

Stabiliteit van RONA[®]ton XL in golfaanval

Modelonderzoek in Deltagoot



Stabiliteit van RONA[®]ton XL in golfaanval

Modelonderzoek in Deltagoot

Auteur(s)

M. Klein Breteler




Stabiliteit van RONA[®]ton XL in golfaanval

Modelonderzoek in Deltagoot

Opdrachtgever	Altena Infra-materialen
Contactpersoon	Albert Bruins Slot
Referenties	Tot stand gekomen met financiële ondersteuning van TKI Deltatechnologie
Trefwoorden	Steenzetting, dijkbekledingen, zetsteen, stabiliteit, stabiliteitsfactor

Documentgegevens

Versie	3a
Datum	14-02-2022
Projectnummer	11206622-000
Document ID	11206622-000-HYE-0006
Pagina's	60
Classificatie	
Status	definitief

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	datum
1	M. Klein Breteler	S. Zwanenburg	P. van Steeg	1-2-2022
2	M. Klein Breteler	S. Zwanenburg	P. van Steeg	10-2-2022
3	M. Klein Breteler 	S. Zwanenburg 	P. van Steeg 	14-2-2022

Samenvatting

Het in dit rapport beschreven onderzoek betreft de stabiliteit van zetstenen van het type RONA[®]ton XL. Om de stabiliteit van RONA[®]ton XL bij golfaanval te bepalen, is grootschalig modelonderzoek uitgevoerd in de Deltagoot van Deltares volgens NEN-7024. De geometrische schaal van dit onderzoek was 1:1,67. 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 18 cm, wat overeenkomt met een steenzetting van 30 cm in werkelijkheid. Onder de RONA[®]ton XL was een filterlaag aangebracht van steenslag met daaronder een geotextiel.

De steenzetting is beproefd met drie proevenseries:

- *Serie 1 en 2:* eerst zijn twee proevenseries met korteduurproeven (ruim 1000 golven per proef) uitgevoerd. Per serie zijn alle proeven uitgevoerd met dezelfde golfsteilheid: de proeven van serie 1 zijn uitgevoerd met een kleine golfsteilheid (lange golven) en de proeven van serie 2 met een grote golfsteilheid (korte golven). De golfhoogte is na elke proef verhoogd totdat de maximaal op te wekken golfhoogte was bereikt.
- *Serie 3:* de laatste serie (serie 3) bestond uit een langeduurproef. Deze proef, met gelijkblijvende golfcondities, is voortgezet totdat schade optrad.

Het doel van het onderzoek is het vaststellen van de stabiliteitsfactor van de steenzetting (f_{stab}). Deze stabiliteitsfactor is een soortspecifieke factor die aangeeft hoe stabiel een steenzetting is in golfaanval, ten opzichte van een berekening met het rekenmodel Steentoets (met $f_{stab} = 1$). Hoe beter de steenzetting presteert ten opzichte van de berekening met Steentoets, hoe hoger de stabiliteitsfactor.

De op basis van de uitgevoerde proeven afgeleide stabiliteitsfactor voor RONA[®]ton XL is: $f_{stab} = 1,44$. Deze factor wordt opgenomen in Steentoets.



Golfbelasting in Deltagoot op talud met RONA[®]ton XL

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
1.1	Doel van het onderzoek	6
1.2	RONA [®] ton XL	7
2	Schaling	9
2.1	Algemeen	9
2.2	Schaling van de golven	10
2.3	Schaling van dimensieloze parameters	10
2.4	Schaling van stroming in de constructie	11
3	Modelopstelling	13
4	Proefresultaten en observaties	16
4.1	Proevenprogramma	16
4.2	Waarnemingen tijdens en na de proeven	19
4.2.1	Tijdens de proeven	19
4.2.2	Vervorming van het taludoppervlak	19
4.2.3	Uitspoeling van het inwasmateriaal	21
5	Stabiliteitsfactor	23
5.1	Gemeten stabiliteit ten opzichte van de met Steentoets berekende stabiliteit	23
5.2	Stabiliteitsfactor	24
6	Conclusies	26
	Referenties	28
A	Tabellen	29
B	Figuren	33
C	Procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor	42
C.1	Inleiding	42
C.2	Interpretatie van de proeven	42
C.3	Bepaling stabiliteitsfactor	43
D	Indeling schadecategorieën	47
E	Foto's	49

1 Inleiding

1.1 Doel van het onderzoek

In het kader van het 'Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken' is in de periode van 2014 tot 2016 een groot aantal types steenzettingen onderzocht in de Deltagoot (Klein Breteler 2016). De gevolgde procedure tijdens de proeven van het 'Vergelijkend onderzoek zetsteen voor dijken' is conform de norm NEN-7024. Het doel was om van alle moderne steenzettingen een stabiliteitsfactor vast te stellen. Deze stabiliteitsfactor f_{stab} is een soortspecifieke factor die aangeeft hoe stabiel een steenzetting is in golfaanval, ten opzichte van een berekening met het rekenmodel Steentoets (met $f_{stab} = 1$). Hoe beter de steenzetting presteert, hoe hoger de stabiliteitsfactor.

Steentoets wordt in Nederland gebruikt voor het ontwerpen van nieuwe steenzettingen en voor de periodieke wettelijke beoordeling van bestaande steenzettingen op primaire waterkeringen. Door de introductie van de stabiliteitsfactor in Steentoets wordt bij het ontwerp van steenzettingen optimaal rekening gehouden met de werkelijke stabiliteit van de steenzetting zoals vastgesteld tijdens de Deltagootproeven.

Altena Infra-materialen heeft aan Deltares gevraagd om volgens dezelfde procedure als in het "Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken" de stabiliteitsfactor te bepalen voor RONA[®]ton XL met behulp van Deltagootproeven. Voor deze ontwikkeling is gebruik gemaakt van TKI financiering.



Figuur 1.1 Deltagoot van Deltares

De Deltagoot (Figuur 1.1) is bij uitstek geschikt om de stabiliteit van een steenzetting, zoals RONA[®]ton XL, vast te stellen. De goot is 300 m lang, 5 m breed en 9,5 m diep en er kunnen golven opgewekt worden met een significante golfhoogte tot 2 m. Dergelijk grootschalig onderzoek is nodig omdat de stabiliteit van steenzettingen beïnvloed wordt door schaal-effecten. Daardoor is het niet mogelijk om het onderzoek uit te voeren bij een kleinere schaal dan 1:3.

De golven in de werkelijkheid op de primaire waterkeringen kunnen echter nog hoger worden dan in de Deltagoot. Daarom is het huidige onderzoek uitgevoerd op schaal 1:1,67. Bij deze schaal zijn er verwaarloosbare schaal-effecten en kunnen de resultaten toegepast worden op het volledige scala aan zuilhoogtes van de RONA[®]ton XL.

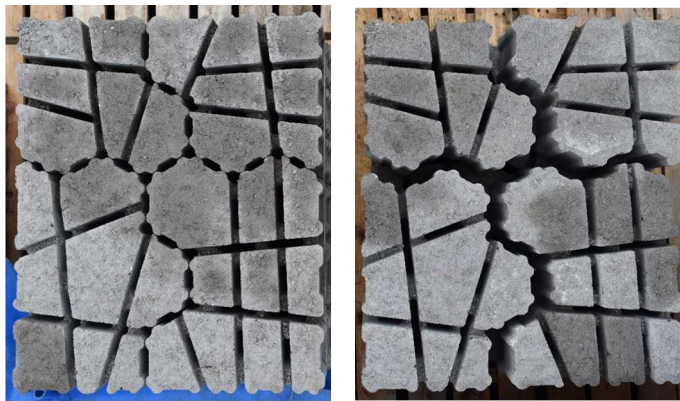
Opgemerkt wordt dat de robuustheid van de RONA[®]ton XL (ten aanzien van breuk bij plaatsing, bij het eroverheen rijden met onderhoudsvoertuigen en bij vorst-dooi wisselingen) niet in dit project is onderzocht. De relevante eisen zijn opgenomen in de NEN-7024.

Het huidige onderzoek is uitgevoerd in november en december 2021 onder leiding van ir S. Zwanenburg en ir. M. Klein Breteler.

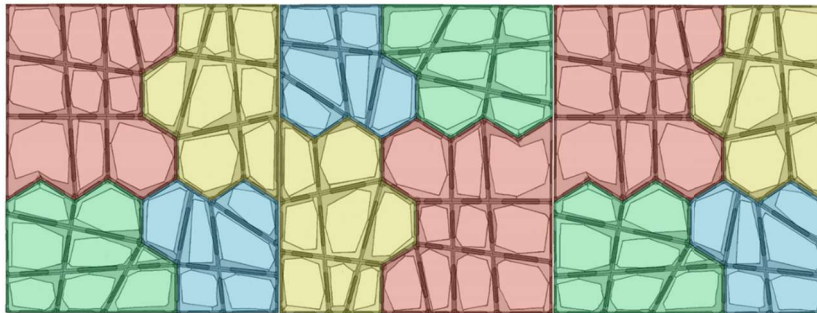
1.2 RONA[®]ton XL

RONA[®]ton XL is een innovatieve steenzetting die ontwikkeld is door Altena Infra-materialen. Het ontwerp is gebaseerd op de reeds bestaande RONA[®]ton en de hypothese dat steenzettingen met grote zetstenen stabiel zijn dan die met kleine zetstenen. Dat komt voort uit het feit dat steenzettingen bij elke golfklap slechts over een smalle strook op het talud een grote opwaartse verschildruk te verduren krijgen. Door de breedte van de zetstenen (afmeting in de richting van teen naar kruin) een beduidend grotere maat te geven dan deze strook met opwaartse verschildruk, zal er een naar verhouding grote stabiliteit resulteren. Hoe groter de zetsteen, hoe groter het deel van de zetsteen dat geen opwaartse verschildruk krijgt tijdens de golfklappen.

Het resultaat van de ontwikkeling is te zien in Figuur 1.2 en Figuur 1.3.



Figuur 1.2 RONA[®]ton XL (links een set en rechts de 4 afzonderlijke zetstenen)

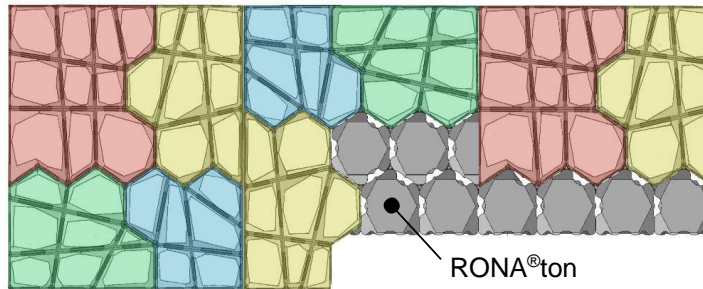


Figuur 1.3 Plaatsing op het dijktalud: 'portrait' en om en om 180° gedraaid

Grote zetstenen hebben echter als nadeel dat het lastiger is om ze aan te sluiten op overgangen of objecten in het taludoppervlak. Bij RONA[®]ton XL is dit opgelost door de vorm zo te maken dat de zetstenen gecombineerd kunnen worden met RONA[®]ton (Klein Breteler 2016a), zie Figuur 1.4. Daarbij geldt dat de RONA[®]ton uiteraard gedimensioneerd moet worden met de eigen stabiliteitsfactor. Bovendien kan dit betekenen dat er iets makkelijker vervorming kan optreden in de bekleding door de kleine RONA[®]ton zetstenen. Dit zal verwaarloosbaar zijn bij de toepassing van een enkele rij RONA[®]ton, zoals langs een verticale overgang (van kruin naar teen, langs bijvoorbeeld een sluismuur). Maar als er meerdere naast elkaar worden gebruikt, dan is het raadzaam om ook de aangrenzende RONA[®]ton XL te

dimensioneren met de stabiliteitsfactor van RONA[®]ton, of de bekleding lokaal te versterken, bijvoorbeeld door middel van gietasfalt of beton.

Verder hebben de zetstenen ontwateringsgleuven om te zorgen dat de doorlatendheid voldoende gespreid is. Dit draagt bij aan het verminderen van de opwaartse verschildruk tijdens golfaanval.



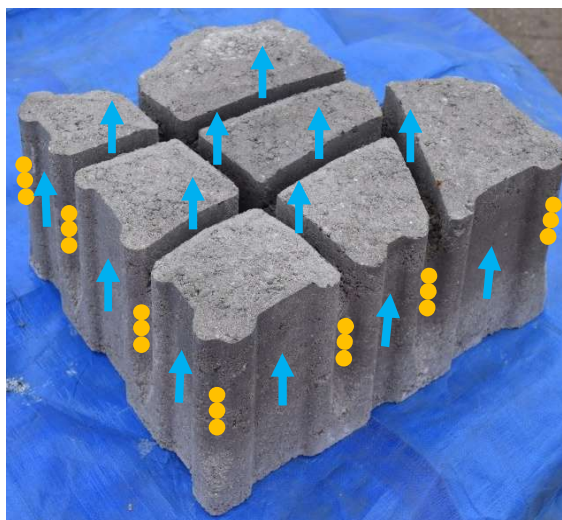
Figuur 1.4 RONA[®]ton XL in combinatie met RONA[®]ton

De zetstenen hebben vrij grote afmetingen, zie Tabel 1-1 en Fig. B-1, terwijl toch de doorlatendheid relatief goed gespreid is. De vier zetstenen vormen samen een set van 58,3x70,4 cm² (overeenkomend met 97x118 cm in werkelijkheid). De sets worden om en om 180° gedraaid op het dijktafvlak geplaatst, zodat de grote zetstenen de kleinere ondersteunen.

Er is een relatief open oppervlak van 10,5%, terwijl elke opening toch zo klein is dat het onderliggende filtermateriaal niet kan uitspoelen.

	Model in Deltagoot		Ware grootte	
	Lengte (cm)	Breedte (cm)	Lengte (cm)	Breedte (cm)
Zetsteen 1	33,3	43,9	55,6	73,3
Zetsteen 2	33,3	44,0	55,6	73,5
Zetsteen 3	33,3	29,5	55,6	49,3
Zetsteen 4	33,0	26,6	55,1	44,4
Set (4 zetstenen)	58,3	70,4	97,4	117,6

Tabel 1-1, Afmetingen van de zetstenen (zie ook Fig. B-1)



↑ = ontwateringsgat ●● = splitkelk

Figuur 1.5 Splitkelken en ontwateringsgaten

De zetstenen zijn voorzien van splitkelken, die van onderen vernauwen, en ontwateringsgaten, zie Figuur 1.5. De ervaring met RONA[®]ton heeft geleerd dat splitkelken het inwasmateriaal beter vasthouden en zorgen voor een optimale interactie tussen de zetstenen, terwijl de ontwateringsgaten makkelijker leegspoelen en daardoor goed waterdoorlatend zijn om overdrukken of te voeren. Naar aanleiding van deze positieve ervaring zijn de splitkelken en ontwateringsgaten ook toegepast bij RONA[®]ton XL.

2 Schaling

2.1 Algemeen

Voor steenzettingen geldt dat naarmate een modelopstelling kleiner is dan de ware grootte, het moeilijker wordt om proefresultaten te vertalen naar de ware grootte, vanwege strijdige schaalregels voor de golven en voor de 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 voor steenzettingen de proefresultaten met de huidige kennis niet meer voldoende nauwkeurig te vertalen (Bezuijen e.a. 1990), en bij een schaal van bijvoorbeeld 1:10 is het vooralsnog onmogelijk. Daarom is dit experimenteel onderzoek uitgevoerd op een zo groot mogelijke schaal. Er is gekozen voor een geometrische schaal van 1:1,67.

Een geometrische schaal van 1:1,67 houdt in dat alle afmetingen van de zetstenen in de modelopstelling 1,67 maal zo klein zijn als die op ware grootte. Dit geldt voor zowel de verticale als horizontale afmetingen van de zetstenen (hoogte, lengte en breedte), met behoud van de vorm van de zetsteen.

Voor het onderhavige onderzoek is RONA[®]ton XL als uitgangspunt genomen die op ware grootte circa 30 cm hoog is. De zuilen zijn speciaal voor het onderzoek op schaal gemaakt door Haringman Betonwaren. Daarvoor zijn speciale mallen gemaakt, waarbij alle maten een factor 1,67 kleiner zijn gekozen dan die op ware grootte. Dit resulteerde in verschaalde zuilen met een gemiddelde zuilhoogte $D = 18,0$ cm, wat overeen komt met een zuilhoogte op ware grootte van $D = 30$ cm.

In een schaalmodel met schaal 1:1,67 zijn ook de golven (golfhoogte en golflengte) 1,67 maal zo klein als die op ware grootte. De taludhelling is wel gelijk aan die op ware grootte, evenals de soortelijke massa van de zetstenen. Dit is onderstaand nader toegelicht.



Figuur 2.1 Golfbelasting op RONA[®]ton XL

2.2 Schaling van de golven

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 golven op 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:

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gL}} \quad (1.1)$$

Met:

Fr = Froude getal (-)

u = snelheid (m/s)

g = versnelling als gevolg van de zwaartekracht (m/s²)

L = karakteristieke lengte (bijvoorbeeld de waterdiepte) (m)

Voor het beproefde schaalmodel is de schaling uitgewerkt voor een lengteschaal $n_L = L_{\text{prototype}}/L_{\text{model}} = 1,67$. Uit de bovenstaande Froude schaalregel zijn dan de volgende verbanden af te leiden:

- Golfhoogte: $n_H = n_L$, in dit geval dus: $n_H = 1,67$
- Tijdschaal (proefduur, golfperiode): $n_t = \sqrt{n_L}$, in dit geval dus: $n_t = \sqrt{1,67} \approx 1,29$
- Snelheid (voortplantingssnelheid van golven): $n_u = \sqrt{n_L}$, in dit geval dus: $n_u = \sqrt{1,67} \approx 1,29$

De Froude schaling is gebruikt voor het bepalen van de golfcondities.

2.3 Schaling van dimensieloze parameters

Dimensieloze parameters dienen niet verschaald te worden. Voorbeelden van dimensieloze parameters zijn de taludhelling ($\tan\alpha$) en de relatieve soortelijke massa van de zetstenen (Δ). De relatieve soortelijke massa van de zetstenen is beschreven met de volgende formule:

$$\Delta = \frac{(\rho_s - \rho_w)}{\rho_w} \quad (1.2)$$

Met:

Δ = relatieve soortelijke massa van de zetstenen ten opzichte van het water (-)

ρ_s = soortelijke massa van de zetstenen (volgens NEN-7024) (kg/m³)

ρ_w = soortelijke massa van het water (kg/m³)

Uit formule (1.2) 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 $H_{m0}/(\Delta D)$. De belastingparameter kan worden gezien als de verhouding tussen de golfbelasting (de golfhoogte H_{m0}) en het gewicht van de steenzetting (relatieve soortelijke massa Δ en toplaagdikte D). In de belastingparameter wordt gebruik gemaakt van de volgende symbolen:

H_{m0} = significante golfhoogte (m)

Δ = relatieve soortelijke massa van de zetstenen ten opzichte van het water (-)

D = dikte van de toplaag van RONA[®]ton XL, gedefinieerd als de afstand tussen de boven- en onderzijde van de zuilen, loodrecht op het talud gemeten (m)

In de belastingparameter is Δ dimensieloos en zijn H_{m0} en D uitgedrukt in lengte-eenheden die verschaald worden met de lengteschaal. De belastingparameter is daardoor dimensieloos en is in het schaalmodel dus hetzelfde als in de werkelijke situatie.

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:

$$Re = \frac{L \cdot u}{\nu} \quad (1.3)$$

Met:

Re = Reynolds getal (-)

L = karakteristieke lengte (bijvoorbeeld de korrelgrootte) (m)

u = snelheid of doorlatendheid (m/s)

ν = kinematische viscositeit (voor water: ca. $1,2 \cdot 10^{-6}$) (m²/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 schaal-effecten verwaarloosbaar. Het huidige onderzoek ($n_L = 1,67$) voldoet hier dus ruimschoots aan.

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

$$\Lambda = \sqrt{\frac{kbD}{k'}} \quad (1.4)$$

Met:

Λ = leklengte (m)

b = dikte van de filterlaag (m)

k = doorlatendheid van de filterlaag (m/s)

D = dikte van de toplaag (m)

k' = doorlatendheid van de toplaag (m/s)

De leklengte heeft de dimensie m en schaalt met de lengteschaal: $n_\Lambda = n_L = 1,67$. Met het rekenmodel Steentoets is de leklengte op ware grootte en in het schaalmodel berekend. Voor deze berekeningen is gebruikgemaakt van Steentoets versie v20.1.1 zonder stabiliteitsfactor (Klein Breteler e.a., 2020). In de berekeningen is uitgegaan van inwasmateriaal met korrelgrootte $D_{f15} = 11,6$ mm in het schaalmodel (betreft de gemeten waarde, zie hoofdstuk 3) en $D_{f15} = 19,4$ mm op ware grootte.

Uit de berekeningen is gebleken dat bij schaal van 1:1,67 in de modelopstelling een filterlaag met laagdikte van ongeveer $b = 8$ cm en korrelgrootte $D_{f15} = 9$ à 14 mm goed overeenkomt met onder andere de volgende filterlaagdiktes en korrelgroottes van steenzettingen op ware grootte: $b = 13$ cm in combinatie met $D_{f15} = 16$ à 23 mm, of met $D_{f15} = 20$ mm in combinatie met $b = 11$ à 13 cm.

Ter illustratie is in Tabel 2.1 voor de situatie op ware grootte en voor de situatie in de Deltagoot weergegeven welke combinatie van parameters resulteren in een vergelijkbare leklengte, uitgaande van verscaling van de leklengte met de lengteschaal $n_L = 1,67$. Opgemerkt wordt dat een iets andere combinatie van parameters kan resulteren in dezelfde leklengte.

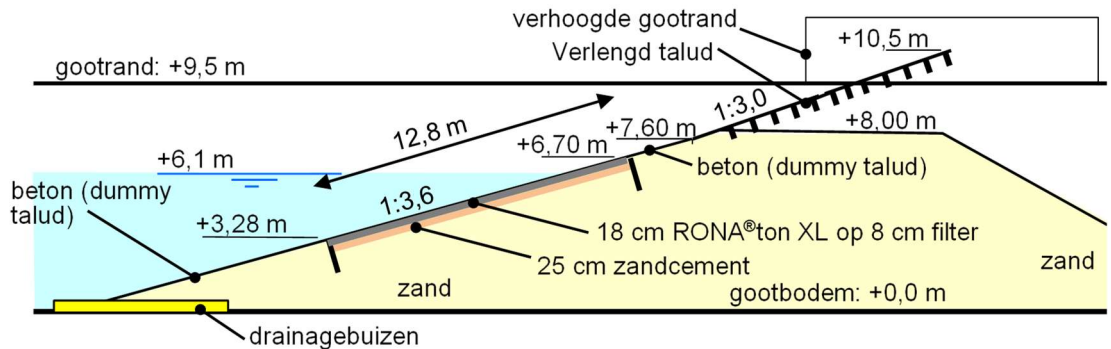
Parameter	Symbool	Eenheid	Waarde op ware grootte	Waarde op schaal (indicatief)
dikte van de toplaag	D	(m)	0,30	0,180
open oppervlak	Ω	(%)	10,5	10,5
filterlaagdikte	B	(m)	0,13	0,08
korrelgrootte filter	D_{r15}	(mm)	18	11,2
korrelgrootte inwasmateriaal	D_{i15}	(mm)	19	11,6
toplaagdoorlatendheid	k'	(mm/s)	76	56
leklengte	Λ	(m)	0,33	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).

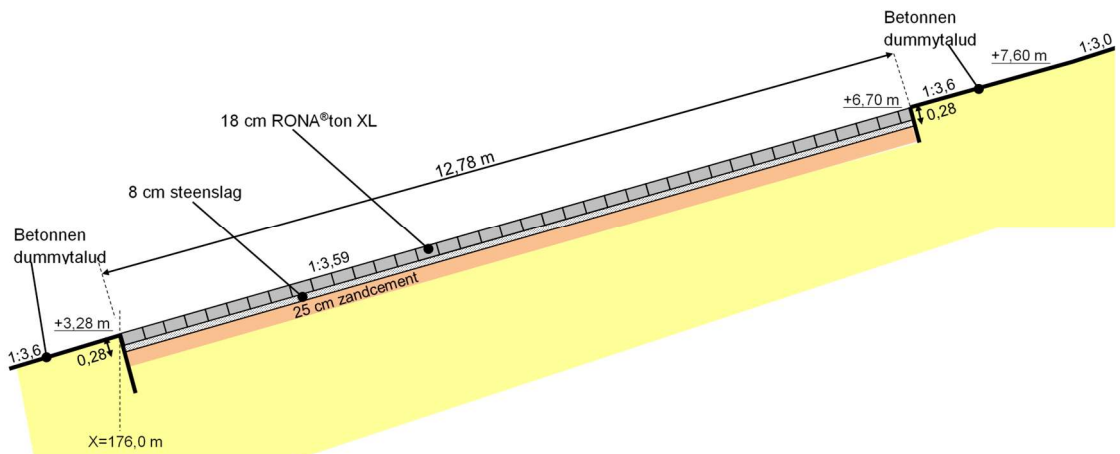
Omdat in de praktijk mogelijk diverse soorten filtermateriaal en diverse filterlaagdiktes worden toegepast, kunnen in het schaalmodel binnen bepaalde grenzen ook andere waarden gebruikt worden.

3 Modelopstelling

In de Deltagoot is een dijk gebouwd met een steenzetting van RONA[®]ton XL op een laagje steenslag, zoals dat ook op een werkelijke dijk gebouwd zou worden. De afmetingen van de dijk en de dijkbekleding zijn echter aangepast (zie ook hoofdstuk 2), omdat de Deltagoot een beperkte capaciteit heeft qua golfhoogte. Daarom is een schaalmodel gebouwd met schaal 1:1,67.



Figuur 3.1 Langsdoorsnede van de modelopstelling



Figuur 3.2 Langsdoorsnede van modelsectie

De dwarsdoorsnede van de modelopstelling is gegeven in Figuur 3.1. De opstelling bestaat uit een dijklichaam van zand dat vanaf de gootbodem tot het niveau +3,28 m boven de gootbodem en vanaf het niveau +6,70 m tot +8,00 m bekleed is met een laag zandcement. Daartussen is de modelsectie aangebracht, zie Figuur 3.2. Boven +8,00 m was het talud van hout tot een niveau +10,5 m boven de gootbodem.

Het relevante deel van het talud had een taludhelling van 1:3,59. Boven het niveau +7,60 m boven de gootbodem was het talud iets steiler, namelijk 1:3. Dit steilere deel heeft echter geen invloed op de hydraulische belasting of stabiliteit van de RONA[®]ton XL.

In de modelsectie (+3,28 m – +6,70 m) is op het zand van het dijklichaam een laag zandcement aangebracht, die de kleilaag simuleert die normaal gesproken toegepast wordt op dijken (zie Fig. E-1 in Bijlage E). Door geen klei maar zandcement toe te passen was de modelopstelling eenvoudiger te bouwen, terwijl dit geen invloed heeft op de stabiliteit van de RONA[®]ton XL.

Bovenop de zandcementlaag van de meetsectie is een geotextiel toegepast zoals dat gebruikelijk is op een kleilaag. Op het geotextiel is een filterlaag aangebracht met steenslag

van Noors graniet (zie Fig. E-2). Op basis van vele metingen tijdens het zetten van de steenzetting is vastgesteld dat de gemiddelde dikte van deze laag 8,0 cm is (zie tabel A-1). Het gebruikte filtermateriaal heeft een korrelgrootte van 10 – 30 mm ($D_{f15} = 11,2$ mm). De zeefkromme van het filtermateriaal is te vinden in Fig. B-2.

Op het filtermateriaal is de steenzetting aangebracht van RONA[®]ton XL. De maten op modelschaal van de RONA[®]ton XL zijn gegeven in Fig. B-1 (Bijlage B). Na het aanbrengen van de steenzetting is deze ingewassen met steenslag (Noors graniet) met $D_{15} = 11,6$ mm. De zeefkromme hiervan staat in Fig. B-3. Voor het plaatsen van de RONA[®]ton XL is gebruikgemaakt van een minikraan met sorteerknipper. Op deze wijze werden de sets op dezelfde wijze als in werkelijkheid op het talud geplaatst, zie Figuur 3.3.

De belangrijkste afmetingen van het schaalmodel zijn als volgt:

- taludhelling: 1:3,59
- gemiddelde topplagdikte: $D = 0,180$ m
- gemiddelde soortelijke massa van de zetstenen: $\rho_z = 2318$ kg/m³
- gemiddelde filterlaagdikte: 0,080 m
- korrelgrootte van het filter: 11-26 mm, $D_{f15} = 11,2$ mm
- korrelgrootte van het inwasmateriaal: 12-21 mm, $D_{i15} = 11,6$ mm
- geotextiel: Geopex TB PPHT Z 320



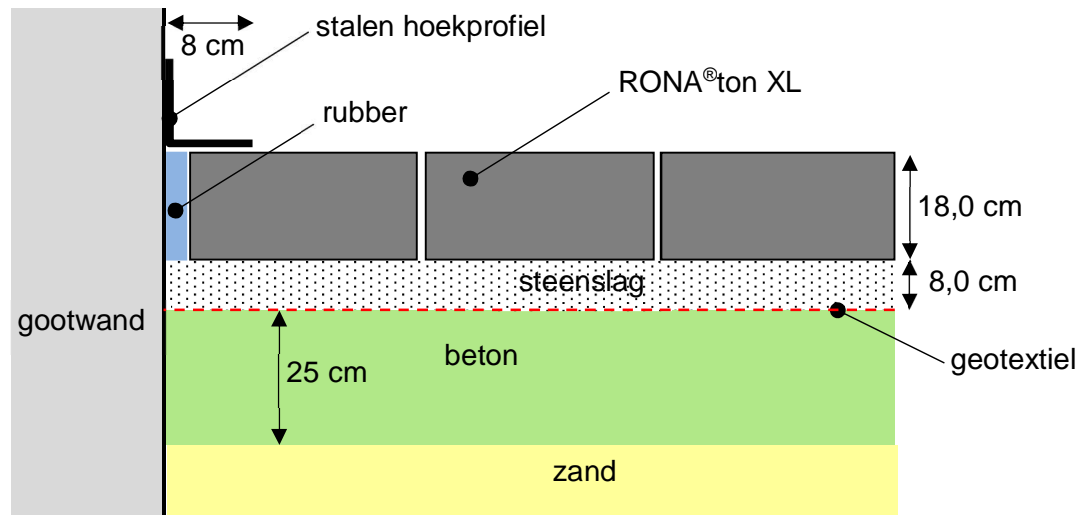
Figuur 3.3 Plaatsing van RONA[®]ton XL op het filter met minikraantje met sorteerknipper (zie ook Fig. E-3)

Bij 14 zetstenen is de soortelijke massa van de RONA[®]ton XL bepaald nadat deze lange tijd in het water waren gezet. Deze was gemiddeld 2318 kg/m³ met een standaardafwijking van 27 kg/m³. Gezien het feit dat het om een goed geklemde steenzetting gaat, is de gemiddelde zuilhoogte en soortelijke massa maatgevend.

Het open oppervlak aan de onderzijde van de RONA[®]ton XL (zie definitie in NEN-7024) is bepaald aan de hand van de Autocat tekening van de mal waarmee de zetstenen zijn gemaakt. Alle afmetingen zijn gecontroleerd aan de hand van enkele zetstenen.

Tussen de gootwand en de zetstenen is een strook rubber van 1,2 cm dikte aangebracht, zie Figuur 3.4 en Fig. E-6). 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 (zie Fig. E-7).



Figuur 3.4 Aansluiting van de steenzetting tegen de gootwand (schematische dwarsdoorsnede).

4 Proefresultaten en observaties

4.1 Proevenprogramma

De steenzetting is achtereenvolgens beproefd met de volgende drie proevenseries:

- Series 1 en 2: eerst zijn twee proevenseries met korteduurproeven (circa 1000 golven per proef) uitgevoerd. Per serie zijn alle proeven uitgevoerd met dezelfde golfsteilheid. De proeven van serie 1 zijn uitgevoerd met relatief lange golven (golfsteilheid van 2%), en de proeven van serie 2 zijn uitgevoerd met relatief korte golven (golfsteilheid van 4%). Binnen deze series is de golfhoogte bij elke volgende proef weer een stukje verhoogd totdat de maximaal op te wekken golfhoogte was bereikt.
- Serie 3: tijdens de laatste serie (serie 3) is een langeduurproef uitgevoerd met gelijkblijvende golfcondities. Deze serie geeft inzicht in de langeduursterkte van de bekleding. De langeduurproef van serie 3 is uitgevoerd met dezelfde golfsteilheid als serie 2 en de grootst mogelijke golven. De langeduurproef is in delen uitgevoerd om tussentijds de eventuele vervorming/schade te kunnen monitoren.



Figuur 4.1 Golfbelasting op talud met RONA®ton XL tijdens ingolfproef (proef RXL-01)

De gerealiseerde golfcondities (in modelwaarden) zijn weergegeven in Tabel 4-1. Alle proeven zijn uitgevoerd met onregelmatige golven. De golfcondities van de proeven worden gekarakteriseerd door de inkomende significante golfhoogte (H_{m0}) en de piekperiode (T_p). Alle proeven zijn uitgevoerd met een Jonswap spectrum. Dit spectrum is representatief voor de golfcondities langs de Nederlandse primaire waterkeringen en Noordzee.

De vermelde schade-categorie staat nader toegelicht in Bijlage D.

De genoemde waarden in Tabel 4-1 betreffen de condities zoals gemeten in de Deltagoot (schaal 1:1,67). De overeenkomstige belastingduur is op ware grootte $\sqrt{1,67} = 1,29$ groter dan de duur op modelschaal zoals aangegeven in Tabel 4-1 (zie paragraaf 2.2).

In de tabel zijn de volgende parameters gebruikt:

h = waterstand (m, t.o.v. de gootbodem)

H_{m0} = significante golfhoogte (m)

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

$T_{m-1,0}$ = spectrale golfperiode (s)

s_{op} = golfsteilheid op basis van de piekperiode: $s_{op} = H_{m0}/((g/2\pi) \cdot T_p^2)$ (-)

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

α = taludhelling ($^\circ$)

N = aantal golven (-)

$H_s/(\Delta D)$ = belastingparameter (-)

serie	proef	h (m)	H_{m0} (m)	T_p (s)	Duur (uur)	Aantal golven	s_{op} (-)	$H_{m0}/(\Delta D)$	Schade*
1	RXL-01	5,80	1,02	5,66	1,00	799	0,020	4,28	a
1	RXL-02	6,10	1,46	6,73	1,68	1171	0,021	6,17	a
1	RXL-03	6,10	1,66	7,11	1,75	1108	0,021	7,01	a
1	RXL-04	6,10	1,87	7,57	1,92	1244	0,021	7,88	a
1	RXL-05	6,10	2,04	7,98	2,05	1254	0,021	8,59	a
2	RXL-06	6,10	1,65	5,07	1,30	1118	0,041	6,97	a
2	RXL-07	6,10	1,81	5,38	1,37	1112	0,040	7,61	a
2&3	RXL-08	6,10	2,00	5,66	1,46	1132	0,040	8,43	a
3	RXL-09	6,10	1,99	5,70	1,00	780	0,039	8,38	a
3	RXL-10	6,10	2,01	5,64	2,08	1600	0,041	8,47	a
3	RXL-11	6,10	2,04	5,77	6,00	4576	0,039	8,59	b
3	RXL-12	6,10	2,00	5,75	3,50	2652	0,039	8,42	c
3	RXL-13	6,10	1,98	5,74	1,16	887	0,038	8,32	d
Serie 3 tot schade		6,10	2,02	5,72	11*	8400*	0,040	8,52	

Tabel 4-1 Gerealiseerde golfcondities (zie ook tabel A-2)(* = tot schadecategorie c, wat neerkomt op 10% van proef RXL-12, zie par. 4.2.2)

De golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidspectra van de uitgevoerde proeven zijn weergegeven in Bijlage B, Fig. B-8 t/m Fig. B-10.

Na elke proef van de series 1 en 2 is het uitgespoelde inwasmateriaal weer aangevuld, zodat de afzonderlijke proeven als onafhankelijk van elkaar kunnen worden beschouwd. Tijdens serie 3 (langeduurproef) is de bekleding niet tussentijds gewassen.

Aan het begin van proevenserie 1 is op de nieuw aangelegde steenzetting eerst een ingolfproef (RXL-01) met bescheiden golfhoogte uitgevoerd met een duur van een uur om de steenzetting en het inwasmateriaal zich zo goed mogelijk te laten zetten. Deze ingolfproef is uitgevoerd met een waterstand van 5,8 m boven de gootbodem. Tijdens de andere proeven is een waterstand aangehouden van 6,1 m boven de gootbodem. Na afloop van elke proef is de waterstand verlaagd en de bekleding geïnspecteerd om te zien of er al vervorming of schade was ontstaan en te zien hoeveel inwasmateriaal er is uitgespoeld.

Voor de karakterisering van de schade zijn de categorieën uit bijlage D gehanteerd.

De langeduurproef is in delen uitgevoerd, namelijk RXL-08 t/m RXL-13. Voor het samenstellen van de golfcondities is gebruik gemaakt van de volgende formules:

$$H_{sN} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i H_{si}^2)}{\sum_{i=1}^n N_i}} \quad (1.5)$$

$$T_{pN} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i H_{si}^2 T_{pi})}{H_{sN}^2 \sum_{i=1}^n N_i} \quad (1.6)$$

Met:

$T_{m-1,0,i}$ = spectrale golfperiode in proef i (s)

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)



Figuur 4.2 Golfbelasting tijdens proef RXL-11

Met deze formules is berekend dat de gemiddelde golfcondities tijdens de langeduurproef tot het moment dat de schade van de categorie c werd, als volgt waren:

- $H_{m0} = 2,02$ m
- $T_p = 5,72$ s ($S_{op} = 0,040$)
- $T_{m-1,0} = 5,20$ s ($S_{om} = 0,046$)
- Aantal golven: 8400
- Duur: 11 uur

4.2 Waarnemingen tijdens en na de proeven

4.2.1 Tijdens de proeven

Tijdens de proeven is de steenzetting visueel gemonitord om te controleren of er schade ontstaat. Toen tijdens proef RXL-13 er een zetsteen uit de bekleding spoelde, is de proef direct stopgezet.

De visuele waarnemingen tijdens de proeven werden helaas sterk bemoeilijkt door het turbulente water op de bekleding, zie Figuur 4.3.



Figuur 4.3 Visuele waarnemingen tijdens de proeven werden bemoeilijkt door de heftige waterbeweging

4.2.2 Vervorming van het taludoppervlak

Naast deze visuele inspectie zijn er na afloop van de proeven metingen uitgevoerd om de vervorming en eventuele schade kwantitatief vast te stellen. Met behulp van een laserscanner is het niveau van het taludoppervlak in detail ingemeten om vervormingen van het talud door de golfbelasting vast te kunnen stellen. Hierbij is het verschil tussen de laserscan voor en na een bepaalde proef in een figuur weergegeven. Tijdens de langeduurproeven is steeds het verschil ten opzichte van de laserscan van na proef RXL-07 weergegeven (begin van de langeduurproef).

De figuren met de resultaten van de laserscans zijn gegeven in Bijlage B, namelijk Fig. B-4 t/m Fig. B-7. De laserscans van de eerste vier proeven lieten geen vervorming zien en in Fig. B-4 en Fig. B-5 is te zien dat ook tijdens proef RXL-05 t/m RXL-08 er nauwelijks vervorming is.

Pas na 4,5 uur golven (na proef RXL-10) tijdens de langeduurproef ging de vervorming duidelijk groeien, zie Fig. B-6 (links). In het gele gebied is de steenzetting ongeveer 1 cm omhoog gekomen en in het oranje gebied is de steenzetting ongeveer 1,5 cm gezakt. Dat betekent dat er een S-profiel aan het ontwikkelen is met een amplitude van ruim 1 cm.

Na totaal 10,5 uur golven (na proef RXL-11) tijdens de langeduurproef is dit S-profiel flink gegroeid, zie Fig. B-6 (rechts). In het lichtgroene gebied is de steenzetting 6,5 cm omhoog

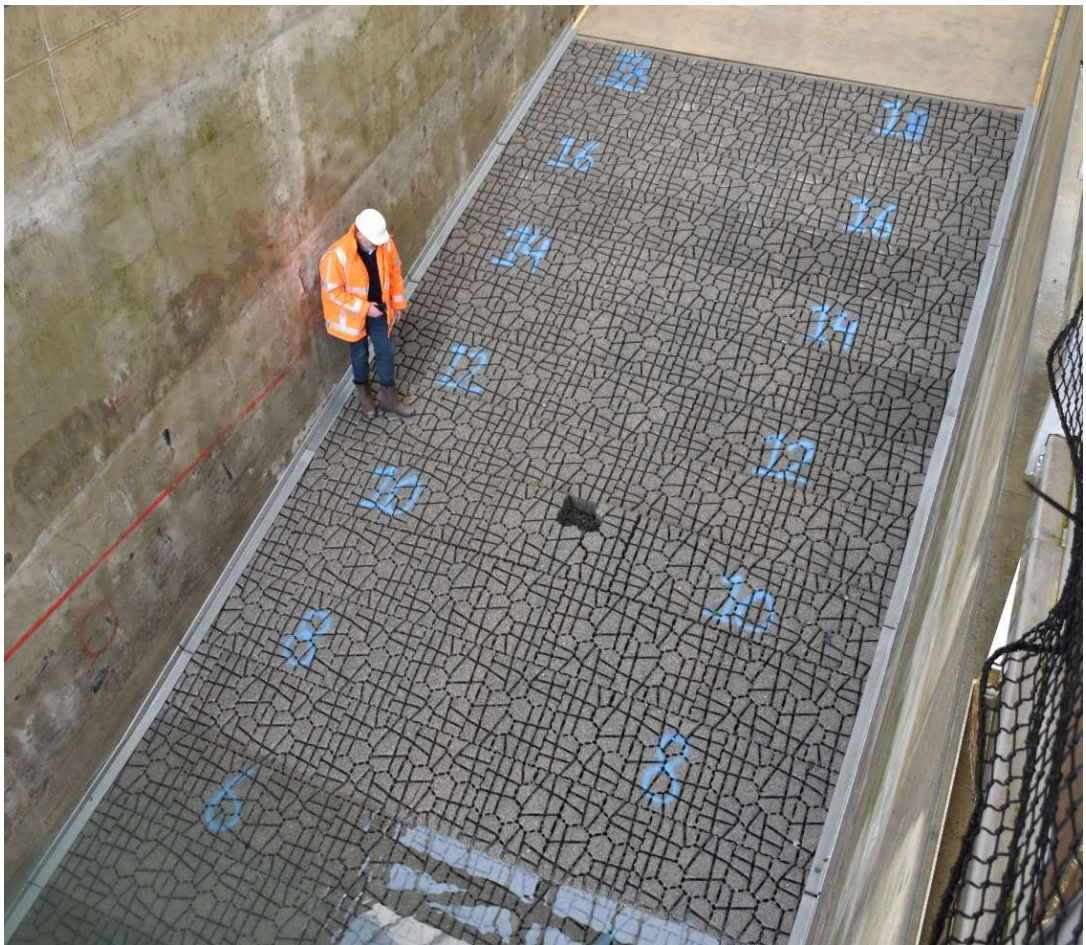
gekomen en in het rode gebied 3,5 cm omlaag. De amplitude van de vervorming is daardoor 5 cm.

De naast elkaar gelegen zetstenen hebben in deze fase van de langeduurproef nog nauwelijks enig hoogteverschil. Dit blijft nog beperkt tot minder dan 1 cm. Maar in bijlage D is te zien dat ook de vorming van een S-profiel wordt meegeteld bij het bepalen van de schadecategorie. Bij een S-profiel met amplitude van meer dan 20% van de toplaagdikte, dus 3,6 cm, is er sprake van schadecategorie b. Bij meer dan 30% van de toplaagdikte is er sprake van schadecategorie c, dus bij een amplitude van 5,4 cm.

Dit betekent dat er sprake is van een schade van categorie b na proef RXL-10.



Figuur 4.4 Vervorming van de steenzetting na proef RXL-12 (zie ook Fig. B-7 links)



Figuur 4.5 Een zetsteen is tijdens RXL-13 uit de bekleding gespoeld

Tijdens proef RXL-12 groeide het S-profiel verder, zoals te zien is in Figuur 4.4 en Fig. B-7 (links). De amplitude van het S-profiel is dan gegroeid naar ruim 8 cm. Dat is schadecategorie c waardoor de steenzetting als bezweken wordt beschouwd.

Gezien de snelheid waarmee het S-profiel is gegroeid tijdens proef RXL-12 kan gesteld worden dat na ongeveer 10% van deze proef de grens van schadecategorie c is bereikt. Dat betekent dat na totaal 11 uur golven tijdens de langeduurproef de steenzetting bezweken is (overgang van schadecategorie b naar c).

Tijdens de laatste proef is een zetsteen uit het talud gekomen en is er sprake van schadecategorie d (na totaal 15,2 uur golven tijdens de langeduurproeven, zie Figuur 4.5).

4.2.3 Uitspoeling van het inwasmateriaal

Na afloop van elke proef is visueel bekeken in hoeverre het inwasmateriaal was uitgespoeld. Dit bleek tijdens de korteduurproeven (serie 1 en 2) in de golfklapzone slechts enkele centimeters te zijn. Dit is na enkele proeven precies opgemeten, zie Bijlage A, Tabel A-3 t/m A6.

Na elke proef van de eerste twee series is het inwasmateriaal weer aangevuld, behalve bij de langeduurproeven. Tijdens de eerste twee proeven (RXL-01 en RXL-02) was hiervoor ongeveer 150 à 200 liter nodig. Bij proef RXL-04 was dit opgelopen tot 400 liter. De gemeten uitspoeling van het inwasmateriaal was toen in de golfklapzone 4 à 5 cm, zie Tabel A-3.

Na proef RXL-08 was 4 à 5 cm van het inwasmateriaal uitgespoeld gedurende de anderhalf uur durende proef, zie Tabel A-4. Dit was de eerste proef van de langeduurproeven, waarbij niet meer tussen de proeven is ingewassen. Er is toen ook gekeken of er verschil is tussen de uitspoeling uit de ontwateringsgaten en de splitkelken. Hoewel visueel het leek alsof de steenslag meer uitspoelt uit de ontwateringsgaten, komt dat niet direct tot uiting in de metingen na proef RXL-08.



Figuur 4.6 Indruk van het resterende Inwasmateriaal na proef RXL-10 in rij 10

Na proef RXL-09, na totaal 2,5 uur golven, was de mate van uitspoeling in de golfklapzone nog ongeveer hetzelfde (4 à 5 cm), zie Tabel A-5. Na proef RXL-09, na totaal 10,5 uur golven, was de uitspoeling in de golfklapzone toegenomen naar ongeveer 5 à 9 cm, zie Tabel A-6.

Na proef RXL-12, toen er wat meer was uitgespoeld, was er wel een duidelijk verschil tussen de uitwateringsgaten en de splitkelken, zie Tabel A-7. Toen was er gemiddeld 25% meer

uitgespoeld uit de uitwateringsgaten als gekeken wordt naar de zone met de meeste uitspoeling (zwaarste belasting: rij 8 t/m 14). Na proef RXL-13 was dit zelfs gegroeid naar ruim 60% (Tabel A-8).

5 Stabiliteitsfactor

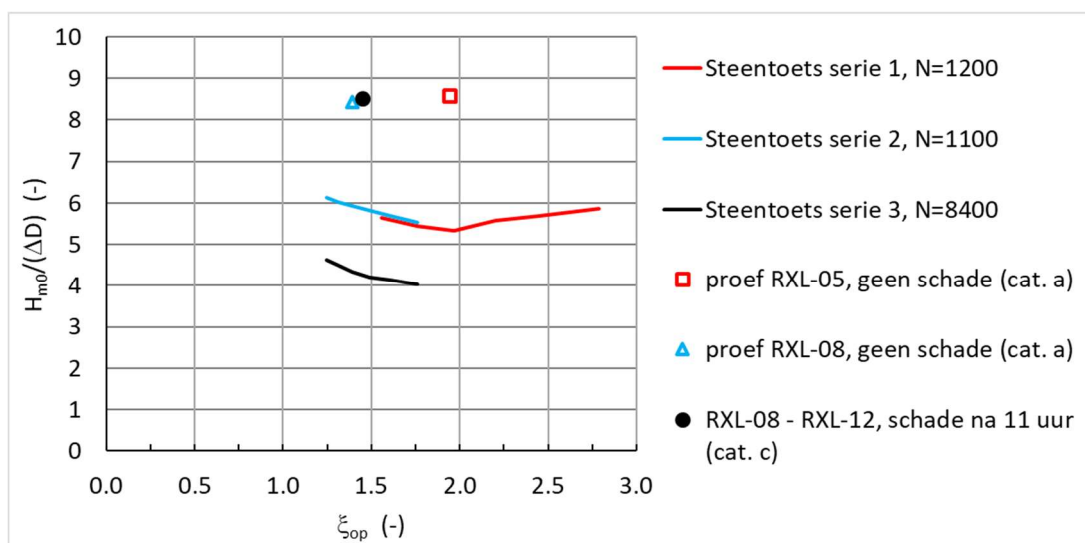
5.1 Gemeten stabiliteit ten opzichte van de met Steentoets berekende stabiliteit

Voor elke proevenserie is met Steentoets berekend bij welke significante golfhoogte de steenzetting volgens Steentoets versie 20.1.1 (Klein Breteler e.a., 2020) zou bezwijken. De resultaten zijn gegeven in Tabel 5.1. Hierbij is ook de bijbehorende belastingparameter $H_s/(\Delta D)$ vermeld.

Bij de berekening met Steentoets is gebruikgemaakt van de modelwaarden zoals deze gemeten zijn in de Deltagoot en een stabiliteitsfactor gelijk aan 1,0. De berekeningen zijn gebaseerd op de gemeten golfsteilheid S_{op} (op basis van de golfperiode bij de piek van het spectrum T_p).

serie	invoer		resultaat		
	S_{op} [-]	N [-]	H_{m0} [m]	ξ_{op} [m]	$H_{m0}/(\Delta D)$ [-]
1	0,02	1200	1,27	1,97	5,34
2	0,04	1100	1,41	1,39	5,93
3	0,04	8337	1,03	1,39	4,34

Tabel 5.1 Resultaten van de berekeningen met Steentoets met stabiliteitsfactor gelijk aan 1,0.



Figuur 5.1 Resultaten van de belangrijkste proeven en de overeenkomstige berekeningen met Steentoets.

Tijdens de proeven in de Deltagoot is echter geen schade vastgesteld aan het eind van de eerste twee proevenseries: schadecategorie a. De resultaten van de proeven en de Steentoetsberekeningen zijn grafisch weergegeven in Figuur 5.1. Op de horizontale as staat de brekerparameter ξ_{op} (gebaseerd op de piekperiode T_p). Op de verticale as staat de belastingparameter $H_s/(\Delta D)$ op basis van de gemiddelde soortelijke massa.

Van de eerste twee series is de proef weergegeven met de hoogste significante golfhoogte. Daarbij was er geen schade opgetreden. Van de derde serie is het schadepunt gegeven. De lijnen geven de resultaten van Steentoetsberekeningen, waarbij de golfsteilheid wat gevarieerd is rond de waarde die toegepast is tijdens de proevenseries. De meetpunten en lijnen met dezelfde kleur horen bij elkaar.

In de figuur is te zien dat alle meetpunten ruim boven de lijnen liggen die met Steentoets zijn berekend. De stabiliteit van RONA[®]ton XL is dus beduidend hoger dan wat Steentoets berekend met een stabiliteitsfactor van 1,0. Dat betekent dat de stabiliteitsfactor groter moet zijn dan 1,0.

5.2 Stabiliteitsfactor

De stabiliteitsfactor voor RONA[®]ton XL is berekend op basis van de uitgevoerde proeven in de Deltagoot. 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 stabiliteitsfactor), zal in het programma gedeeld worden door de stabiliteitsfactor om zo rekening te houden met de specifieke stabiliteit van het betreffende type steenzetting. Door toepassing van de stabiliteitsfactor zal een type steenzetting met een hoge stabiliteitsfactor (die goed scoorde tijdens de Deltagootproeven) in een concreet ontwerp een kleinere toplaagdikte nodig hebben dan een type steenzetting met een lage stabiliteitsfactor. De daarvoor vastgestelde procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor op basis van de Deltagootproeven is gedetailleerd beschreven in bijlage C (Klein Breteler, 2015).

In de procedure is aangegeven hoe de proefresultaten geïnterpreteerd moeten worden, zie bijlage C.2. Omdat alleen tijdens de langeduurproef er schade is ontstaan aan de RONA[®]ton XL, komen we in deze interpretatieprocedure uit op punt 3 uit de lijst:

- Ga ervan uit dat bij een 15% hogere golfhoogte er schade zou zijn opgetreden tijdens de eerste proevenserie met lange golven.
- Bereken met Steentoets een schatting van de golfhoogte bij bezwijken van de tweede proevenserie (met korte golven) op basis van het resultaat van de langeduurproef (met korte golven).

De golfhoogte bij het bezwijken van de steenzetting is voor de eerste proevenserie gelijk aan het gemiddelde van de golfhoogte waarbij er van uitgegaan wordt dat bezwijken is opgetreden (schadecategorie c of d) en de golfhoogte van de proef met de hoogste golfhoogte waarbij nog geen bezwijken is opgetreden (schadecategorie a of b).

Dit betekent dat voor het afleiden van de stabiliteitsfactor gerekend wordt alsof er schade is ontstaan bij de volgende condities:

- Eerste serie:
 - schatting schadeproef: $H_{m0} = 2,04 \cdot 1,15 = 2,35$ m.
 - golfhoogte bij bezwijken: $H_{m0} = (2,04 + 2,35)/2 = 2,19$ m.
- Tweede serie:
 - bij een toplaagdikte van 0,285 m is de bezwijkgolfhoogte volgens Steentoets gelijk aan die in de langeduurproef bij de betreffende belastingduur (11 uur met $H_{m0} = 2,02$ m).
 - Bij die toplaagdikte is de golfhoogte bij bezwijken bij een belastingduur van 1100 golven volgens Steentoets: $H_{m0} = 2,33$ m. Die golfhoogte geldt als schatting van de bezwijkgolfhoogte in de tweede serie.
- Derde serie: bezwijkgolfhoogte $H_{m0} = 2,02$ m na 8400 golven (11 uur)

Conform de procedure wordt de stabiliteitsfactor op basis van deze gegevens bepaald met de volgende formule:

$$f_{stab} = \left(\frac{D_{Steentoets}}{D_{in\ modelproeven}} - \frac{D_{Steentoets}}{D_{ST\ eigen\ gewicht}} \right) / \gamma + \frac{D_{Steentoets}}{D_{ST\ eigen\ gewicht}} \quad (1.7)$$

$$\gamma = 1,1 + 1,89 \cdot \sigma \quad (1.8)$$

Met:

- D_{ST} eigen gewicht = de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets, als gerekend wordt met alleen het eigen gewicht (als blok zonder klemming; met stabiliteitsfactor = 1), bij een golfhoogte gelijk aan die toegepast is in de Deltagoot (m)
- $D_{Steentoets}$ = de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets (als gerekend wordt met klemming en met stabiliteitsfactor = 1) bij een golfhoogte gelijk aan die toegepast is in de Deltagoot (m)
- $D_{in\ modelproeven}$ = de toplaagdikte (zuilhoogte) die toegepast is in de Deltagoot. In dit geval was dat 0,180 m.
- 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 (-)
- σ = standaarddeviatie van berekende waarde van $D_{Steentoets}/D_{in\ modelproeven}$ (-)

	$D_{in\ modelproeven}$ (m)	$D_{Steentoets}$ (m)	D_{ST} eigen gewicht (m)	$\frac{D_{Steentoets}}{D_{in\ modelproeven}}$	f_{stab} (-)
Serie 1	0,18	0,304	0,443	1,69	1,51
Serie 2	0,18	0,285	0,363	1,58	1,44
Serie 3	0,18	0,285	0,392	1,58	1,43
Standaarddeviatie				0,06	
Veiligheidsfactor γ				1,22	
Gemiddeld					1,46

Tabel 5-1 Tussenresultaten van berekening van stabiliteitsfactor op basis van drie proevenseries

Omdat de langeduurproef tussen de 8 en 15 uur geduurd heeft totdat er schade optrad, moet de stabiliteitsfactor op twee manieren berekend worden:

- Op basis van de drie proevenseries met teruggerekende golfcondities bij bezwijken van de tweede proevenserie: zie Tabel 5-1. De resulterende stabiliteitsfactor is $f_{stab} = 1,46$
- Op basis van alleen de langeduurproef:
 - D_{ST} eigen gewicht = 0,392 m
 - $D_{Steentoets} = 0,285$ m
 - $\gamma = 1,2$
 - stabiliteitsfactor: $f_{stab} = 1,44$
- De kleinste van de twee is maatgevend: $f_{stab} = 1,44$

Voor RONA[®]ton XL resulteert de procedure derhalve in een stabiliteitsfactor van $f_{stab} = 1,44$.

Hoewel de proeven zijn uitgevoerd met, omgerekend naar ware grootte, RONA[®]ton XL van 30 cm hoog (op schaal 1:1,67, dus 18 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 verder, afhankelijk van de omstandigheden, uit tot een significante golfhoogte van maximaal circa 4,5 m.

6 Conclusies

In de Deltagoot van Deltares is de stabiliteit van RONA[®]ton XL vastgesteld. Daarvoor is op schaal 1:1,67 een dijk met RONA[®]ton XL opgebouwd en beproefd met hoge golven. De belangrijkste eigenschappen van de dijk en de bekleding waren (maten op schaal):

- taludhelling: 1:3,59
- gemiddelde toplaagdikte: $D = 0,180$ m
- gemiddelde soortelijke massa van de zetstenen: $\rho_z = \text{ca } 2318 \text{ kg/m}^3$
- relatief open oppervlak: 10,5%
- gemiddelde filterlaagdikte: 0,080 m
- korrelgrootte van het filter: 11-26 mm, $D_{15} = 11,2$ mm
- korrelgrootte van het inwasmateriaal: 12-21 mm, $D_{15} = 11,6$ mm

Er zijn drie proevenseries uitgevoerd:

- 1 korteduurproeven met relatief lange golven met golfsteilheid $s_{op} = H_{m0}/(1,56T_p^2) = 0,02$ en significante golfhoogte tot $H_{m0} = 2,04$ m
- 2 korteduurproeven met relatief korte golven met golfsteilheid $s_{op} = 0,04$ en significante golfhoogte tot $H_{m0} = 2,00$ m
- 3 langeduurproef met relatief korte golven met golfsteilheid $s_{op} = 0,04$ en significante golfhoogte van $H_{m0} = 2,02$ m



Figuur 6.1, Golfbelasting tijdens proef RXL-08

Na afloop van de eerste twee proevenseries met korte duur was er nog geen schade ontstaan. Ook de vervorming was verwaarloosbaar en de mate van uitspoeling van het inwasmateriaal was zeer beperkt.

Tijdens de langeduurproef is tijdens proef RXL-12 na totaal ongeveer 11 uur de vervorming van de steenzetting zo groot geworden dat er schade van de categorie c is opgetreden. Er was sprake van een S-profiel met een amplitude gelijk aan 30% van de toplaagdikte. De onderlinge

verplaatsing van naast elkaar gelegen zetstenen was toen nog hooguit orde 1 cm, waaruit blijkt dat de klemming van de steenzetting toen nog zeer goed werkte.

Vervolgens is er doorgelopen en is na totaal 15,2 uur golven met $H_{m0} = 2,02$ m een zetsteen uit de bekleding gespoeld (zie Figuur 4.5).

Op basis van deze proefresultaten en de daarvoor geldende procedure (zie bijlage C) is de stabiliteitsfactor voor RONA[®]ton XL bepaald: $f_{stab} = 1,44$.

Hoewel de proeven zijn uitgevoerd met RONA[®]ton XL van 30 cm hoog (op schaal 1:1,67, dus 18 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, afhankelijk van de omstandigheden, uit tot een significante golfhoogte van maximaal ca. 4,5 m.

Referenties

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

Klein Breteler, M. (2016),
Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken, Samenvattend rapport,
Deltares rapport 1208618-006, 7 juli 2016

Klein Breteler, M. (2016a),
Stabiliteit van RONA[®]ton steenzetting bij golfaanval
Deltares rapport 1208618-011, 22 maart 2016

Klein Breteler, M., D. Kaste en G. Mourik (2020),
Documentatie Steentoets, Excel-programma voor het berekenen van de stabiliteit van
steenzettingen,
Deltares rapport 11203721, 10 november 2020

NEN-7024, Zetsteen; ICS 91.10030; 93.160, april 2015

A Tabellen

locatie	Filterlaagdikte (mm)	
	In linker helft	In rechter helft
rij 3	79	80
rij 4	80	81
rij 5	81	78
rij 6	81	79
rij 7	78	81
rij 8	81	82
rij 9	78	81
rij 10	83	79
rij 11	80	82
rij 12	80	81
rij 13	78	82
rij 14	80	81
rij 15	78	79
rij 16	81	82
rij 17	79	81
gemiddeld	80,2	

Tabel A-1, Gemeten filterlaagdikte (mm)

serie	proef	h (m)	H _{m0} (m)	H _{max} (m)	T _p (s)	T _{m-1,0} (s)	Duur (uur)	N (-)	S _{op} (-)	S _{om} (-)	ξ _{op} (-)	H _{m0} / (ΔD)
1	RXL-01	5,80	1,02	2,06	5,66	5,16	1,00	799	0,020	0,024	1,95	4,28
1	RXL-02	6,10	1,46	3,17	6,73	6,06	1,68	1171	0,021	0,026	1,94	6,17
1	RXL-03	6,10	1,66	3,05	7,11	6,41	1,75	1108	0,021	0,026	1,92	7,01
1	RXL-04	6,10	1,87	4,81	7,57	6,40	1,92	1244	0,021	0,029	1,92	7,88
1	RXL-05	6,10	2,04	5,00	7,98	6,68	2,05	1254	0,021	0,029	1,94	8,59
2	RXL-06	6,10	1,65	2,79	5,07	4,67	1,30	1118	0,041	0,049	1,37	6,97
2	RXL-07	6,10	1,81	3,18	5,38	5,00	1,37	1112	0,040	0,046	1,39	7,61
2&3	RXL-08	6,10	2,00	3,90	5,66	5,21	1,46	1132	0,040	0,047	1,39	8,43
3	RXL-09	6,10	1,99	3,48	5,70	5,22	1,00	780	0,039	0,047	1,41	8,38
3	RXL-10	6,10	2,01	3,73	5,64	5,25	2,08	1600	0,041	0,047	1,38	8,47
3	RXL-11	6,10	2,04	4,84	5,77	5,39	6,00	4576	0,039	0,045	1,41	8,59
3	RXL-12	6,10	2,00	4,95	5,75	5,35	3,50	2652	0,039	0,045	1,41	8,42
3	RXL-13	6,10	1,98	3,57	5,74	5,37	1,16	887	0,038	0,044	1,42	8,32

Tabel A-2 Gerealiseerde golfcondities

In de tabel zijn de volgende parameters gebruikt:

h = waterstand (m, t.o.v. de gootbodem)

H_{m0} = significante golfhoogte (m)

H_{max} = hoogste gemeten golf in de proef (m)

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

$T_{m-1,0}$ = spectrale golfperiode (s)

s_{op} = golfsteilheid op basis van de piekperiode: $s_{op} = H_{m0}/((g/2\pi) \cdot T_p^2)$ (-)

s_{om} = golfsteilheid op basis van de spectrale golfperiode: $s_{om} = H_{m0}/((g/2\pi) \cdot T_{m-1,0}^2)$ (-)

ξ_{op} = brekerparameter op basis van de piekperiode: $\xi_{op} = \tan(\alpha)/\sqrt{s_{op}}$ (-)

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

α = taludhelling ($^\circ$)

N = aantal golven (-)

$H_s/(\Delta D)$ = belastingparameter (-)

rij	Meetcabinezijde	Midden	Halzijde
2	0	0	1
4	0	0	2
6	3	1	6
8	4,5	5	4,5
10	4,5	3,5	4,5
12	5	4	5
14	5	4	5
16	5	3,5	4
18	3,5	3,5	6

Tabel A-3, Diepte uitgespoeld inwasmateriaal na proef RXL-04 (cm)

rij	splitkelken			ontwateringsgaten		
	Meetcabine-zijde	Midden	Halzijde	Meetcabine-zijde	Midden	Halzijde
rij 6	0,1	0,0	0,0	1,2	0,2	0,0
rij 8	0,9	0,4	0,5	2,2	1,3	0,5
rij 10	2,6	2,8	3,4	1,7	1,9	3,7
rij 12	4,8	4,1	4,2	3,9	4,1	3,6
rij 14	4,6	4,6	5,0	4,0	4,3	4,4
rij 16	3,8	3,1	3,5	3,8	2,7	3,2
rij 18	3,0	2,7	3,6	2,8	2,0	2,7

Tabel A-4, Diepte uitgespoeld inwasmateriaal na proef RXL-08 (cm)

rij	Meetcabinezijde	Midden	Halzijde
4	1	1,5	1
6	3	3	3
8	3	3	3,5
10	3,5	4	4
12	4,5	3,5	4,5
14	4,5	3,5	3
16	4	4	4,5
18	4	4	4,5

Tabel A-5, Diepte uitgespoeld inwasmateriaal na proef RXL-09 (cm)

rij	Meetcabinezijde	Midden	Halzijde
2	3	2,5	2,5
4	3,5	3,5	4
6	5	5	5,5
8	5	7	8
10	7,5	8,5	8,5
12	8	8,5	9
14	6,5	7	7
16	6,5	6,5	6
18	5	6	6

Tabel A-6, Diepte uitgespoeld inwasmateriaal na proef RXL-11 (cm)

rij	splitkelken			ontwateringsgaten		
	Meetcabine-zijde	Midden	Halzijde	Meetcabine-zijde	Midden	Halzijde
rij 2	3	2	3	3	3	3
rij 4	3	3	4	4	3	3
rij 6	7	5	6	7	8	10
rij 8	8	7	6	11	8	10
rij 10	9	10	10	11	13	10
rij 12	10	15	11	11	16	16
rij 14	8	8	7	10	9	12
rij 16	9	7	6	7	5	8
rij 18	8	6	6,5	6	5	7

Tabel A-7, Diepte uitgespoeld inwasmateriaal na proef RXL-12 (cm)

rij	splitkelken			ontwateringsgaten		
	Meetcabine-zijde	Midden	Halzijde	Meetcabine-zijde	Midden	Halzijde
rij 2	3	3	3	3	3	3
rij 4	3	4	3	4	5	4
rij 6	8	6	5	7	7	8
rij 8	8	7	8	12	14	13
rij 10	8	13	9	17	20	18
rij 12	7	15	11	17	16	16
rij 14	9	8	12	15	15	14
rij 16	7	7	6	8	7	8
rij 18	8	6	5	6	5	7

Tabel A-8, Diepte uitgespoeld inwasmateriaal na proef RXL-13 (cm)

B Figuren

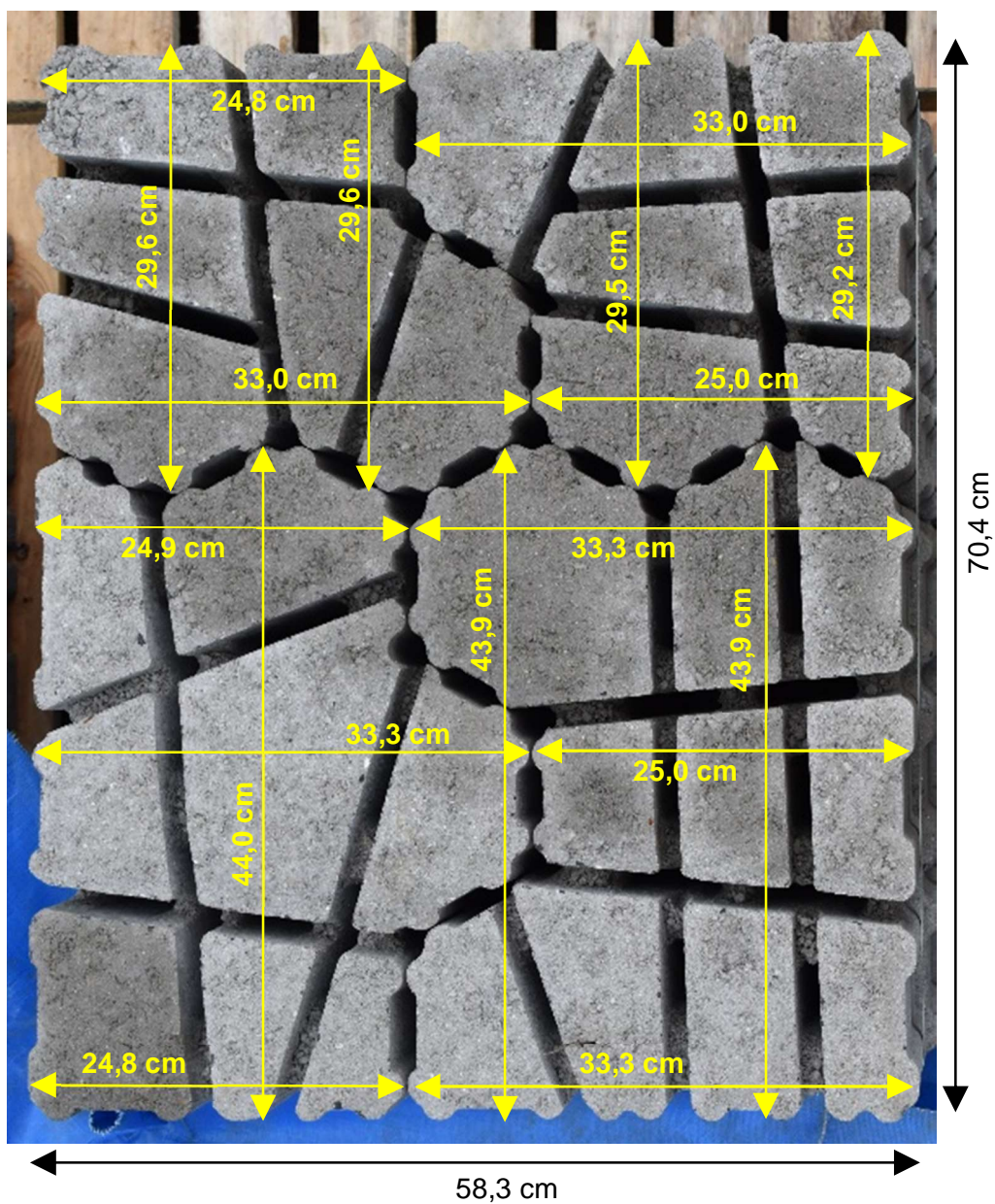


Fig. B-1 Afmetingen van RONA®ton XL (op schaal 1:1,67)

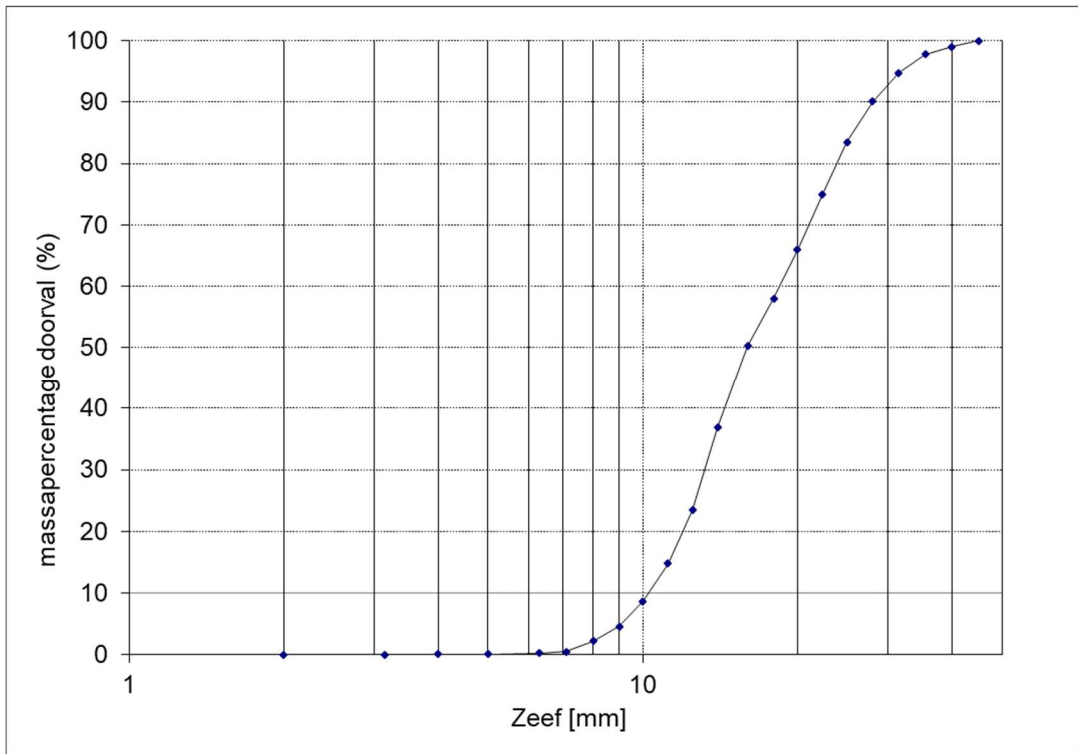


Fig. B-2 Zeefkromme van het filtermateriaal ($D_{f15} = 11,2 \text{ mm}$)

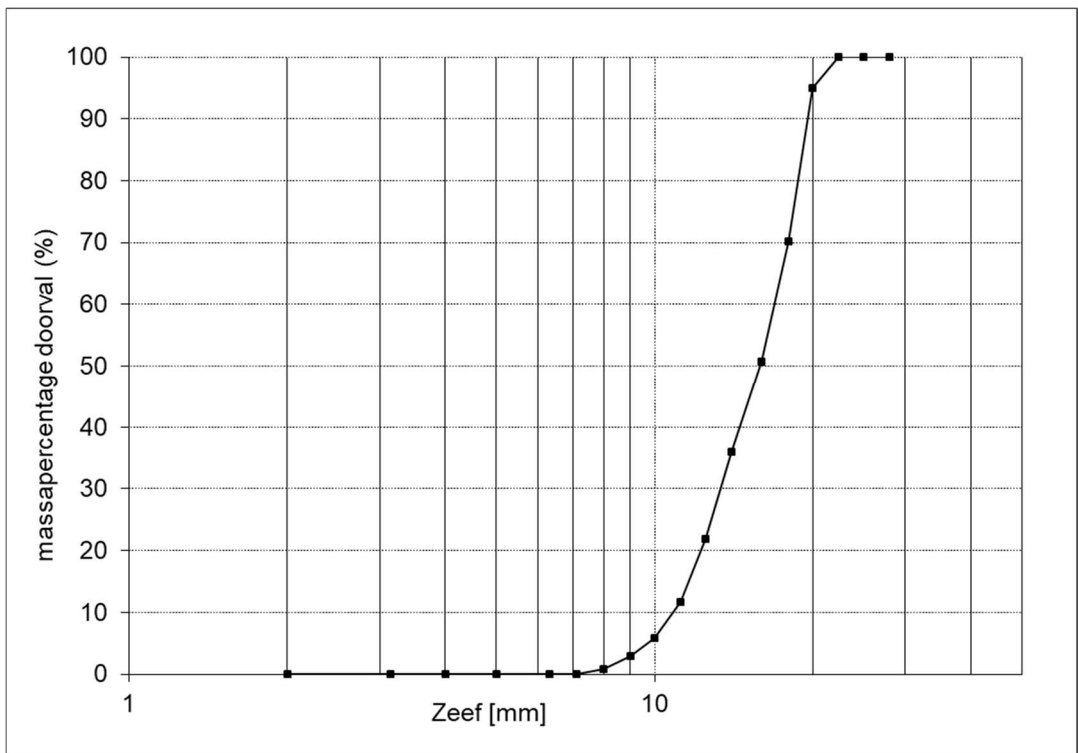


Fig. B-3 Zeefkromme van het inwasmateriaal ($D_{f15} = 11,6 \text{ mm}$)

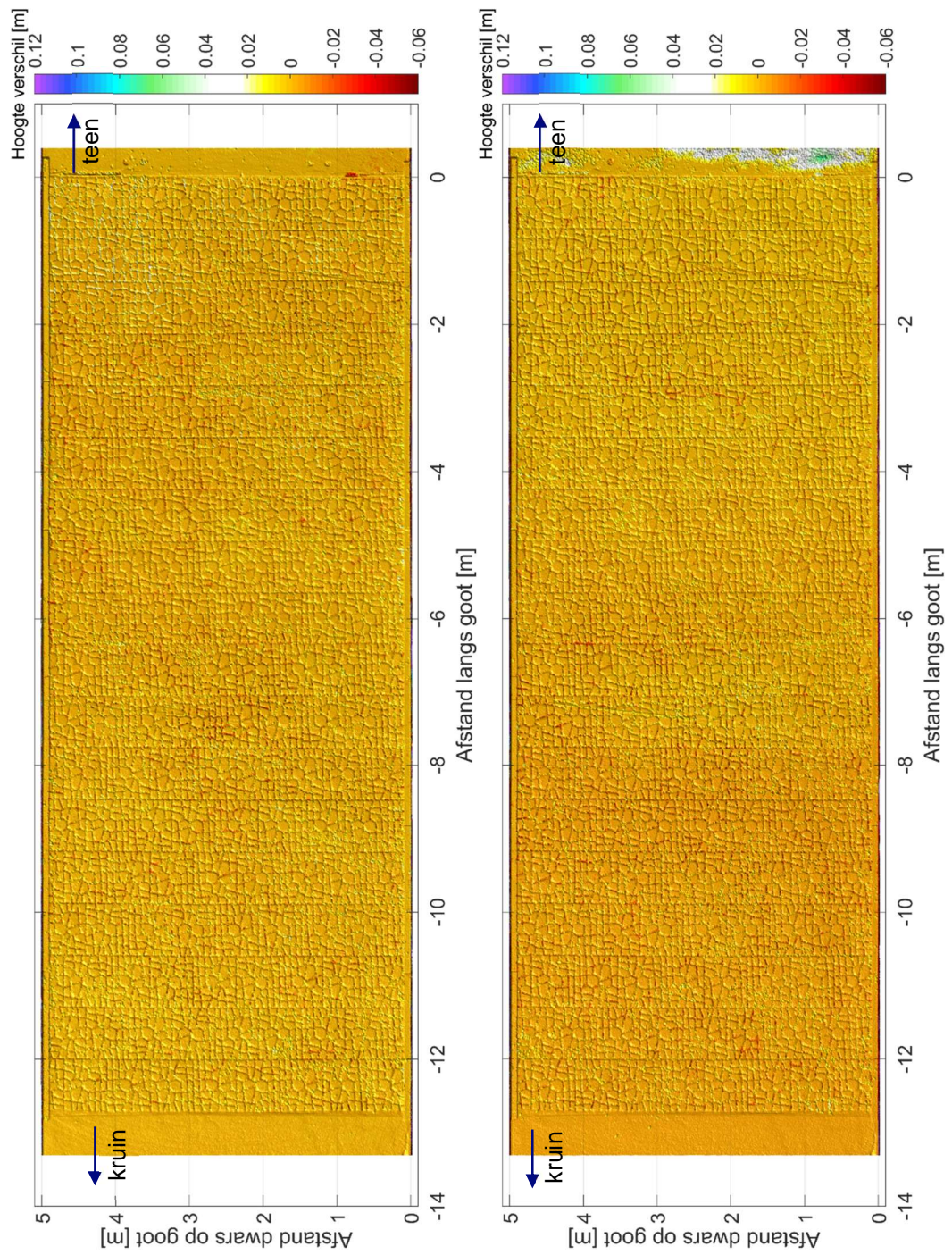


Fig. B-4, Vervorming taludoppervlak volgens laserscan (links: verschil tussen voor en na proef RXL-05; rechts: verschil tussen voor en na proef RXL-06)

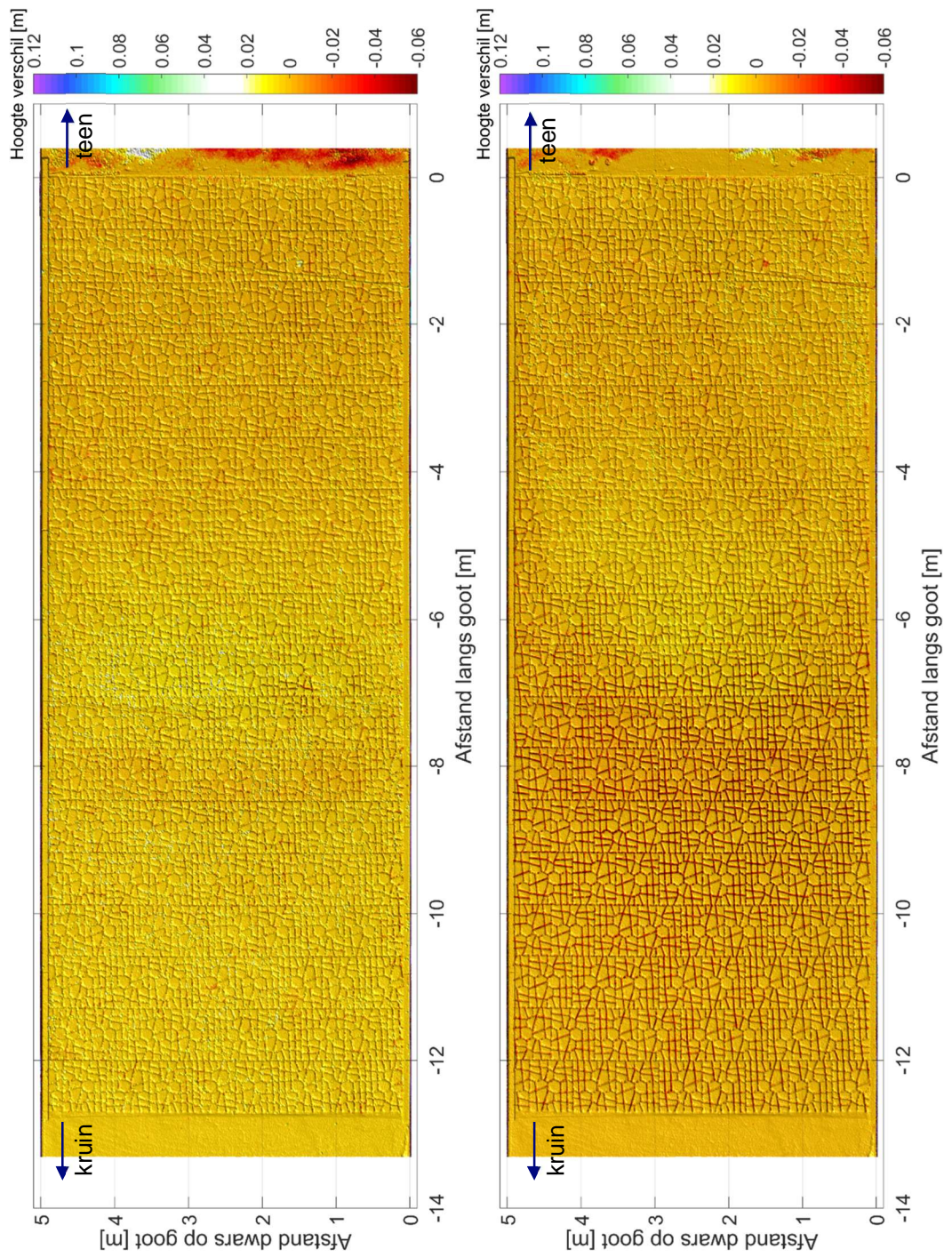


Fig. B-5, Vervorming taludoppervlak volgens laserscan (links: verschil tussen voor en na proef RXL-07; rechts: verschil tussen voor en na proef RXL-08)

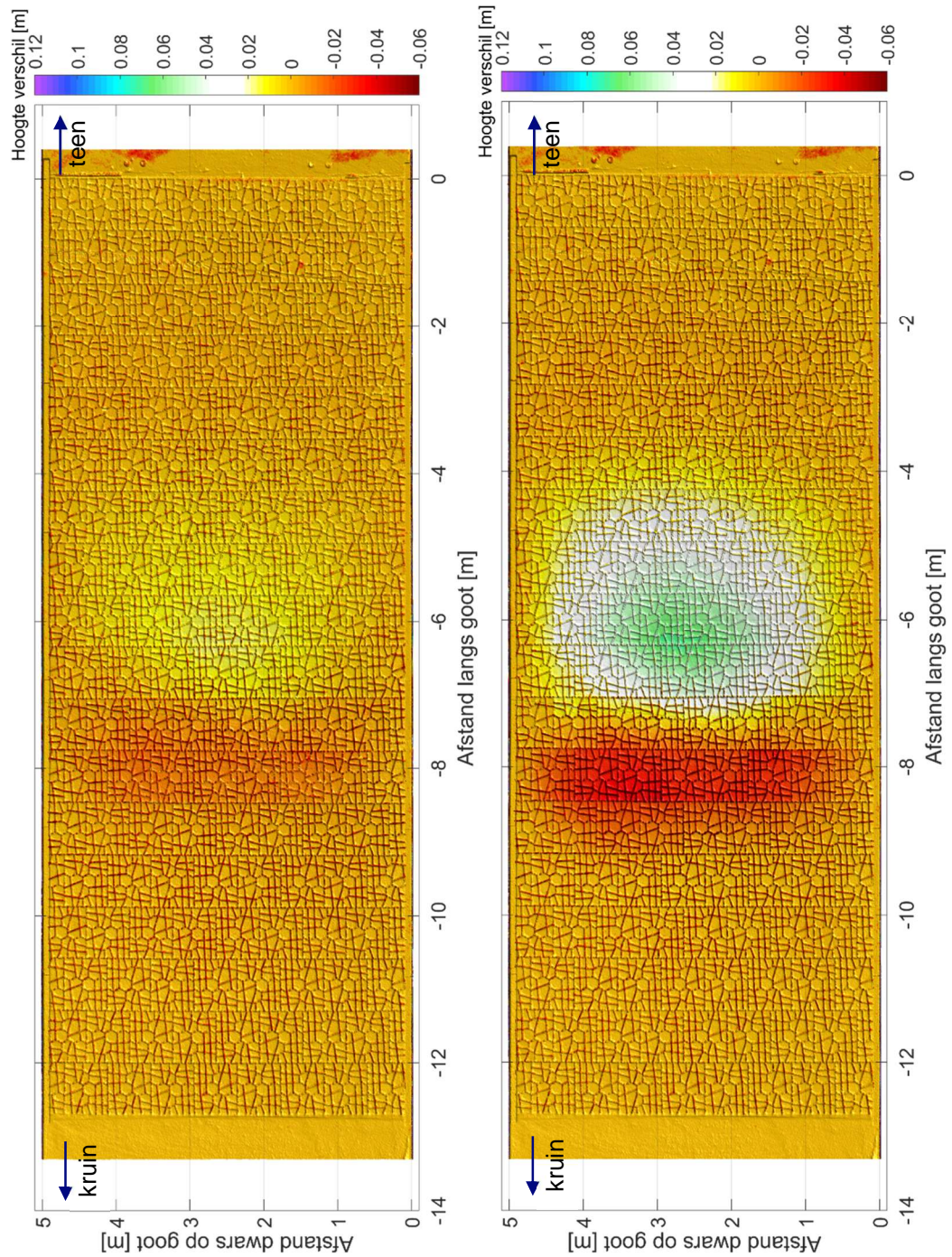


Fig. B-6, Vervorming taludoppervlak volgens laserscan (links: verschil tussen voor proef RXL-08 en na proef RXL-09&RXL-10; rechts: verschil tussen voor proef RXL-08 en na proef RXL-11)

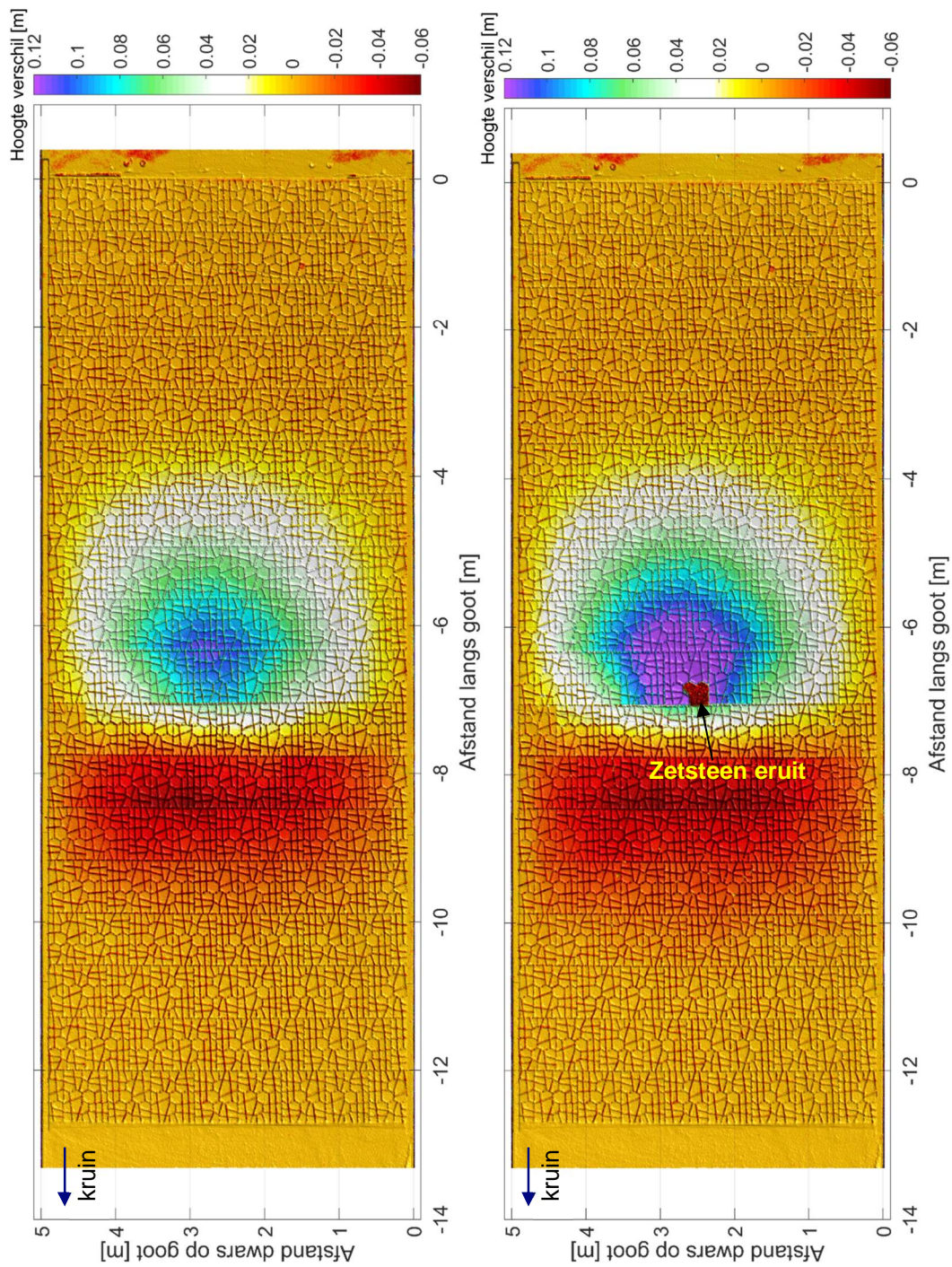


Fig. B-7, Vervorming taludoppervlak volgens laserscan (links: verschil tussen voor proef RXL-08 en na proef RXL-12; rechts: verschil tussen voor proef RXL-08 en na proef RXL-13)

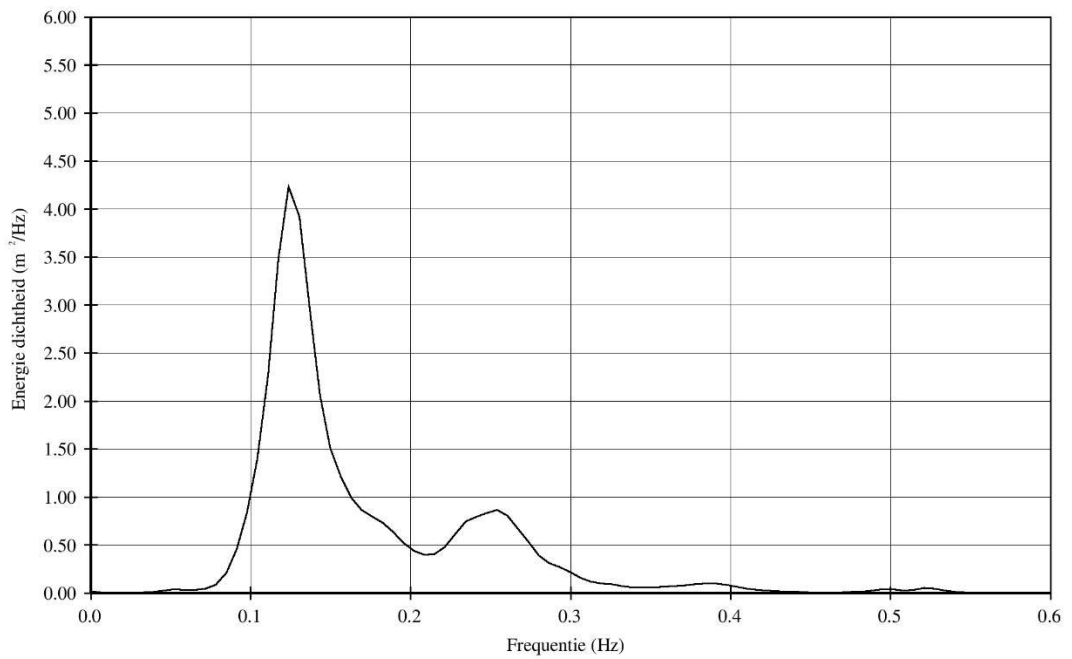
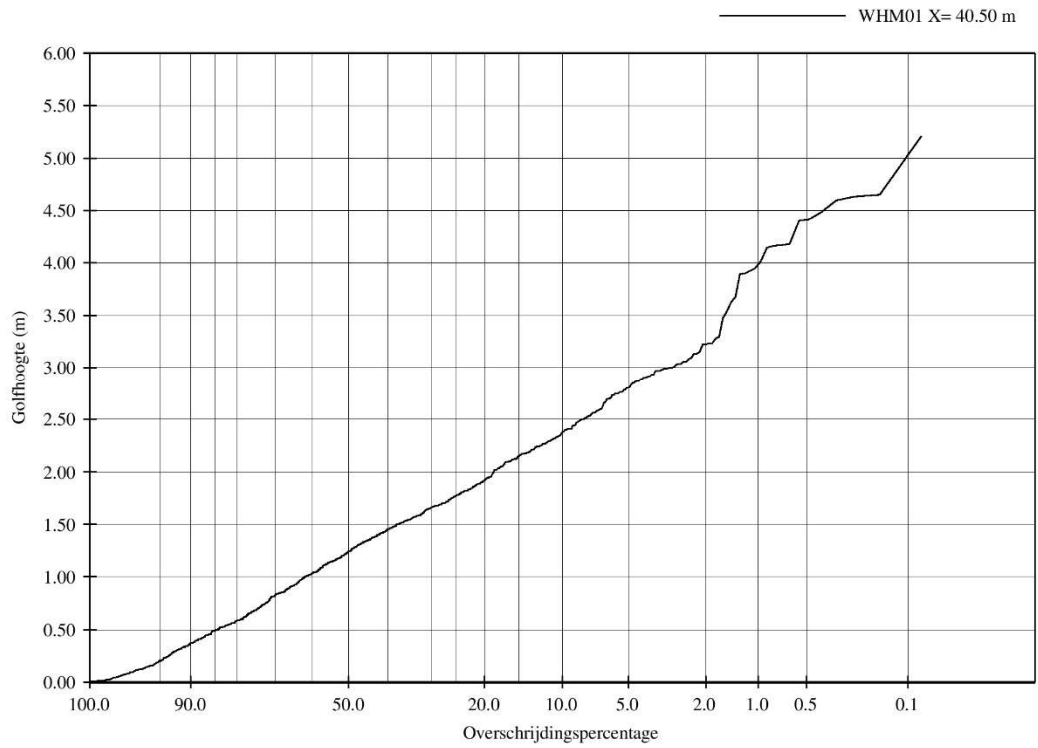


Fig. B-8 Golffoogte-overschrijdingskromme en spectrum van de inkomende golven van proef RXL-05

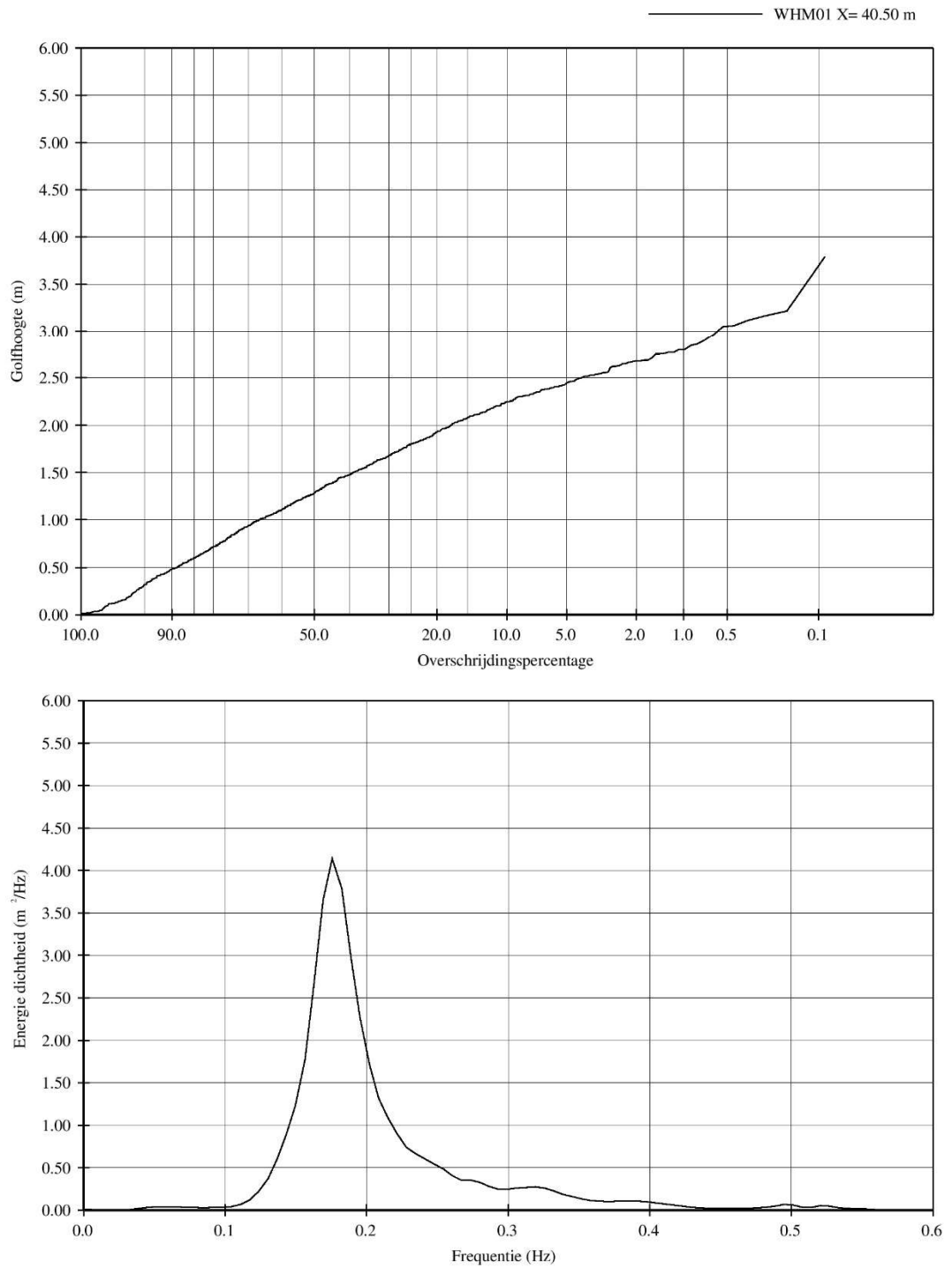


Fig. B-9 Golffhoogte-overschrijdingskromme en spectrum van de inkomende golven van proef RXL-08

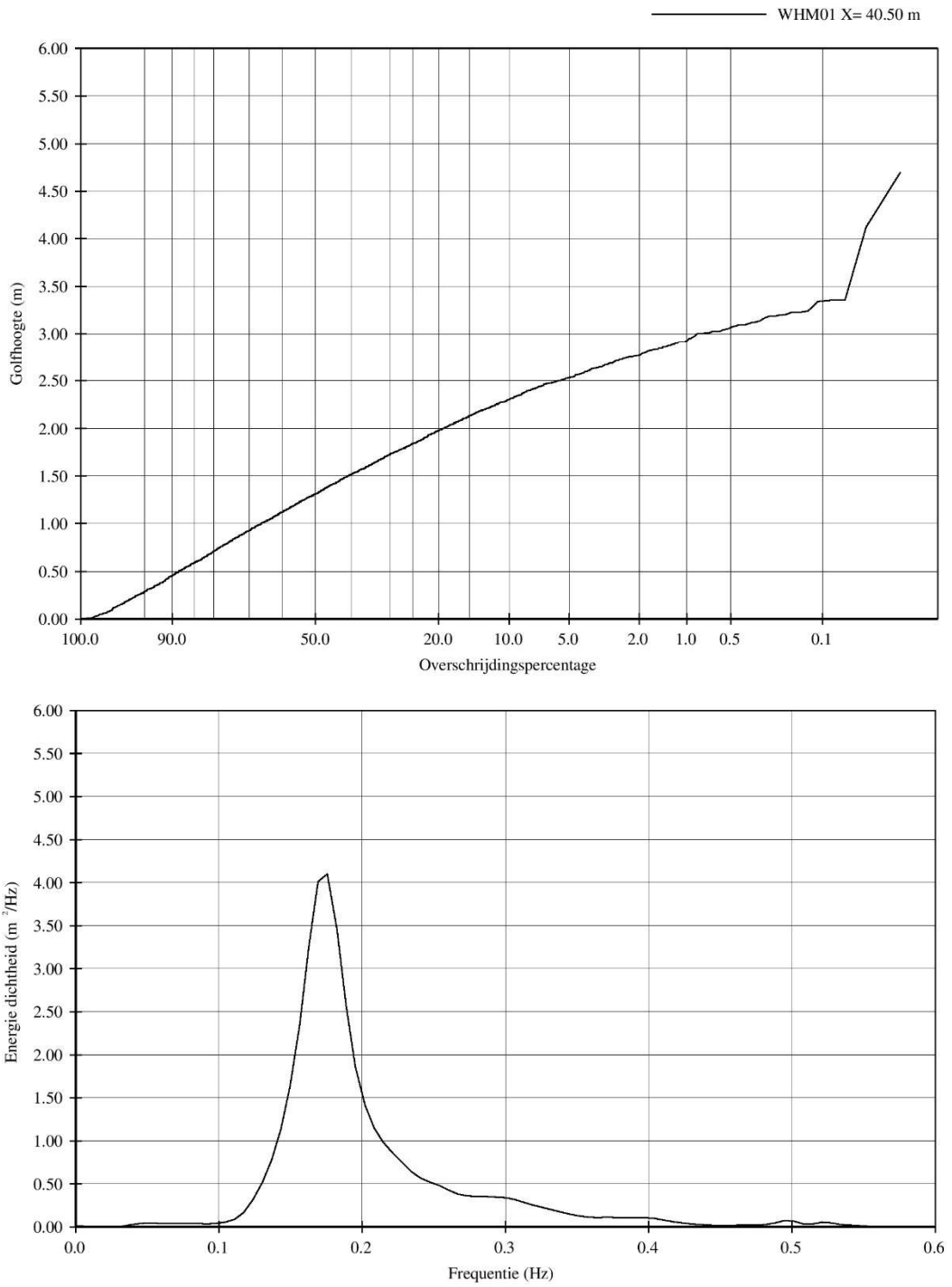


Fig. B-10 Golfhoogte-overschrijdingskromme en spectrum van de inkomende golven van proef RXL-11

C Procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor

C.1 Inleiding

Het onderzoek 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 topplagdikte 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 topplagdikte 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 proefresultaten en het vervolgens berekenen van een stabiliteitsfactor, waarbij rekening gehouden wordt met een veiligheidsmarge.



Figuur C.1.1 Golfaanval op testsectie van RONA®ton XL

C.2 Interpretatie van de proeven

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

- 1 serie waarin de golfhoogte stap voor stap is verhoogd bij een golfsteilheid van 2%, tot bezwijken optrad of de maximale capaciteit van de Deltagoot werd bereikt.
- 2 serie waarin de golfhoogte stap voor stap is verhoogd bij een golfsteilheid van 4%, tot bezwijken optrad of de maximale capaciteit van de Deltagoot werd bereikt.

- 3 langeduurproef met constante golfcondities die net zolang is uitgevoerd totdat bezwijken optrad of de maximale proefduur was verstreken (golfsteilheid van 4%).

Ten aanzien van de eerste twee series wordt de bezwijkgolffhoogte gelijkgesteld aan het gemiddelde tussen de H_s die nog net geen bezwijken gaf en de H_s die net wel in bezwijken resulteerde. Bij de derde serie is de totale proefduur tot het bezwijken van de steenzetting, in combinatie met de golfcondities, het uiteindelijke proefresultaat.

Omdat elk van deze series een waardevol proefresultaat heeft opgeleverd, worden alle drie de resultaten meegewogen bij het bepalen van de stabiliteitsfactor. Dit wordt bereikt door het gemiddelde van de drie series te gebruiken en daarnaast rekening te houden met de spreiding van de drie meetresultaten.

Omdat vanwege de beperkte golffhoogte in de Deltagoot het denkbaar is dat het niet lukt om de steenzetting te laten bezwijken, is de procedure voor het bepalen van de bezwijkgolffhoogte verder uitgedetailleerd (zie bijlage D voor omschrijving schadecategorieën):

- 1 De golffhoogte bij het bezwijken van de steenzetting is voor de eerste twee proevenseries met korteduurproeven gelijk aan het gemiddelde van de golffhoogte waarbij daadwerkelijk bezwijken is opgetreden (schadecategorie c of d) en de golffhoogte van de proef met de hoogste golffhoogte in dezelfde serie (ongeveer dezelfde golfsteilheid) waarbij nog geen bezwijken is opgetreden (schadecategorie a of b).
- 2 Voor de langeduurproef wordt de gemiddelde golffhoogte en golfperiode bepaald en geldt het aantal golven tot bezwijken als het resultaat van de proef.
- 3 Als tijdens de korteduurproeven bij de maximale golffhoogte nog geen bezwijken is opgetreden, wordt er een fictieve proef toegevoegd met een 15% hogere golffhoogte, omdat het gebruikelijk is om in het proevenprogramma met golffhoogte-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 8 uur (prototypewaarde) heeft standgehouden bij dezelfde golfcondities. Het doorstaan van de 8 uur golfbelasting tijdens de langeduurproef impliceert dat bezwijken bij een hogere golffhoogte optreedt dan 15% boven de maximale golfcondities. In dat geval geldt voor als de lange duurproef 8 à 15 uur heeft geduurd tot schade (zie volgende paragraaf):
 - Ga ervan uit dat bij een 15% hogere golffhoogte er schade zou zijn opgetreden tijdens de eerste proevenserie met lange golven.
 - Bereken met Steentoets een schatting van de golffhoogte bij bezwijken van de tweede proevenserie (met korte golven) op basis van het resultaat van de langeduurproef (met korte golven).
- 4 Als de steenzetting tijdens de langeduurproef niet bezwijkt, wordt aangenomen dat er wel bezwijken zou zijn ontstaan als de proef 20% langer had geduurd.
- 5 Als tijdens geen enkele proevenserie bezwijken is opgetreden, wordt aangenomen dat er wel bezwijken zou zijn opgetreden tijdens de langeduurproef met een proefduur die 20% groter is dan de uitgevoerde proefduur. Dit is dan het enige proefresultaat op basis waarvan de stabiliteitsfactor wordt afgeleid. De fictieve proef van punt 3 wordt dan niet toegevoegd, omdat het doorstaan van de langeduurproef impliceert dat bezwijken bij een veel hogere golffhoogte optreedt dan 15% boven de maximale golfcondities.

C.3 Bepaling stabiliteitsfactor

Voor het bepalen van de stabiliteitsfactor wordt zoveel mogelijk kennis en ervaring van steenzettingen benut, om een zo goed mogelijke factor te verkrijgen met de juiste veiligheidsmarge. Dit wordt enerzijds gerealiseerd door gebruik te maken van het rekenmodel Steentoets

en anderzijds door te bedenken dat er verschillende sterktecomponenten in een steenzetting zitten.

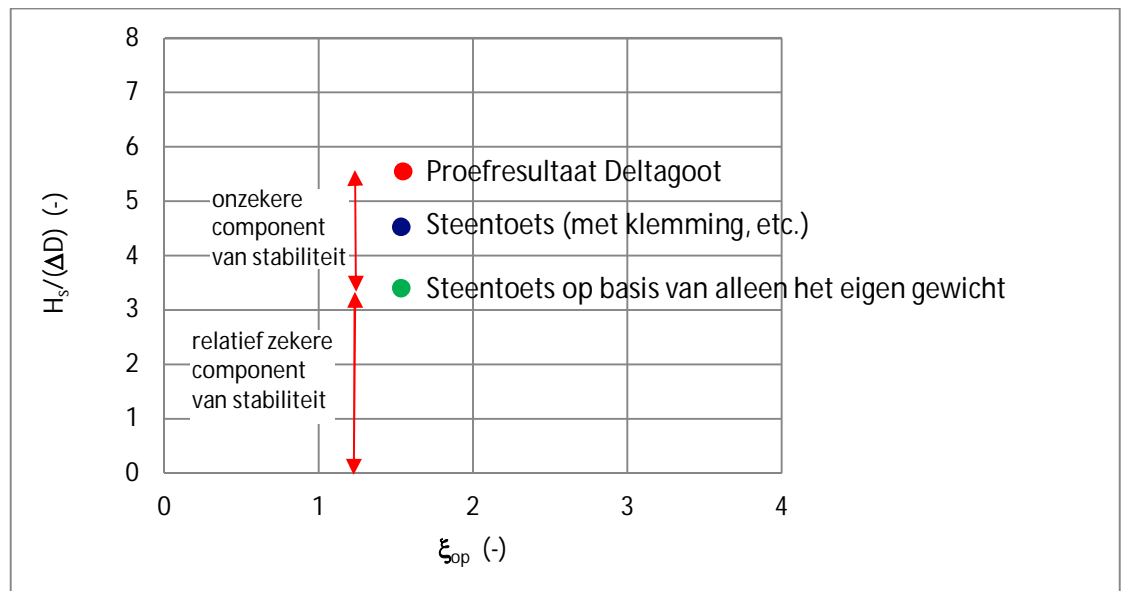
De methode voor het bepalen van de veiligheidsmarge in de stabiliteitsfactor gaat uit van de veronderstelling dat een deel van de stabiliteit heel zeker is (gerelateerd aan het eigengewicht van de steenzetting) en een deel onzeker (gerelateerd aan de bijzondere eigenschappen die leiden tot grote klemming of andere stabiliteit verhogende aspecten).

Er is voor gekozen om een veiligheidsfactor toe te passen op het onzekere deel, en niet op het zekere deel.

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

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

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



Figuur C.3.1 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:

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

Het doel is nu om een veiligheidsfactor toe te passen op het onzekere deel van de stabiliteit, dus het verschil tussen het proefresultaat uit de Deltagoot (rode stip in Figuur C.3.1) en het zekere deel van de stabiliteit (groene stip in Figuur C.3.1). Dit kan op de volgende wijze worden bereikt:

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

Met:

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

γ = veiligheidsfactor (-)

Dit kan vereenvoudigd worden tot:

$$f_{stab} = \left(\frac{D_{Steentoets}}{D_{inmodelproeven}} - \frac{D_{Steentoets}}{D_{STEigengewicht}} \right) / \gamma + \frac{D_{Steentoets}}{D_{STEigengewicht}} \quad (C.2)$$

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

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

$$\bullet \text{ Drie proevenseries: } \gamma = 1,1 + 1,89 \cdot \sigma \quad (C.3)$$

$$\bullet \text{ Vier proevenseries: } \gamma = 1,1 + 1,64 \cdot \sigma \quad (C.4)$$

Met:

σ = standaardafwijking in de proefresultaten

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

Als er tijdens de eerste twee proevenseries geen schade is opgetreden en tijdens de lange duurproef de steenzetting langer dan 8 uur (prototype) heeft standgehouden, is er sprake van een bijzondere situatie. Bereken de stabiliteitsfactor dan als volgt:

- a) Bereken de stabiliteitsfactor door alleen gebruik te maken van het resultaat van de langeduurproef.
- b) Bereken voor de eerste proevenserie (met lange golven) de golfhoogte bij bezwijken aannemende dat bezwijken op was getreden bij een proef met 15% hogere golfhoogte. Bereken met Steentoets een schatting van de golfhoogte bij bezwijken van de tweede proevenserie (met korte golven) op basis van het resultaat van de langeduurproef (met korte golven). Bereken de stabiliteitsfactor op basis van de zo verkregen resultaten van de drie proevenseries.
- c) De stabiliteitsfactor is de kleinste van a) en b) als de langeduurproef tussen 8 en 15 uur heeft geduurd tot schade is opgetreden en is gelijk aan de waarde van a) als tijdens de langeduurproef er pas na 15 uur schade is opgetreden. In dit laatste geval wordt er gerekend met een standaardafwijking van 0,05.

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.

D Indeling schadecategorieën

Na elke proef is de vervorming en schade aan de steenzetting bepaald. 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 naastliggende zetsteen is kleiner dan 10 % van de dikte van de toplaag ($0,1 \cdot D$, met D = toplaagdikte) (zie Fig. B-1 Fig. D-1), of de amplitude van de vervorming (S-vormig taludoppervlak, zie Fig. D-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 naastliggende 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 naastliggende 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 $8 \cdot D$ tot $15 \cdot D$ (in het dwarsprofiel) net zoveel verzakt is als de dikte van de filterlaag, of
 - er is een zetsteen gebroken door de golfbelasting (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 naastliggende 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 door de golfbelasting (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.

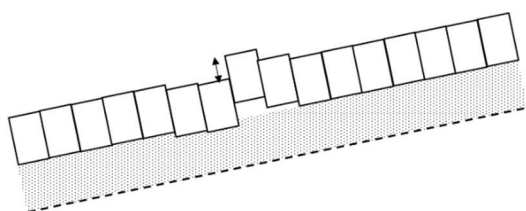


Fig. D-1, Verplaatsing van zetstenen ten opzichte van naastgelegen zetstenen

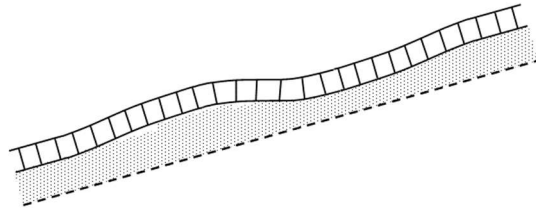


Fig. D-2, Vervorming tot S-profiel

E Foto's

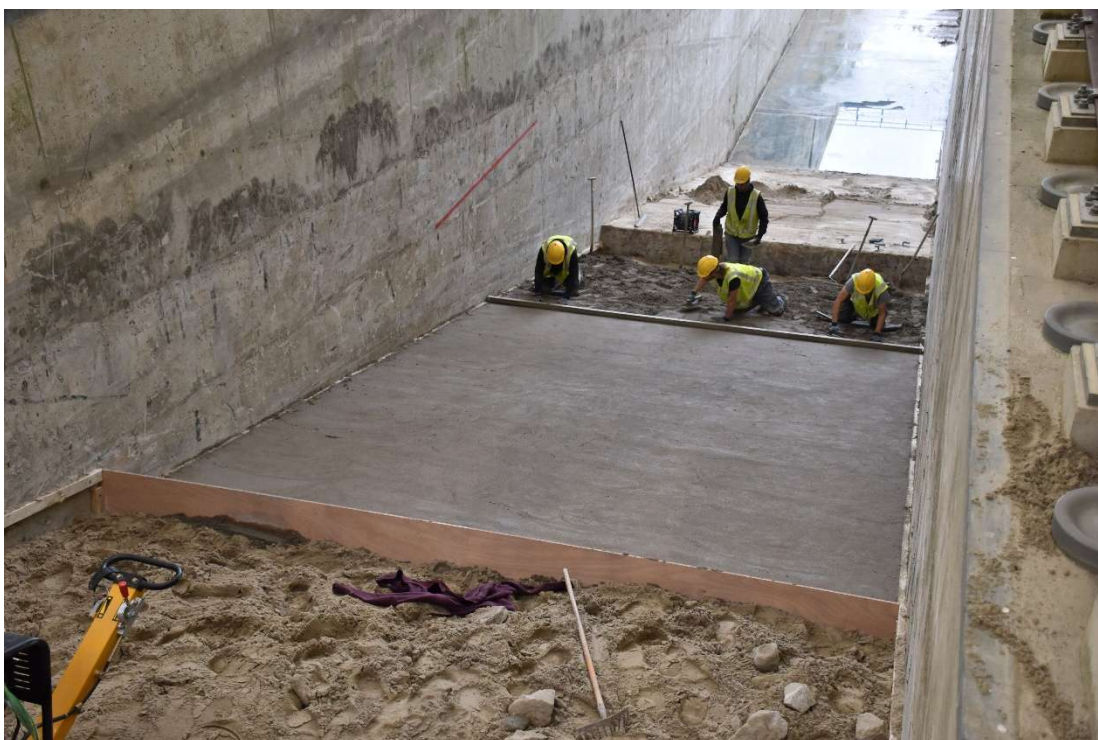


Fig. E-1 Aanbrengen zandcement in het vak waar later de steenzetting komt

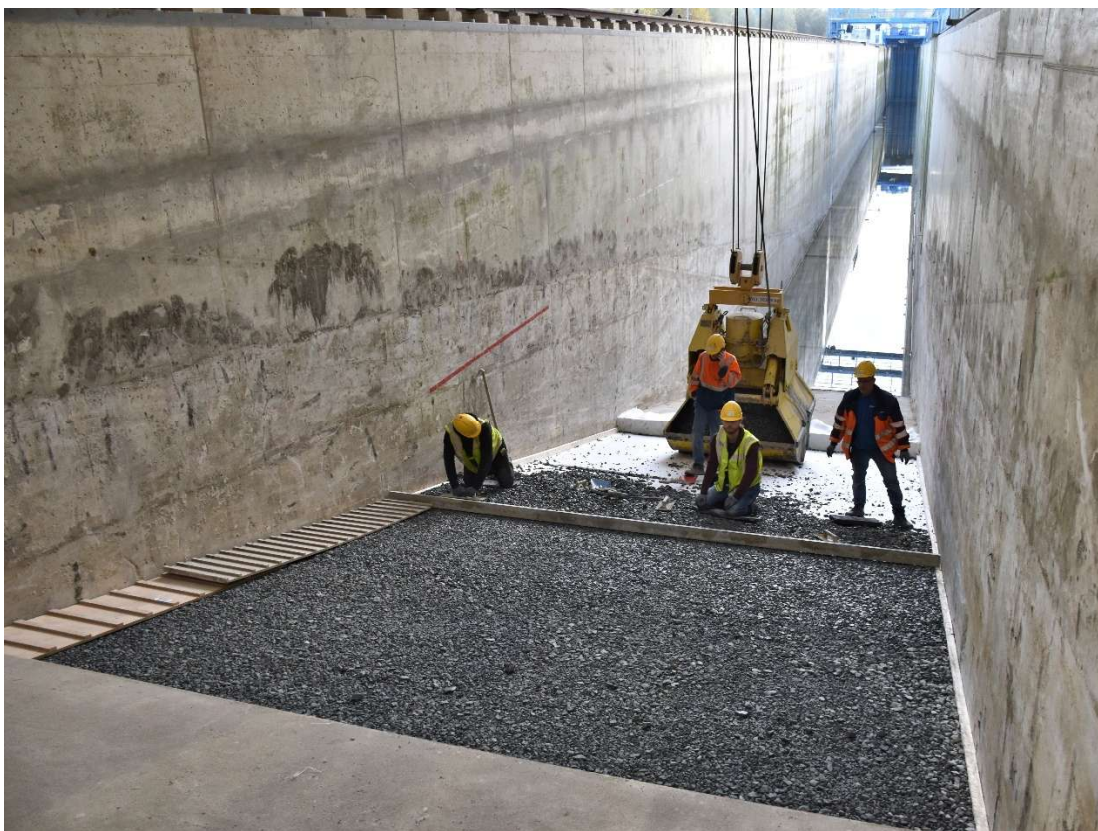


Fig. E-2 Aanbrengen van de filterlaag op het geotextiel

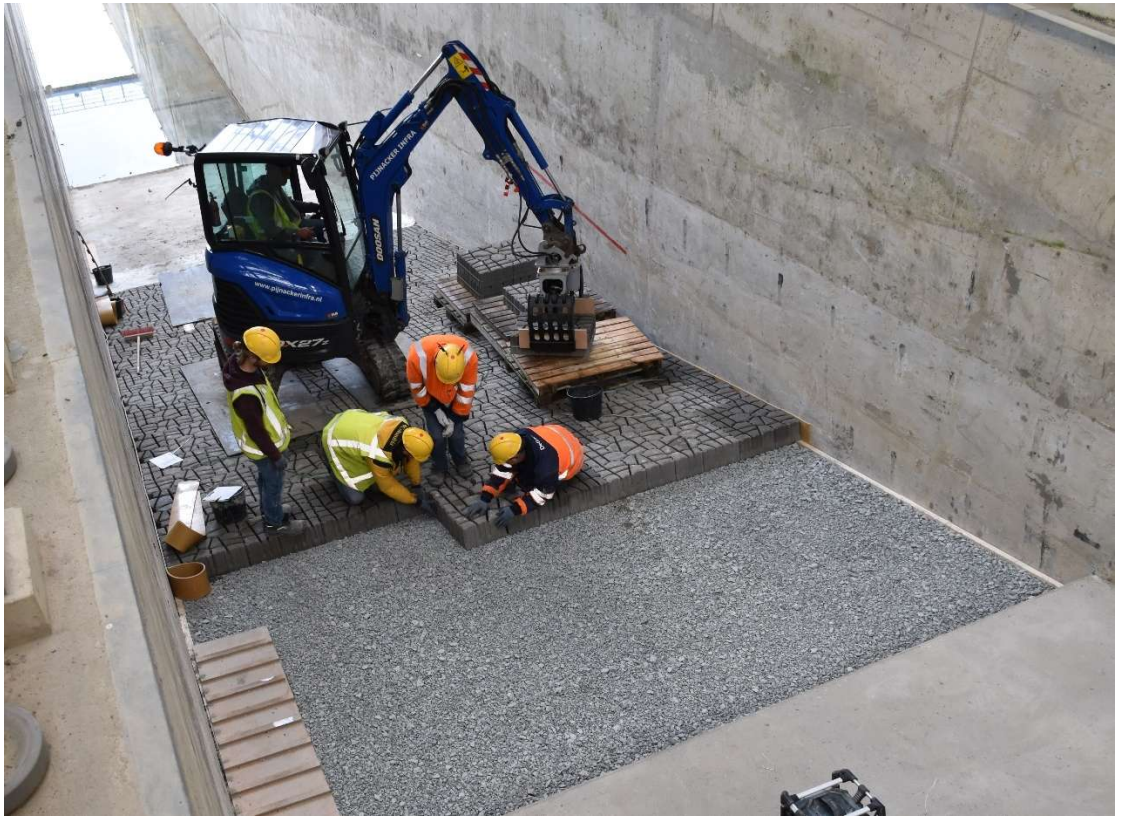


Fig. E-3, Plaatsing RONA®ton XL op het filter met behulp van minikraan met sorteerknijper

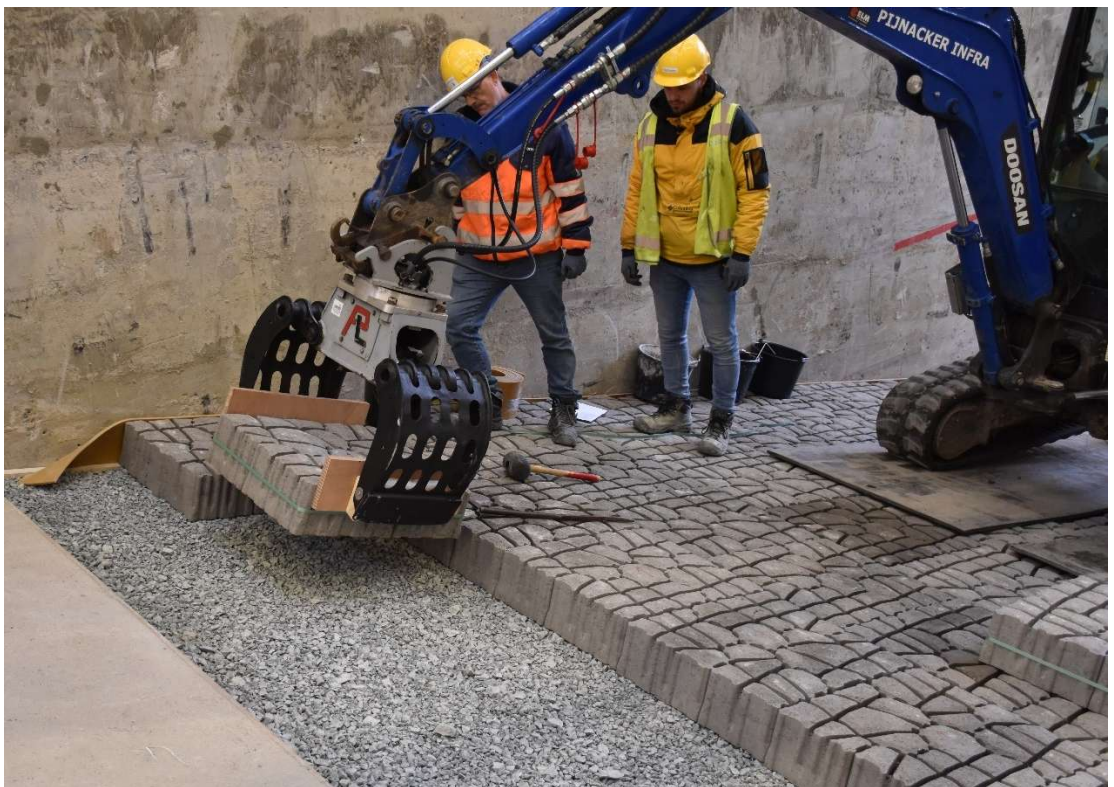


Fig. E-4, Plaatsing RONA®ton XL op het filter met behulp van minikraan met sorteerknijper



Fig. E-5, Het opvullen van de spleet tussen de steenzetting en het boventalud met zandcement



Fig. E-6, De ruimte tussen de zetstenen en het rubber is opgevuld met vulplaatjes en de overgebleven openingen tussen de zetstenen en het rubber is opgevuld met steenslag



Fig. E-7, Monteren van hoekprofielen bij de aansluiting met de gootwand



Fig. E-8, Inwassen van de steenzetting met steenslag



Fig. E-9, Overzicht van dijktaalud



Fig. E-10, golfbelasting tijdens proef RXL-03



Fig. E-11, Inwassen na proef RXL-03



Fig. E-12, Inspectie van het talud na proef RXL-08 (een deel van de oneffenheden was reeds bij de aanleg aanwezig)



Fig. E-13, Open dag tijdens proef RXL-09 en RXL-10 (vanwege Covid verdeeld over meerdere sessies)



Fig. E-14, Na proef RXL-10



Fig. E-15, Vervorming na proef RXL-11



Fig. E-16, Vervorming na proef RXL-11



Fig. E-17, Tijdens proef RXL-12



Fig. E-18, Vervorming na proef RXL-12



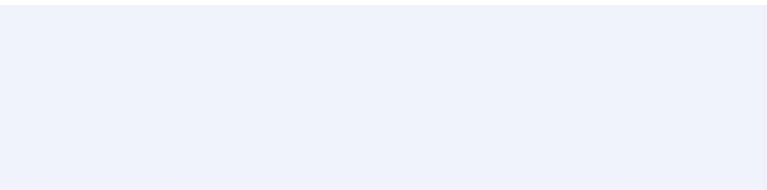
Fig. E-19, Vervorming na proef RXL-12



Fig. E-20, Schade na proef RXL-13



Fig. E-21, Schade na proef RXL-13



Deltares

www.deltares.nl