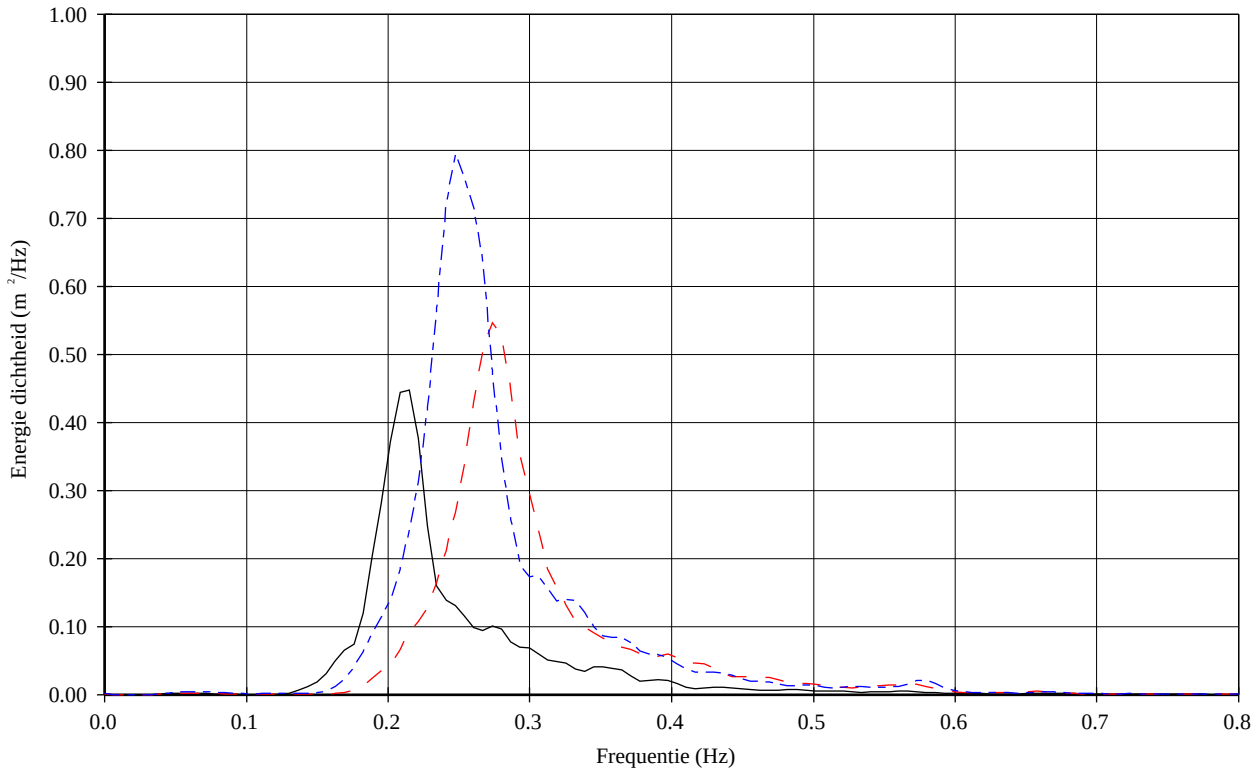
Golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra Serie 1 (proeven R01, R02)		
	Inkomende golven	
Deltares	1208618.017	Fig. B.4



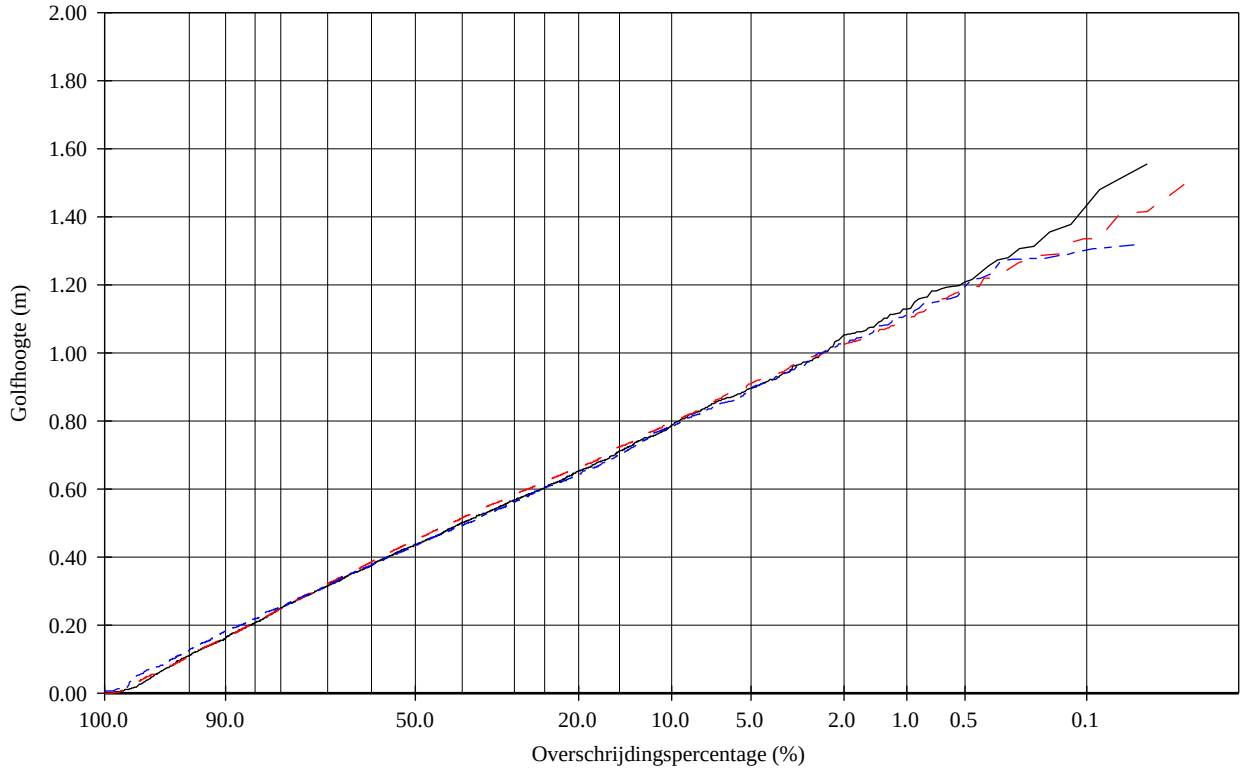
Serie 2, R03 (Hm0 = 0.70 m) (Tp = 4.73 s) (h = 4.55 m)

Serie 2, R04 (Hm0 = 0.84 m) (Tp = 3.65 s) (h = 4.70 m)

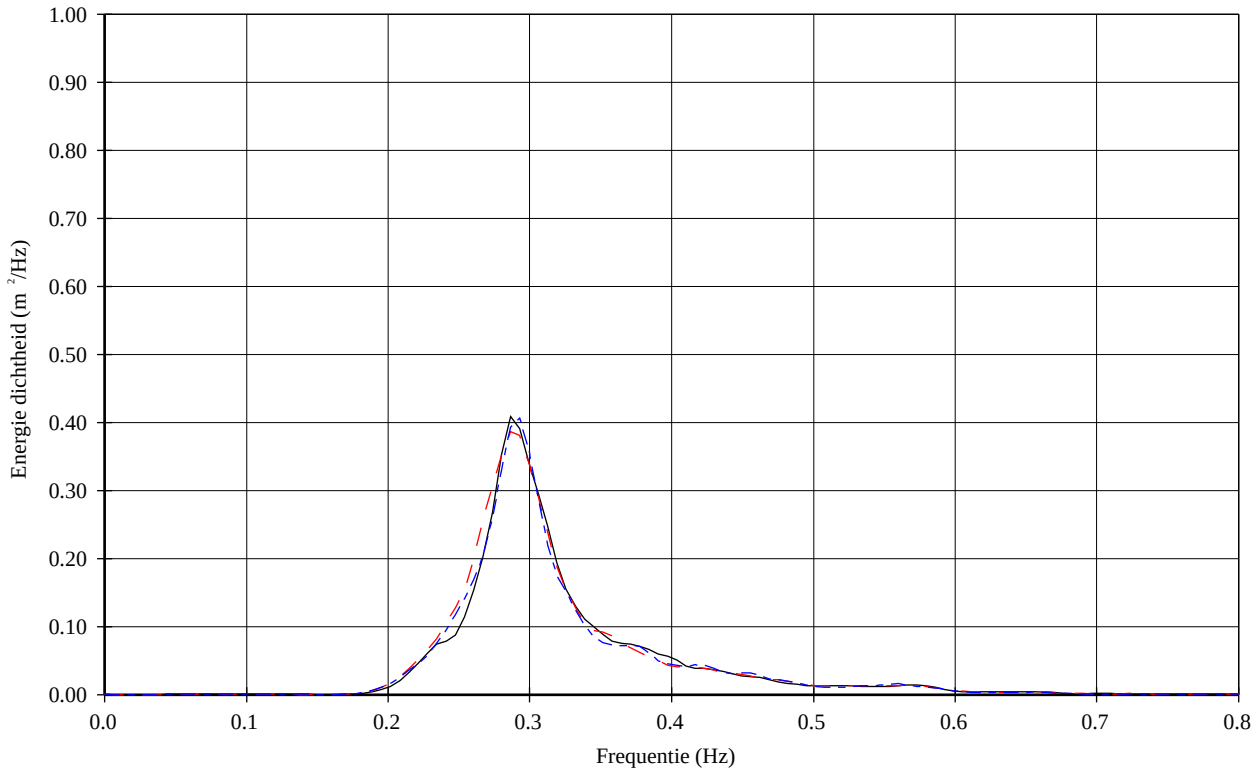
Serie 2, R05 (Hm0 = 0.99 m) (Tp = 3.97 s) (h = 4.70 m)



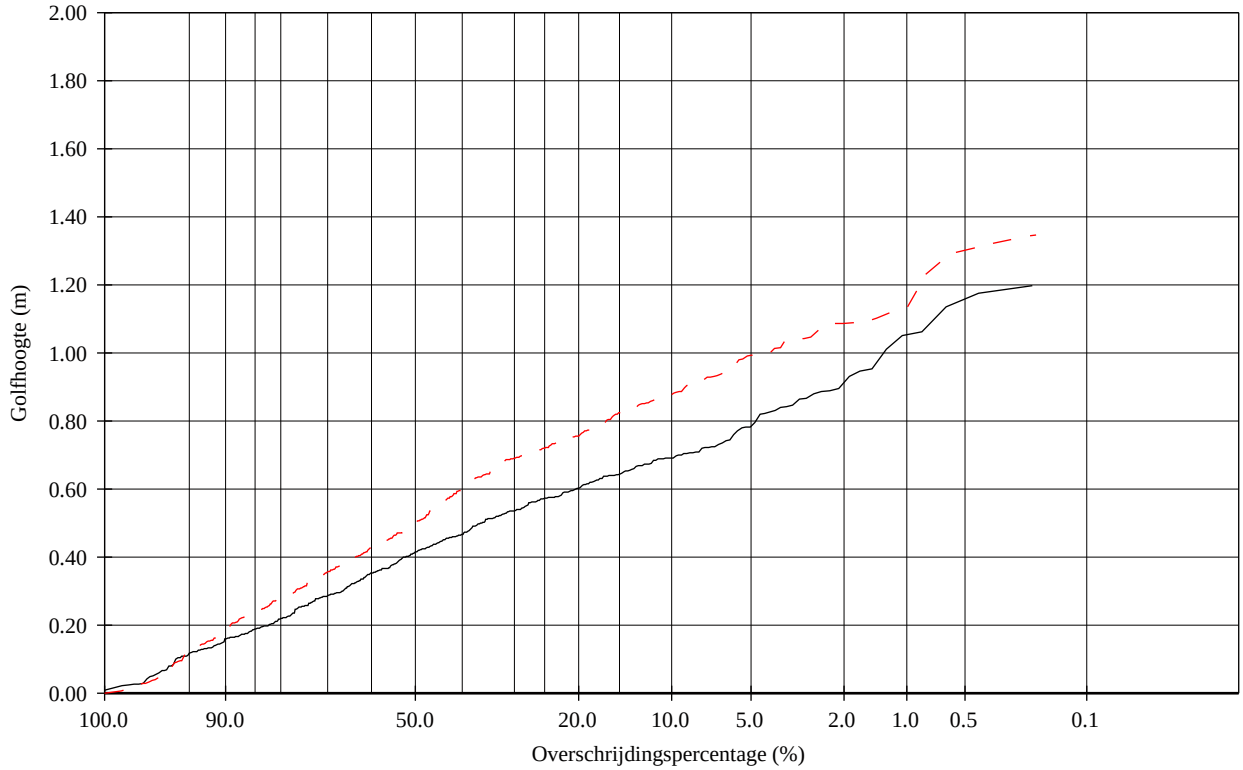
Golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra Serie 2 (proeven R03, R04, R05)		
	Inkomende golven	
Deltares	1208618.017	Fig. B.5



Serie 3, R12 (Hm0 = 0.73 m) (Tp = 3.46 s) (h = 4.70 m)
Serie 3, R13 (Hm0 = 0.75 m) (Tp = 3.47 s) (h = 4.70 m)
Serie 3, R14 (Hm0 = 0.73 m) (Tp = 3.44 s) (h = 4.70 m)

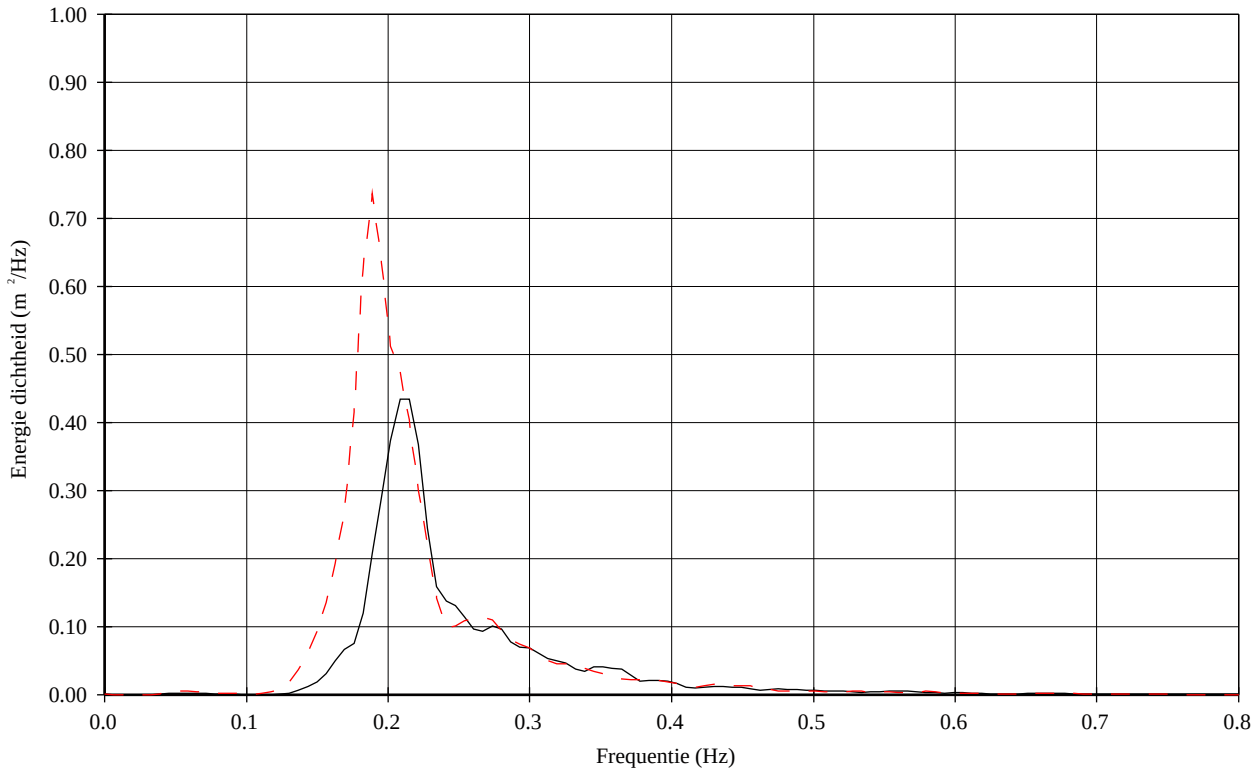


Golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra Serie 3 (proeven R12, R13, R14)		
	Inkomende golven	
Deltares	1208618.017	Fig. B.6



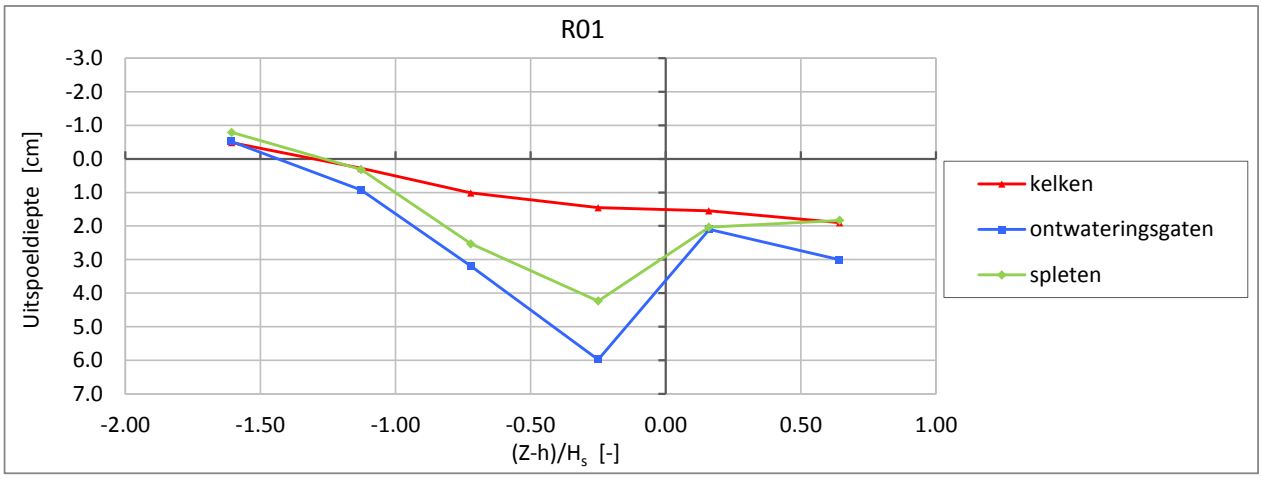
Serie 1-gedraaid, P01 (Hm0 = 0.70 m) (Tp = 4.74 s) (h = 4.55 m)

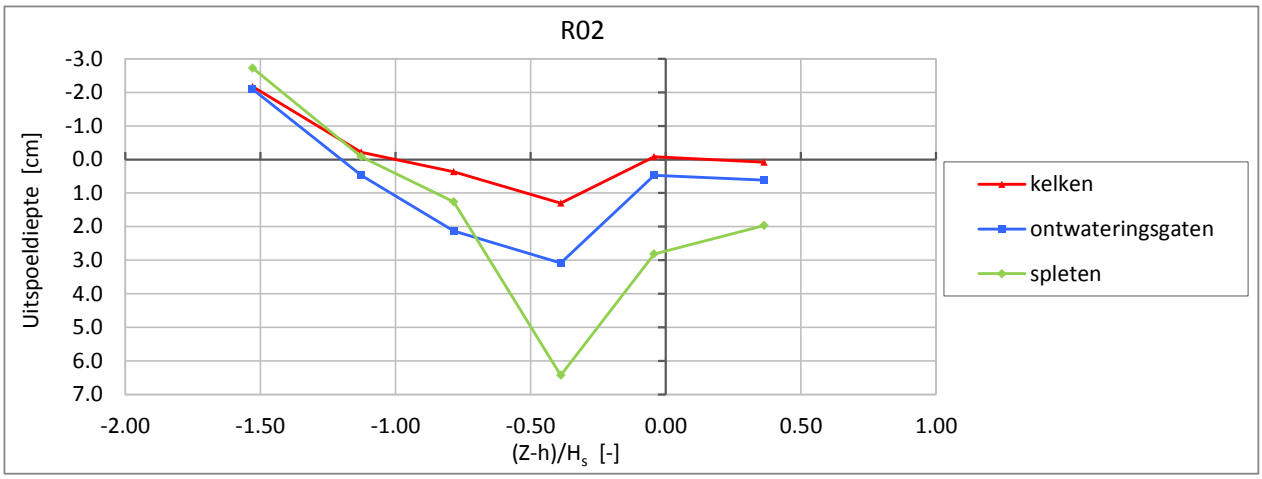
Serie 1-gedraaid, P02 (Hm0 = 0.85 m) (Tp = 5.28 s) (h = 4.70 m)



Golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra Serie 1-gedraaid (proeven P01, P02)		
	Inkomende golven	
Deltares	1208618.017	Fig. B.7

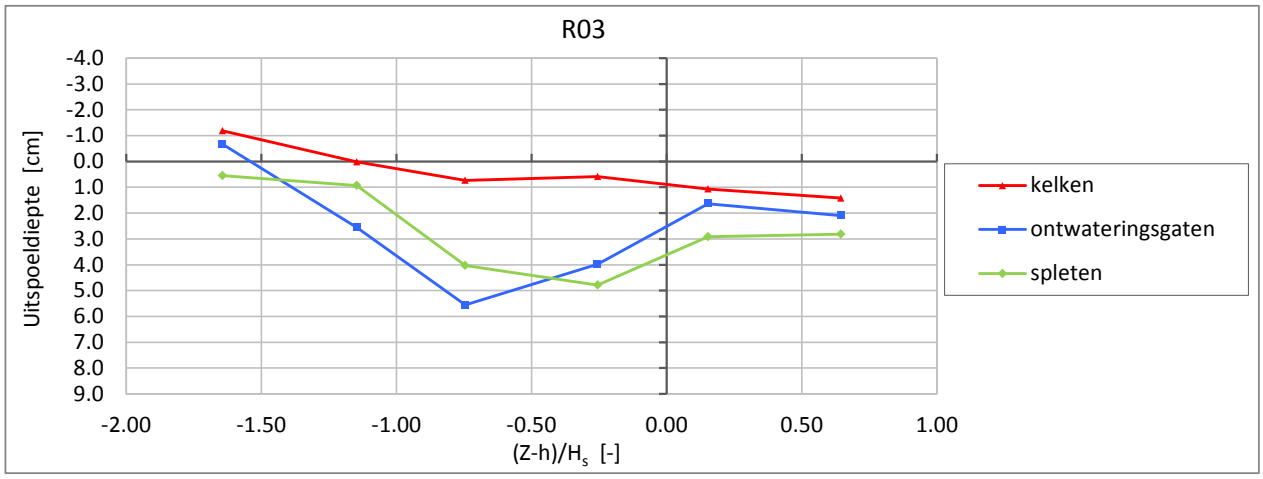
Serie 1

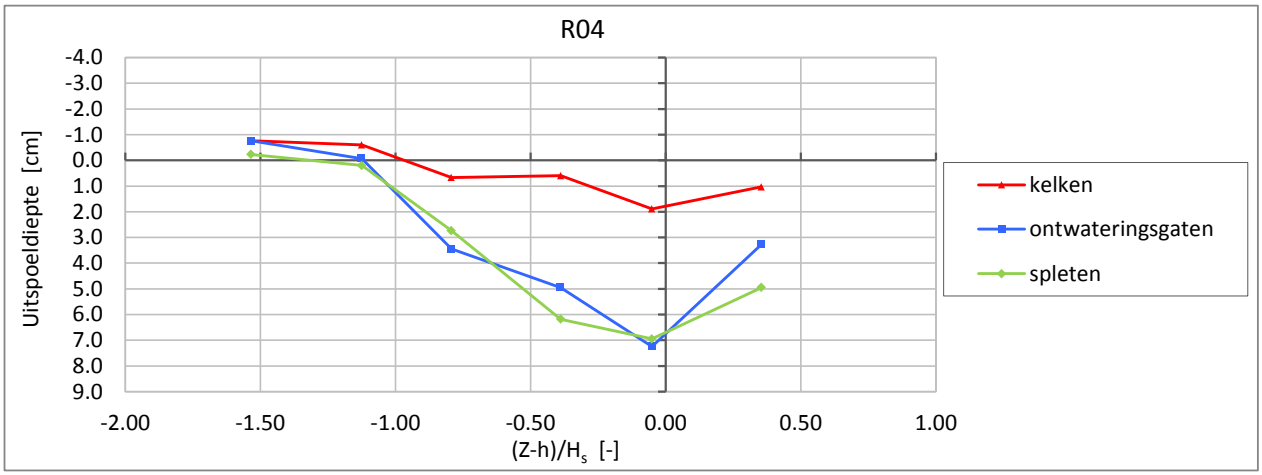


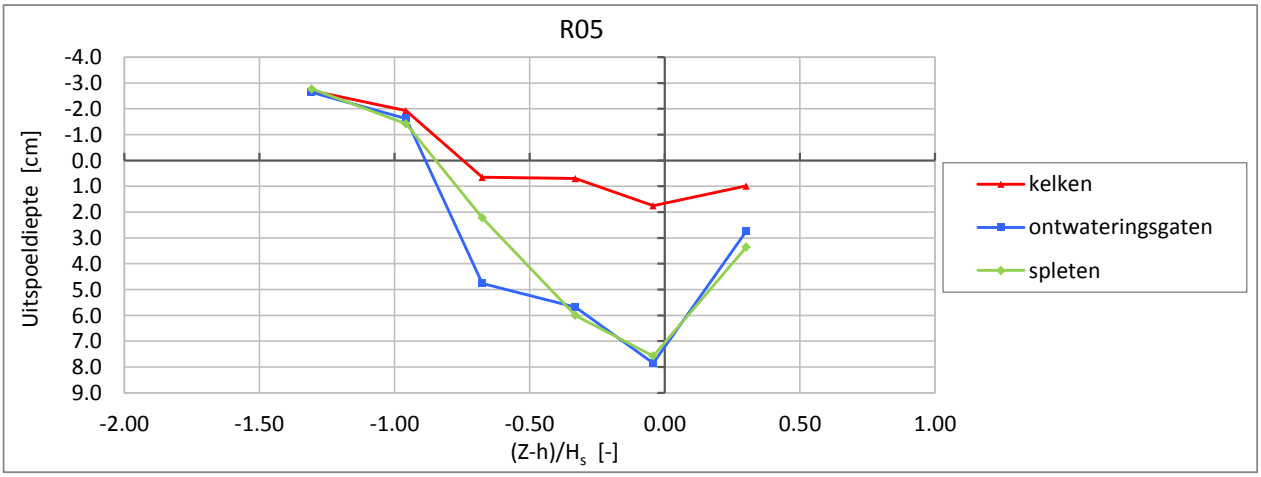


Uitspoeldiepte van het inwasmateriaal		Serie 1
		Proeven R01, R02
Deltares	1208618.017	Fig. B.8

Serie 2

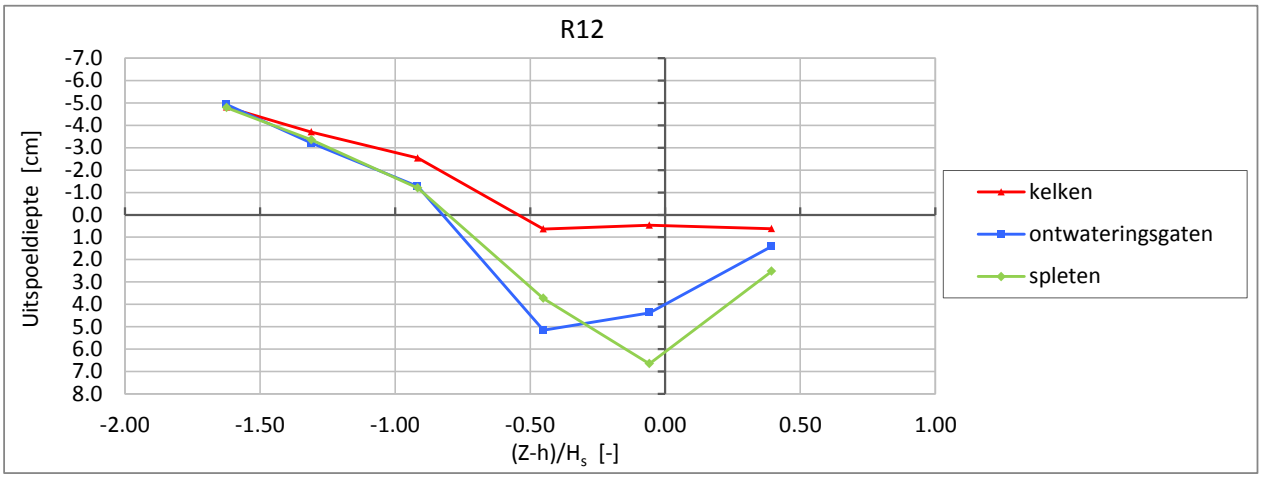


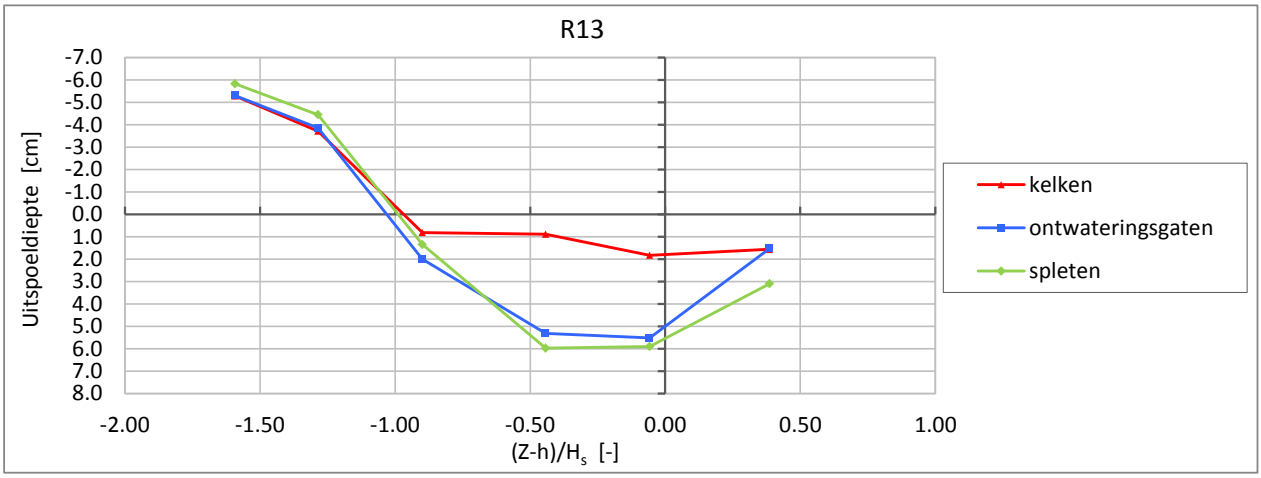


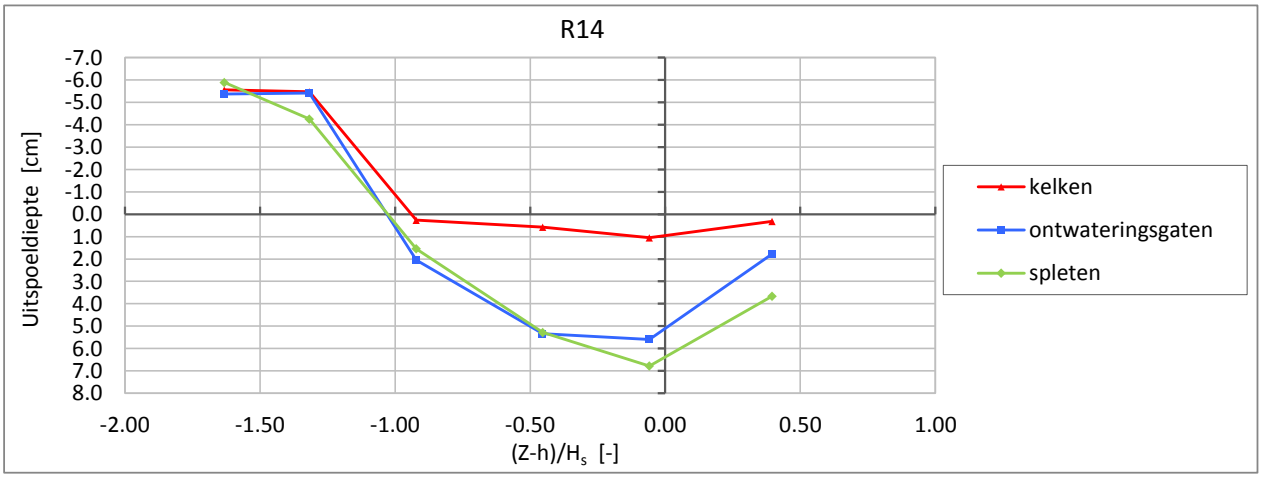


Uitspoeldiepte van het inwasmateriaal		Serie 2
		Proeven R03, R04, R05
Deltares	1208618.017	Fig. B.9

Serie 3

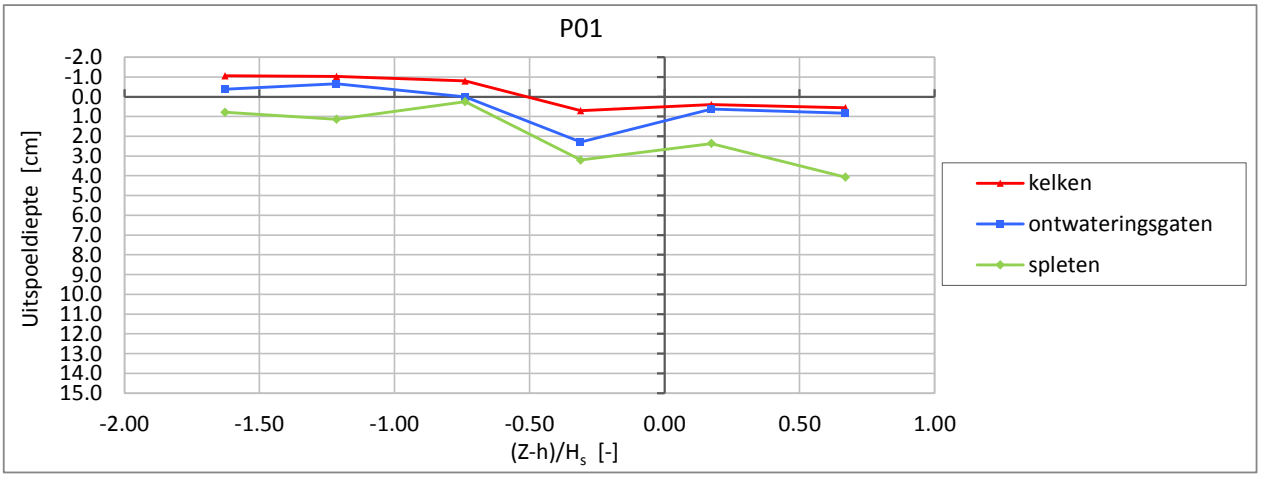


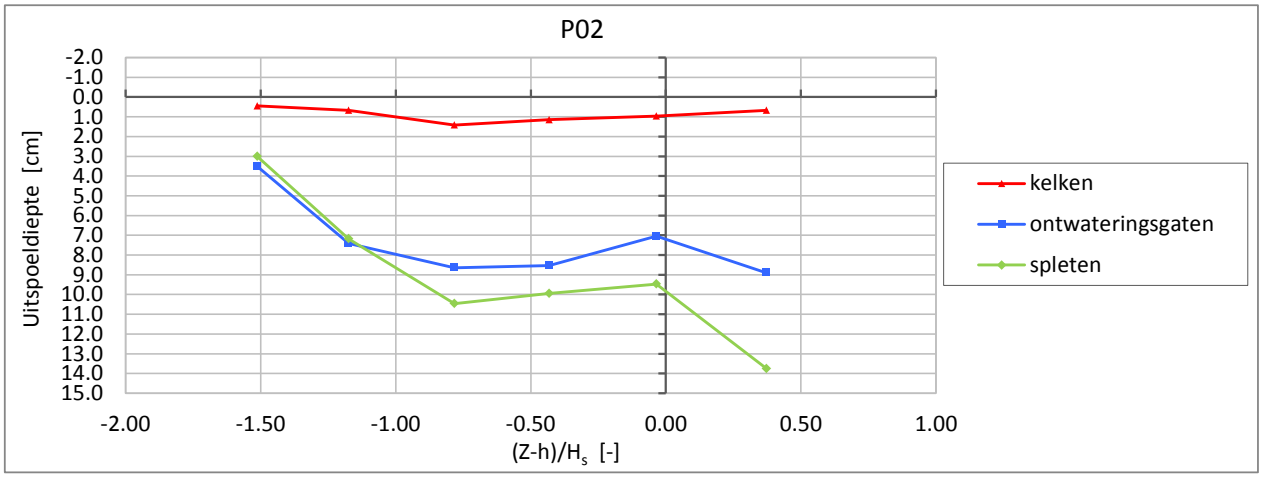




Uitspoeldiepte van het inwasmateriaal		Serie 3
		Proeven R12, R13, R14
Deltares	1208618.017	Fig. B.10

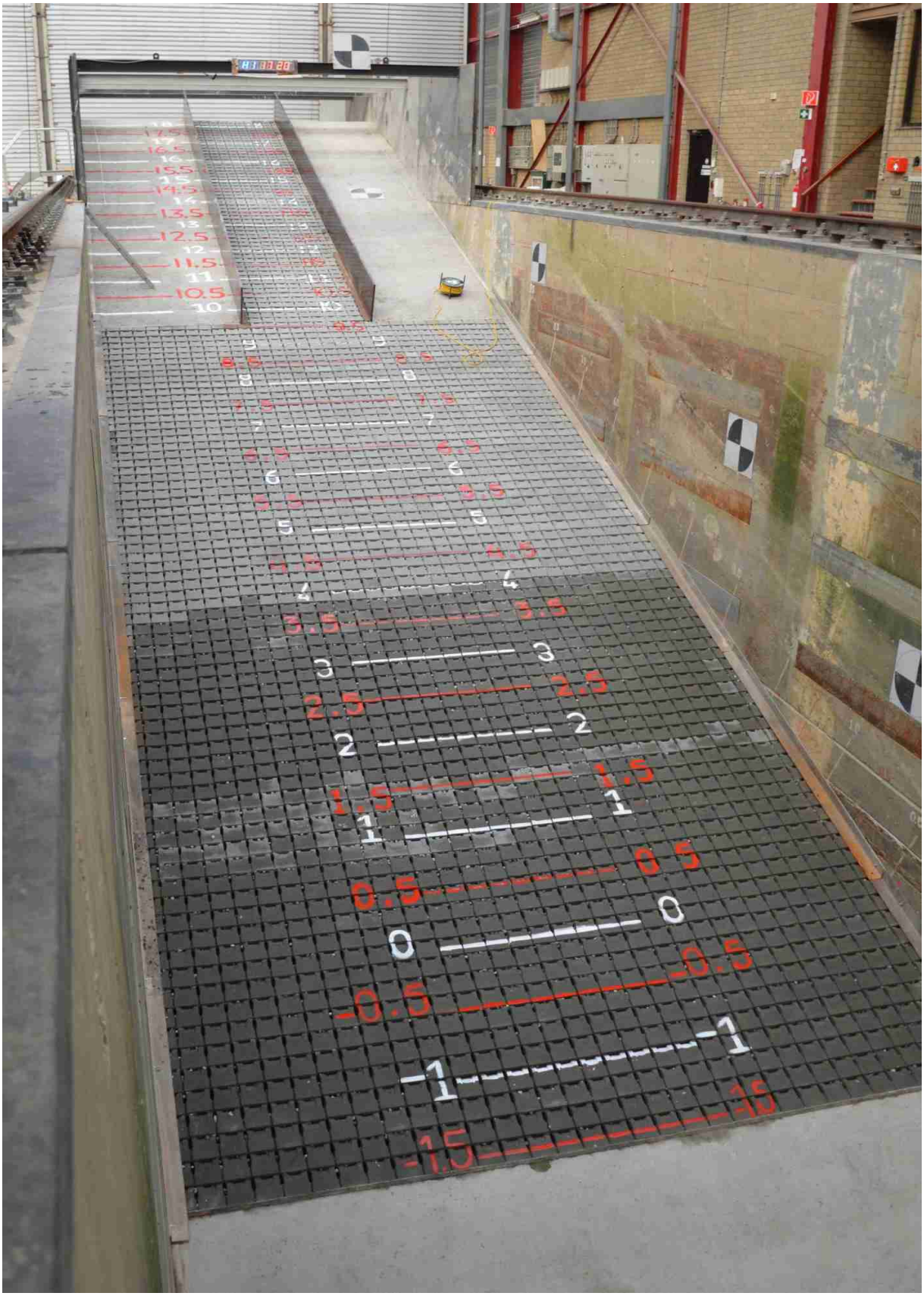
Serie 1-gedraaid





Uitspoeldiepte van het inwasmateriaal		Serie 1-gedraaid
		Proeven P01, P02
Deltares	1208618.017	Fig. B.11

C Foto’s



a) overzicht van de modelopstelling voor proef R01 (serie 1)

Foto's van de RONA®Taille proeven in de Deltagoot		
	modelopstelling	
Deltares	1208618.017	Foto C.1



a) lichte vervorming van het talud na proef R01 (serie 1)



b) lichte vervorming van het talud na proef R01 (serie 1)



c) lokaal was inwasmateriaal opgehoopt in de kanalen van de RONA®Taille zuilen (proef R01, serie 1)

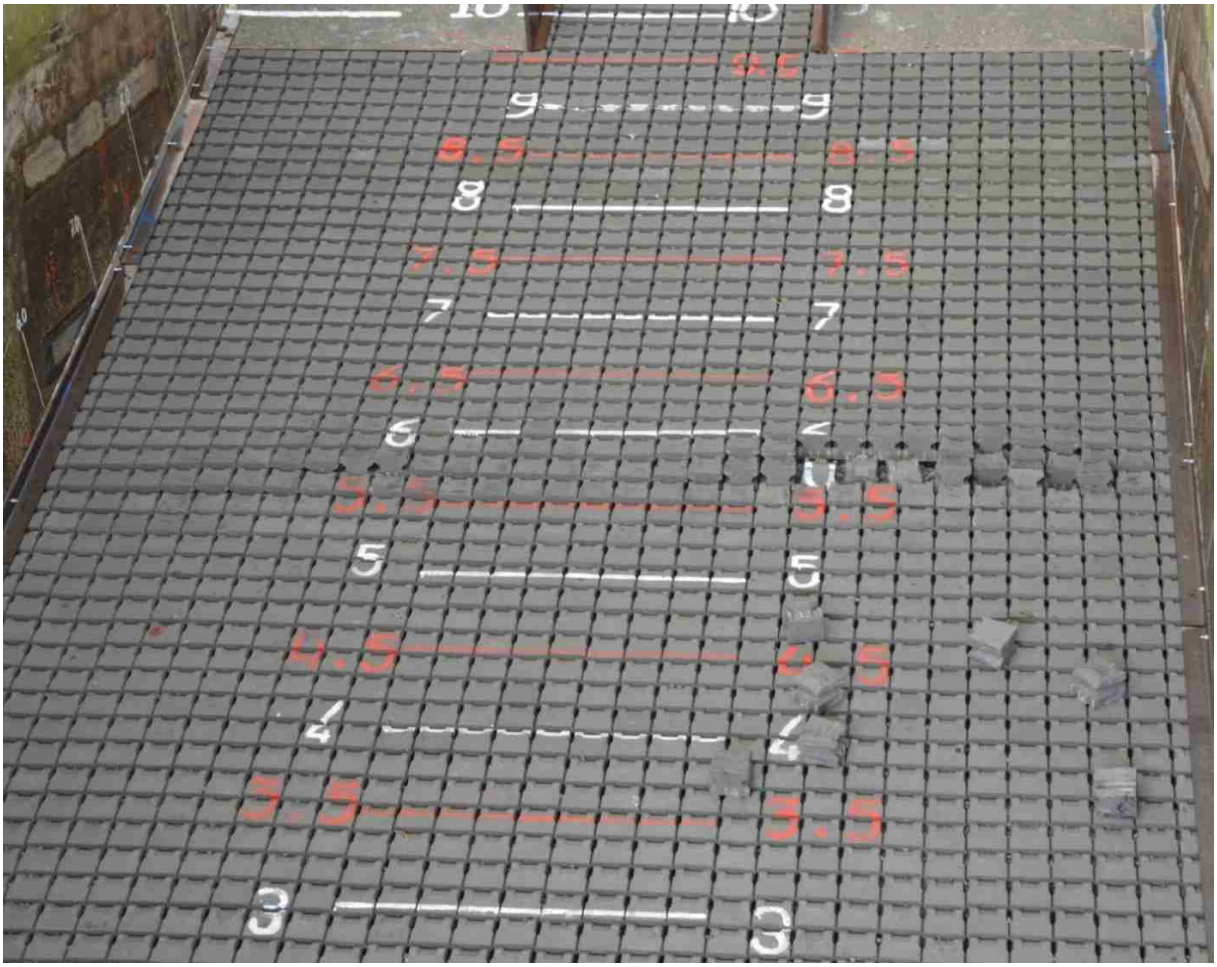
Foto's van de RONA®Taille proeven in de Deltagoot		
	serie 1	
Deltares	1208618.017	Foto C.2



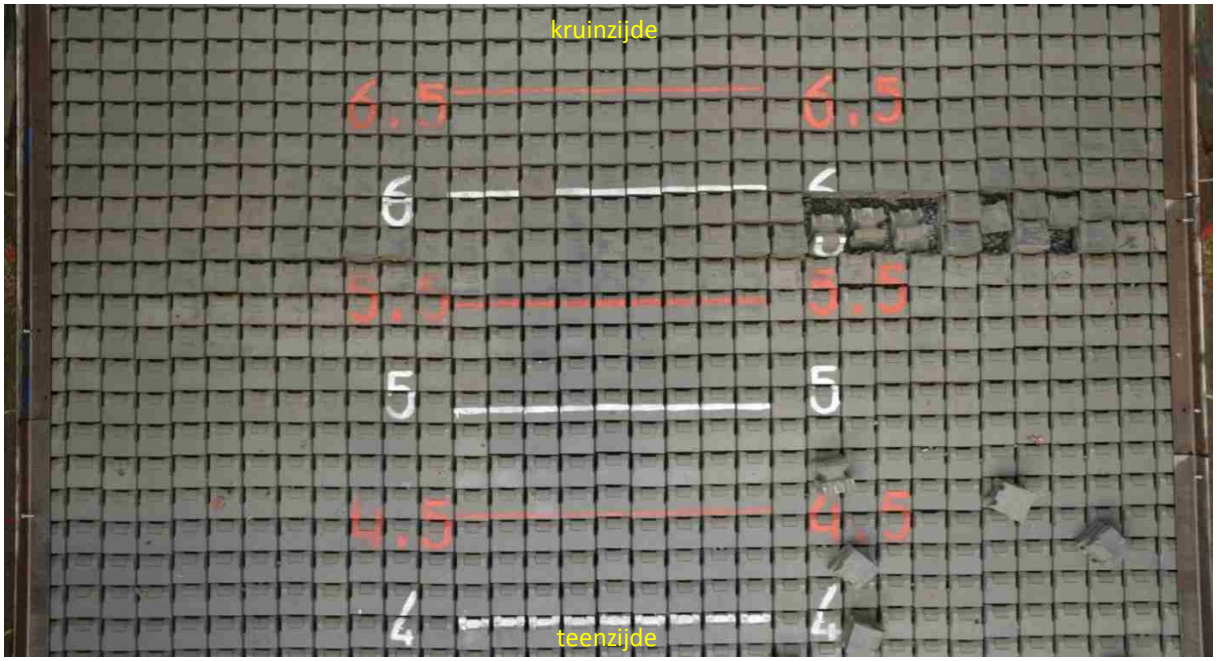
a) in de zwaarst belaste zone van het talud waren ontwateringsgaten, spleten en L-vormige hoeken grotendeels leeggespoeld (proef R01, serie 1)



b) doordat golfneerloop tegen de omhooggekomen rij zuilen botst, springt het water omhoog (proef R02, serie 1)



a) schade na proef R02 (serie 1)



b) bovenaanzicht van de schade na proef R02 (serie 1)

Foto's van de RONA®Taille proeven in de Deltagoot		
	serie 1	
Deltares	1208618.017	Foto C.4



a) na het verwijderen van de losliggende zuilen uit het gat, was duidelijk zichtbaar dat de steenzetting kruinwaarts van de rug tot enkele centimeters boven de filterlaag zweefde (proef R02, serie 1)



b) doordat van veel zuilen de nokken iets korter waren dan de voet, stonden veel zuilen in de lengterichting van de goot niet met de koppen tegen elkaar (proef R02, serie 1)

Foto's van de RONA®Taille proeven in de Deltagoot		
	serie 1	
Deltares	1208618.017	Foto C.5



a) lichte vervorming van het talud na proef R03 (serie 2)



b) golfaanval tijdens proef R04 (serie 2)



c) golfaanval tijdens proef R04 (serie 2)

Foto's van de RONA®Taille proeven in de Deltagoot		
	serie 2	
Deltares	1208618.017	Foto C.6



a) vervorming van het talud na proef R04 (serie 2)



b) vervorming van het talud na proef R04 (serie 2)

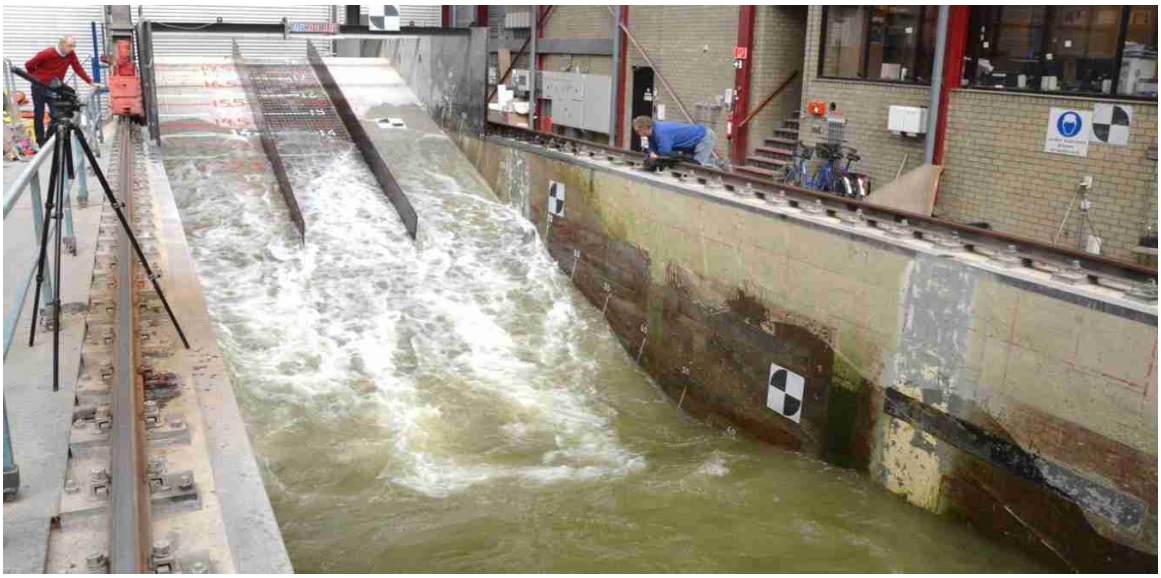


c) vervorming van het talud na proef R04 (serie 2)

Foto's van de RONA®Taille proeven in de Deltagoot		
	serie 2	
Deltares	1208618.017	Foto C.7



a) het talud voor proef R05 (serie 2) nadat de vervorming van proef R04 zo vlak mogelijk was getrild



b) golfoploop tijdens proef R05 (serie 2)



c) schade en vervorming van het talud na proef R05 (serie 2)

Foto's van de RONA®Taille proeven in de Deltagoot		
	serie 2	
Deltares	1208618.017	Foto C.8



a) schade na proef R05 (serie 2)

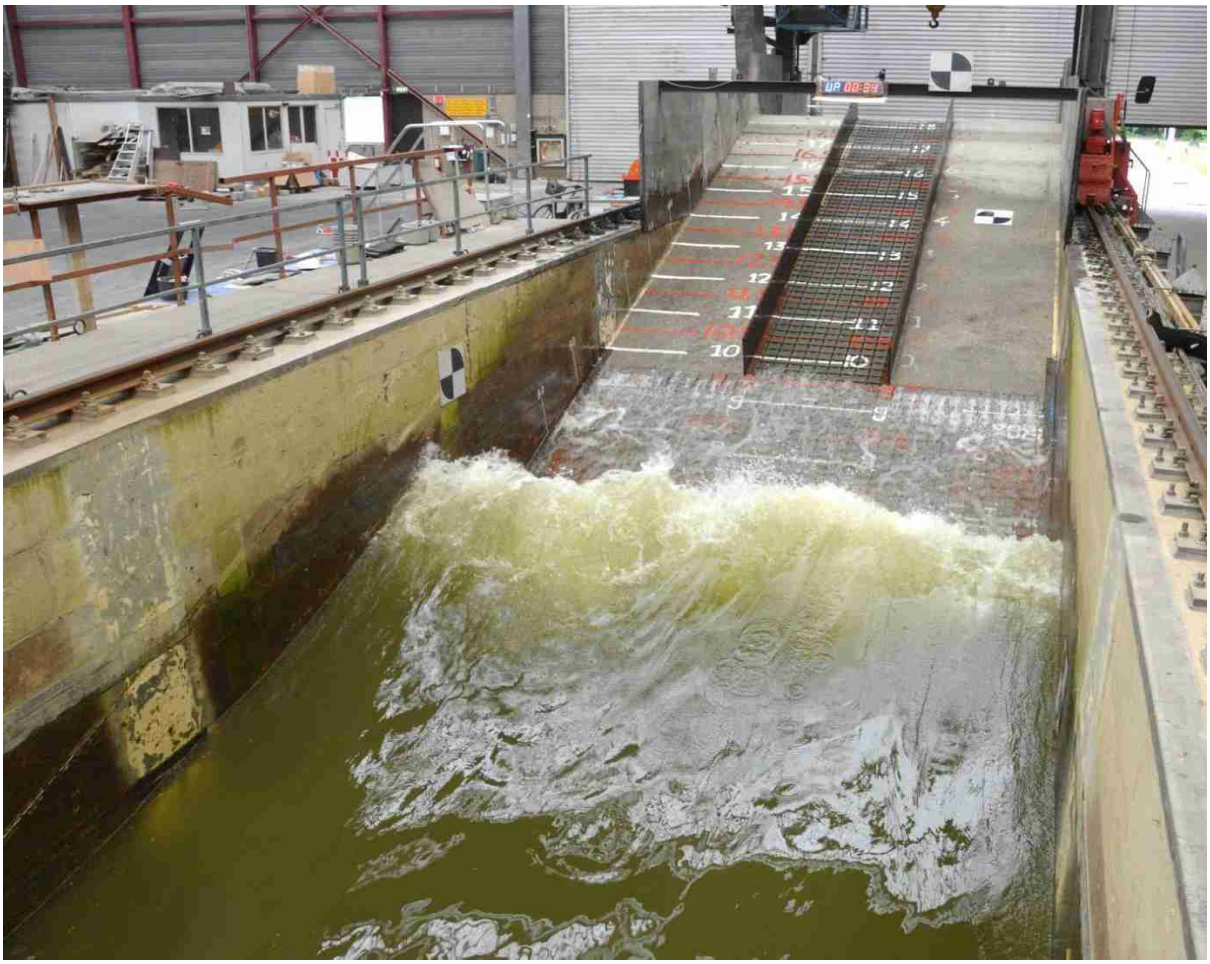


b) schade en vervorming van het talud na proef R05 (serie 2)

Foto's van de RONA®Taille proeven in de Deltagoot		
	serie 2	
Deltares	1208618.017	Foto C.9



a) lichte vervorming van het talud na proef R12 (serie 3)



b) golfaanval tijdens proef R13 (serie 3)

Foto's van de RONA®Taille proeven in de Deltagoot		
	serie 3	
Deltares	1208618.017	Foto C.10



a) vervorming van het talud na proef R13 (serie 3)

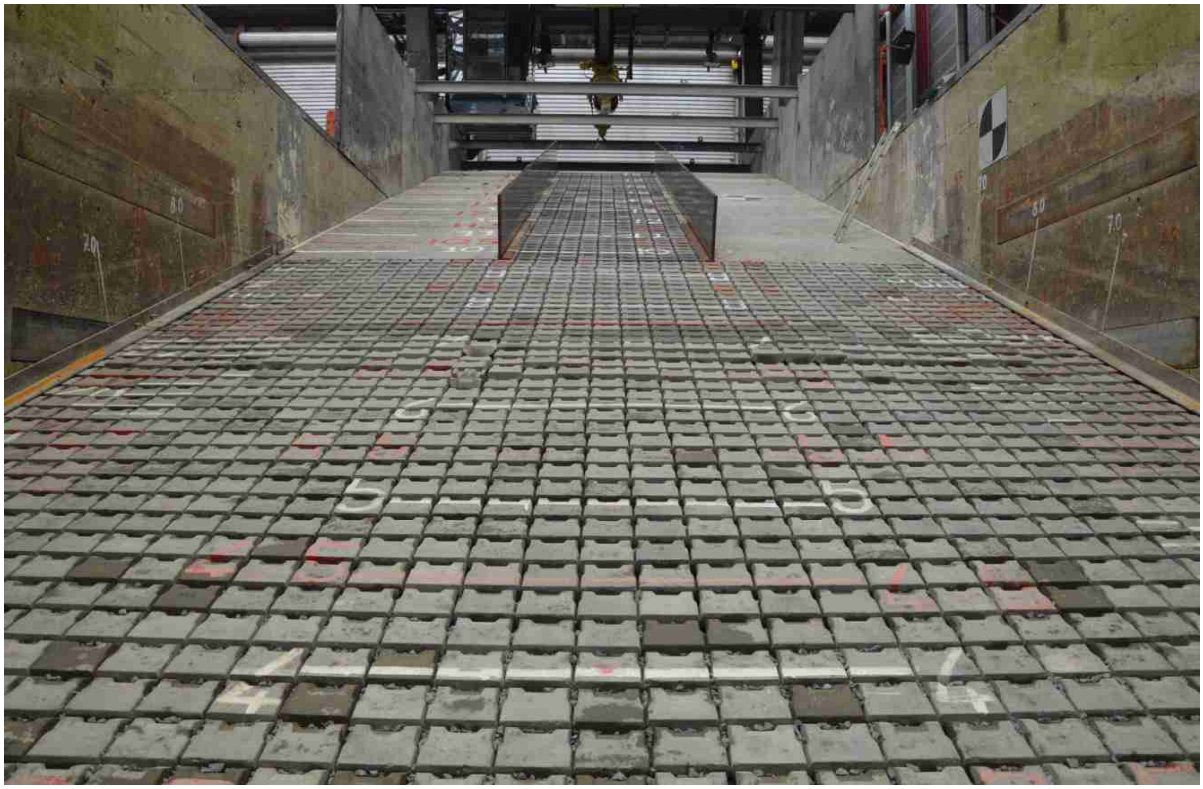


b) vervorming van het talud na proef R13 (serie 3)

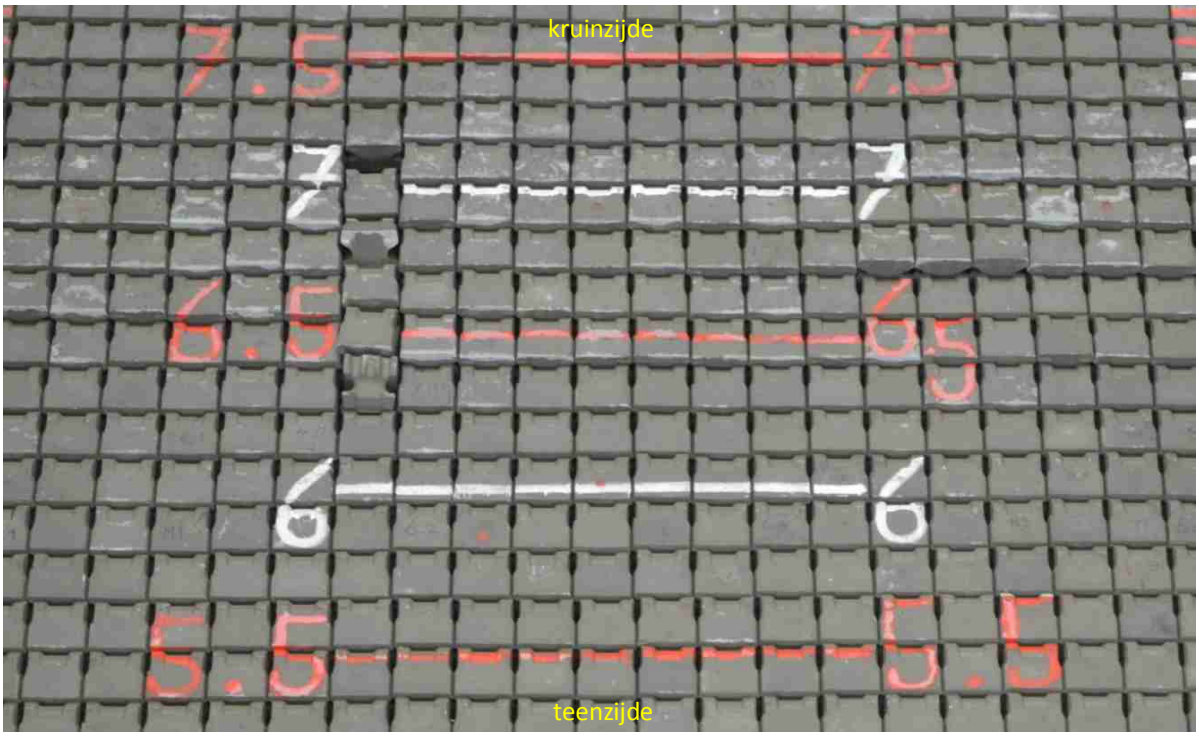


c) vervorming van het talud na proef R13 (serie 3)

Foto's van de RONA®Taille proeven in de Deltagoot		
	serie 3	
Deltares	1208618.017	Foto C.11



a) schade na proef R14 (serie 3)

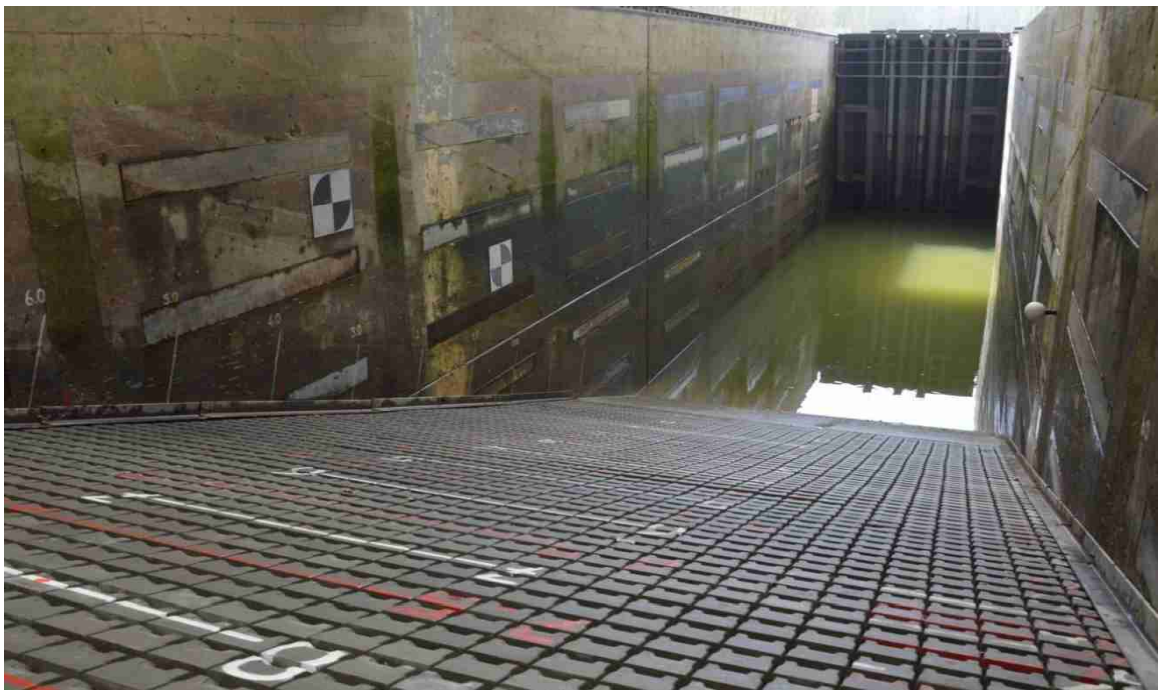


b) schade na proef R14 (serie 3)

Foto's van de RONA®Taille proeven in de Deltagoot		
	serie 3	
Deltares	1208618.017	Foto C.12



a) de golfneerloop over gedraaide zuilen (proef P01, serie 1-gedraaid) is turbulenter dan over niet-gedraaide zuilen

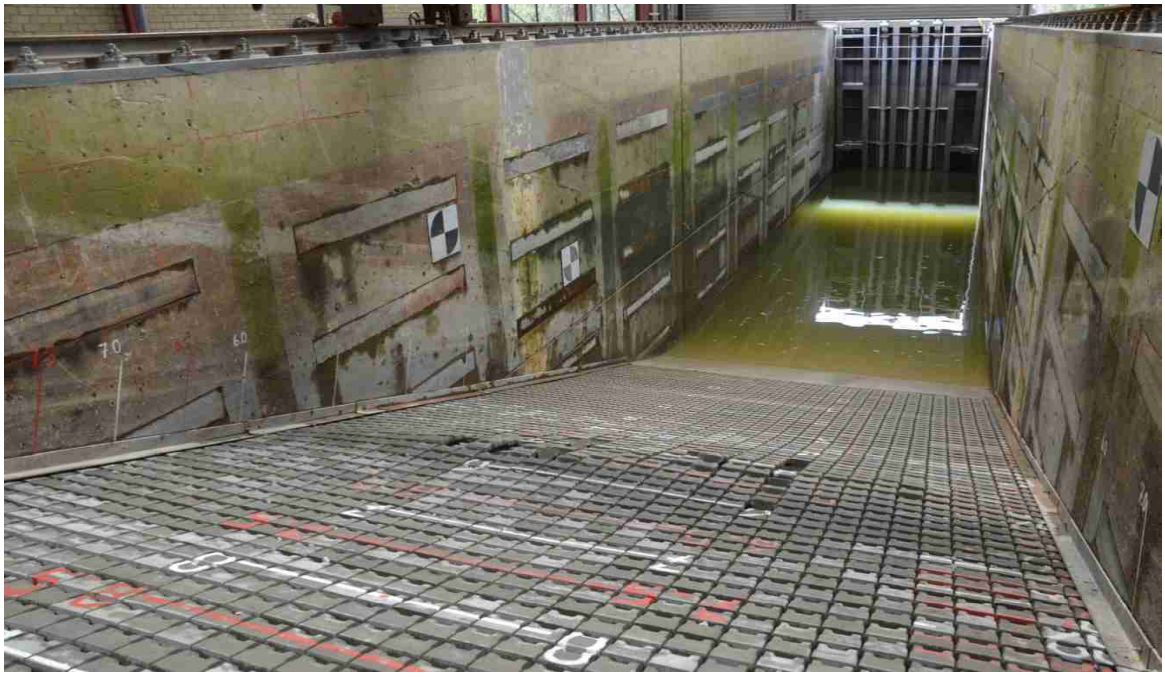


b) lichte vervorming van het talud na proef P01 (serie 1-gedraaid)

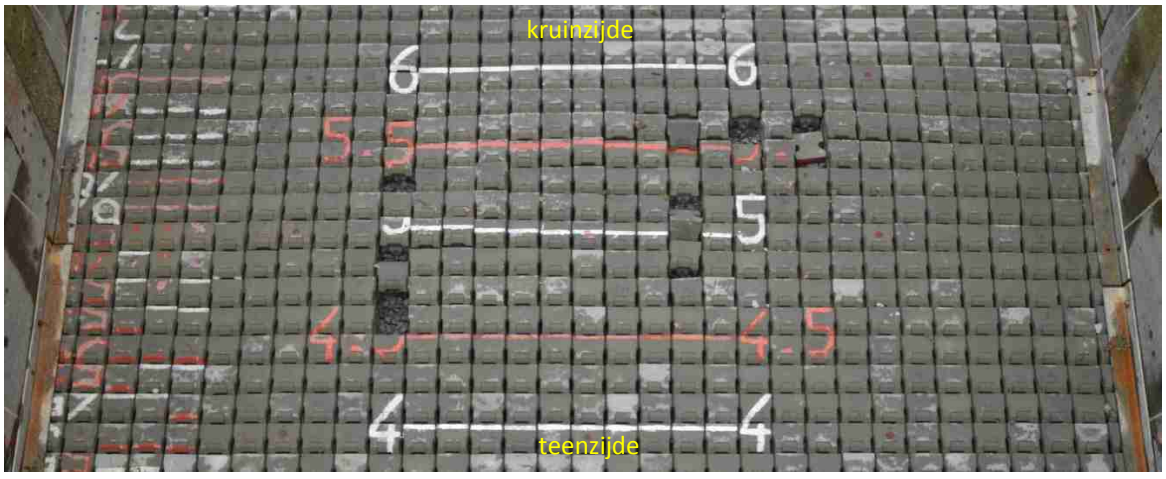
Foto's van de RONA®Taille proeven in de Deltagoot		
	serie 1-gedraaid	
Deltares	1208618.017	Foto C.13



a) schade na proef P02 (serie 1-gedraaid)



b) schade na proef P02 (serie 1-gedraaid)



c) bovenaanzicht van de schade na proef P02 (serie 1-gedraaid)

Foto's van de RONA®Taille proeven in de Deltagoot		
	serie 1-gedraaid	
Deltares	1208618.017	Foto C.14



a) schade na proef P02 (serie 1-gedraaid)

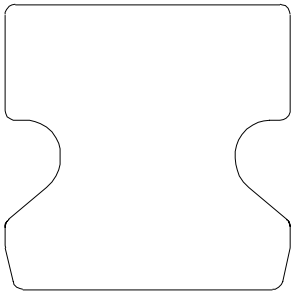


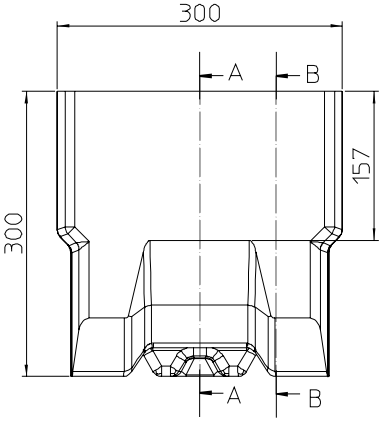
b) de filterlaag na het verwijderen van de zuilen na proef P02 (serie 1-gedraaid). Een deel van het filter-materiaal was van boven de kattenrug gemigreerd naar de kattenrug. Bovenin de testsectie was het inwasmateriaal op een aantal plekken zelfs geheel verdwenen.

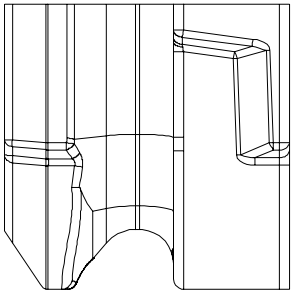
Foto's van de RONA®Taille proeven in de Deltagoot		
	serie 1-gedraaid	
Deltares	1208618.017	Foto C.15

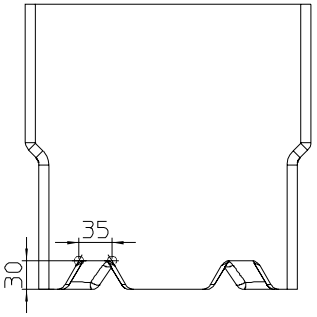
D Technische tekeningen van RONA®Taille steenzetting (ware grootte)

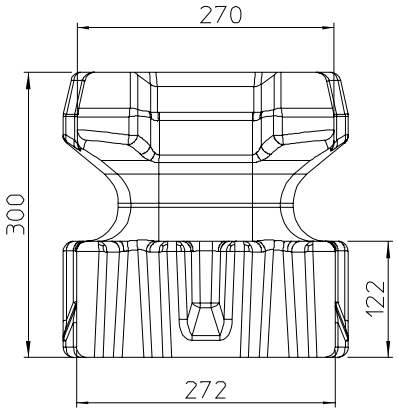
Revisie			
Rev	Omschrijving	Naam	Datum
...	...	...	...

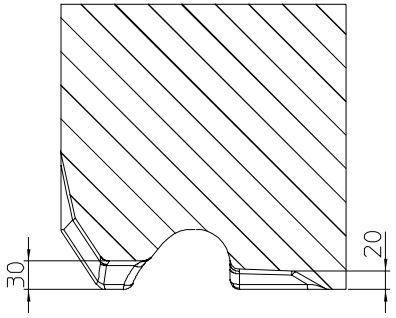




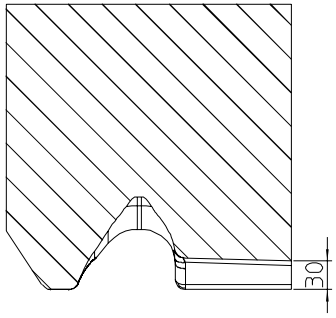




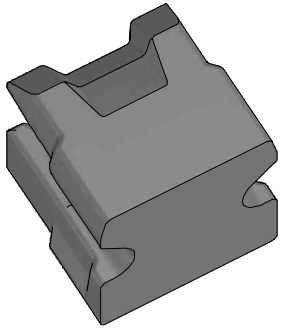


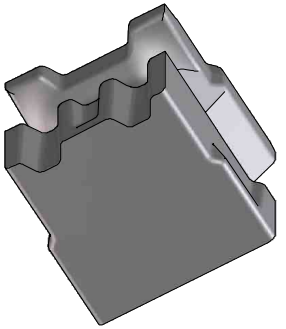


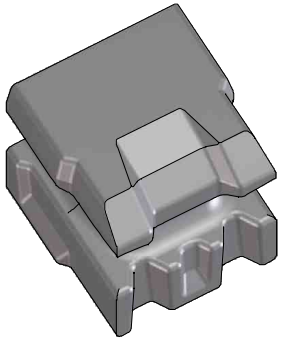
Doorsnede A-A



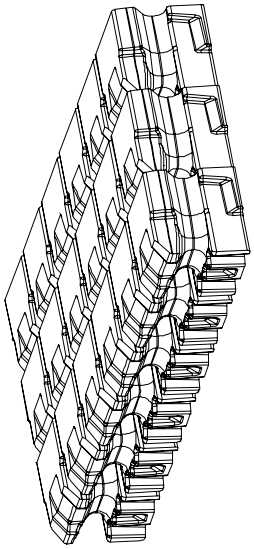
Doorsnede B-B

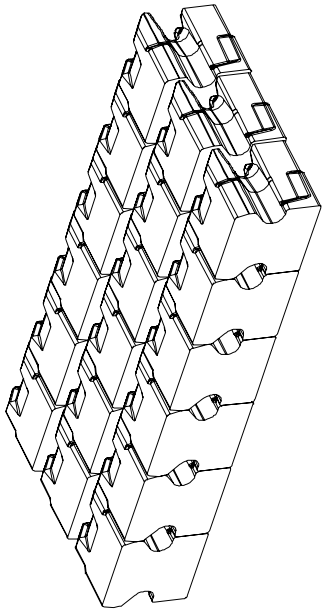


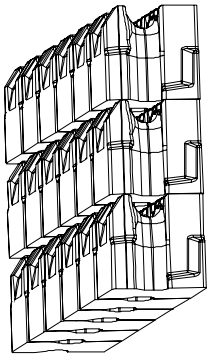


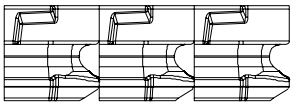


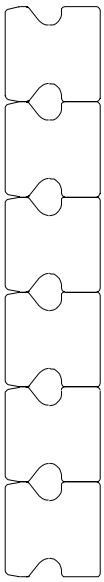
Geprojecteerd oppervlak onderzijde:ca.82900mm2
Geprojecteerd oppervlak bovenzijde:ca.81800mm2
Geprojecteerd oppervlak doorsnede hals:ca.41600mm2

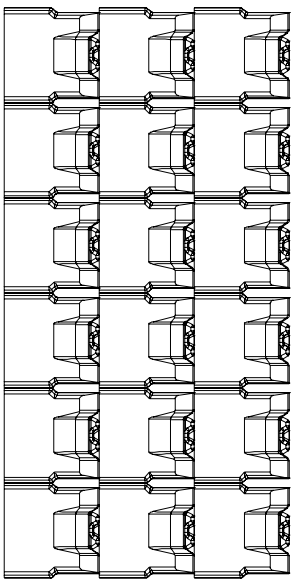


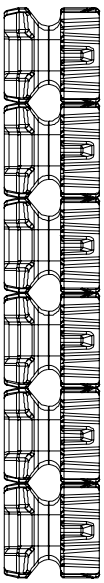












E Procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor

E.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 E.1 Golfaanval op testsectie van RONA®Taille.

E.2 Interpretatie van de proeven

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

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

Ten aanzien van de eerste twee series wordt de bezwijkgolfhoogte gelijkgesteld aan het gemiddelde tussen de H_s waarbij nog net geen bezwijken optrad en de H_s waarbij dat wel het

geval was. Bij de derde serie is de totale proefduur tot het optreden van bezwijken, in combinatie met de golfcondities, het uiteindelijke proefresultaat.
Omdat elk van deze series een waardevol proefresultaat heeft opgeleverd, worden alle drie de resultaten meegewogen bij het bepalen van de stabiliteitsfactor. Dit wordt bereikt door het gemiddelde van de drie series te gebruiken en daarnaast rekening te houden met de spreiding van de drie meetresultaten.

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

1 De golfhoogte bij het bezwijken van de steenzetting is voor de eerste twee proevenseries met korteduurproeven gelijk aan het gemiddelde van de golfhoogte waarbij daadwerkelijk bezwijken is opgetreden (schadecategorie c of d) en de golfhoogte van de proef met de hoogste golfhoogte in dezelfde serie (ongeveer dezelfde golfsteilheid) waarbij nog geen bezwijken is opgetreden (schadecategorie a of b).
2 Voor de langeduurproef wordt de gemiddelde golfhoogte en golfperiode bepaald en geldt het aantal golven tot bezwijken als het resultaat van de proef.
3 Als tijdens de korteduurproeven bij de maximale golfhoogte nog geen 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 het 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 tijdens de langeduurproef er geen bezwijken optreedt, wordt aangenomen dat er wel bezwijken zou zijn opgetreden als de proef 20% langer had geduurd.
5 Als tijdens geen enkele proevenserie de steenzetting is bezweken, 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 het bezwijken bij een veel hogere golfhoogte optreedt dan 15% boven de maximale golfcondities.

E.3 Bepaling stabiliteitsfactor

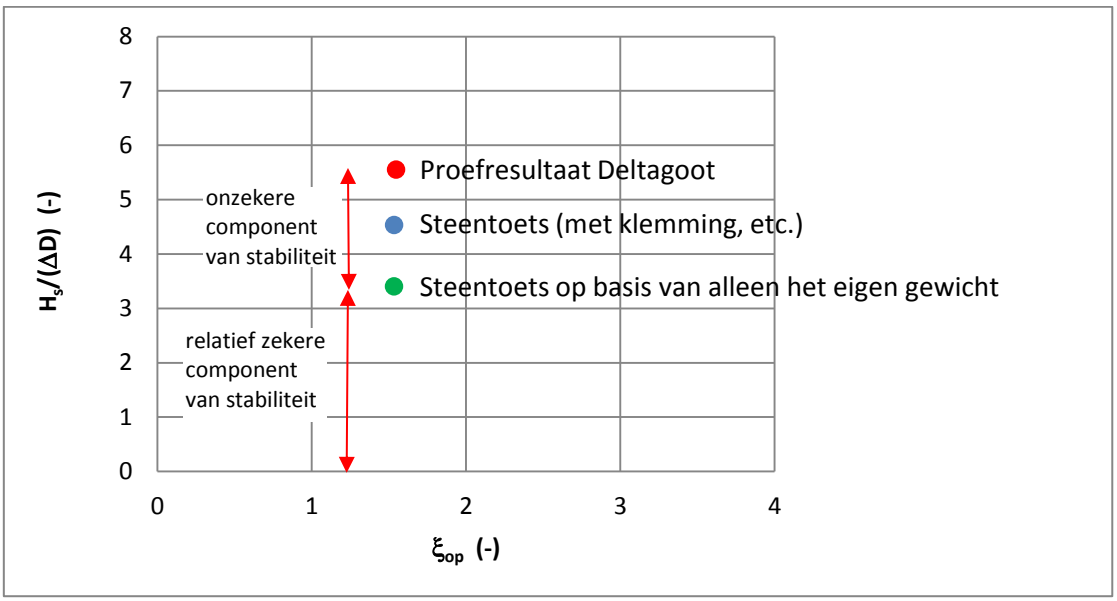
Voor het bepalen van de stabiliteitsfactor wordt zoveel mogelijk kennis en ervaring van steenzettingen benut, om een zo goed mogelijke factor te verkrijgen met de juiste veiligheids-marge. Dit wordt enerzijds gerealiseerd door gebruik te maken van het rekenmodel Steentoets en anderzijds door te bedenken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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

Met:

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

γ = veiligheidsfactor (-)

Dit kan vereenvoudigd worden tot:

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

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

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

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

Met:

σ = standaardafwijking in de proefresultaten

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

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