

Stabiliteit van Verkalit® GOR steenzetting bij golfaanval

Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken



Stabiliteit van Verkalit® GOR steenzetting bij golfaanval

Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken

Dorothea Kaste

1208618-015

Titel

Stabiliteit van Verkalit® GOR steenzetting bij golfaanval

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat WVL BERDING BETON GmbH	1208618-015	1208618-015-HYE-0008	49

Trefwoorden

Steenzetting, Verkalit®, dijken, zetsteen, stabiliteit, golfoploop

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 de projectoverstijgende verkenning POV-Waddenzeedijken van HWBP) en meerdere marktpartijen. Het doel van het onderzoek is het vaststellen van de stabiliteit bij golfaanval van een aantal moderne typen steenzettingen voor toepassing op primaire waterkeringen in Nederland. Daarnaast wordt van enkele type steenzettingen ook de golfoploopremmende werking gemeten.

Het deel van het onderzoek dat in dit rapport wordt beschreven, betreft de stabiliteit van zetstenen van het type Verkalit® GOR, waarvoor LBN Betonwaren B.V./ BERDING BETON GmbH als marktpartij in het onderzoek participeert.

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

Om de stabiliteit bij golfaanval van Verkalit® GOR te bepalen is er grootschalig onderzoek uitgevoerd in de Deltagoot van Deltares. De schaal van dit onderzoek was 1:2. Alle maten die in dit rapport zijn gerapporteerd, betreffen de waarden op modelschaal, dus zoals ze aanwezig waren in de Deltagoot, tenzij nadrukkelijk anders is vermeld. De beproefde steenzetting had een toplaagdikte van circa 15,1 cm. Onder de stenen was een filterlaag aangebracht van steenslag met daaronder een geotextiel.

De stabiliteit van de steenzetting is beproefd met drie proevenseries:

- De eerste twee series bestonden uit korteduurproeven. Per serie met korteduurproeven werd de golfsteilheid gelijk gehouden. De eerste serie werd uitgevoerd met een kleine golfsteilheid (lange golven), de tweede serie met een grote golfsteilheid (korte golven). De golfhoogte is na elke proef (circa 1000 golven) verhoogd totdat schade optrad, of totdat de maximaal op te wekken golfhoogte was bereikt.
- Tijdens de derde serie is een langeduurproef uitgevoerd. Deze proef, met gelijkblijvende golfcondities, is voortgezet totdat de maximale proefduur van 26 uur was bereikt.

Uit het onderzoek is gebleken dat alle meetpunten waarbij bezwijken is opgetreden boven de lijnen liggen die met Steentoets2014 zijn berekend.

Steentoets2014 is echter niet goed toepasbaar op open steenzettingen op een fijn filter, zoals Verkalit®. Daarom is speciaal voor Verkalit® Steentoets aangepast. Er is een empirische relatie opgenomen, die gebaseerd is op de proefresultaten met Verkalit® en Deltagoot-onderzoek met Basalton op zandasfalt. Deze aangepaste versie wordt voorlopig Steentoets-V genoemd en is gebruikt voor het bepalen van de stabiliteitsfactor bij Verkalit®.

Titel

Stabiliteit van Verkalit® GOR steenzetting bij golfaanval

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat WVL
BERDING BETON GmbH

Project

1208618-015

Kenmerk

1208618-015-HYE-0008

Pagina's

49

Inmiddels zijn Steentoets2014 en Steentoets-V samengevoegd in Steentoets2015.

Conform de door Rijkswaterstaat vastgestelde procedure resulteren de Deltagootproeven in de volgende stabiliteitsfactor voor Verkalit® GOR: $f_{stab} = 0,70$. Deze stabiliteitsfactor geldt in combinatie met Steentoets-V (die inmiddels is opgenomen in de nieuwe Steentoets versie), waarbij gerekend wordt zonder klemming, en als Verkalit® GOR wordt toegepast op een laagje steenslag met daaronder een geotextiel. De wrijving tussen de steenslag en het geotextiel moet tenminste voldoen aan $f_w > 0,7$ (wrijvingscoëfficiënt van natte breuksteen op nat geotextiel). Dit is eenvoudig te realiseren met een non-woven geotextiel.

Referenties

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

BERDING BETON GmbH: overeenkomst, door Dhr. G.S. Berding toegestuurd op 18 februari 2014.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	feb. 2015	Dorothea Kaste		Mark Klein Breteler		Marcel van Gent	
2	sep. 2015	Dorothea Kaste		Mark Klein Breteler		Marcel van Gent	
3	okt. 2015	Dorothea Kaste		Mark Klein Breteler		Marcel van Gent	
4	mrt. 2016	Gijsbert Mourik		Mark Klein Breteler		Klaas Jan Bos	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken	1
1.2 Steenzetting van Verkalit® GOR	2
1.3 Opzet van het rapport	4
2 Schaling	5
2.1 Faciliteit	5
2.2 Schaling	5
2.2.1 Algemeen	5
2.2.2 Schaling hydraulische randvoorwaarden	6
2.2.3 Schaling dimensieloze parameters	6
2.2.4 Schaling van stroming in de constructie	7
3 Modelopstelling en proevenprogramma	9
3.1 Modelopstelling	9
3.1.1 Algemeen	9
3.1.2 Filterlaag en geotextiel	11
3.1.3 Verkalit® GOR	11
3.1.4 Afwerking van de modelranden en aanbrengen markering	14
3.2 Metingen	16
3.2.1 Golfcondities	16
3.2.2 Profielmetingen	17
3.2.3 Golfploopmetingen	17
3.2.4 Meting van de beweging van de blokken tijdens de proeven	18
3.3 Proevenprogramma	19
4 Proefresultaten en observaties	21
4.1 Definitie van de schadecategorieën	21
4.2 Serie 6: korteduurproeven, kleine golfsteilheid (proeven V24 – V29)	22
4.3 Serie 7: korteduurproeven, grote golfsteilheid (proeven V30 – V35)	25
4.4 Serie 8: langeduurproeven, grote golfsteilheid (proeven V36 – V40)	30
5 Analyse van de proefresultaten	37
5.1 Beweging van de blokken tijdens de proeven	37
5.2 Stabiliteit van de steenzetting	39
5.3 Stabiliteitsfactor	43
6 Conclusies	47
7 Referenties	49

Bijlage(n)

A Tabellen	A-1
A.1 Verticale posities van de lijnmarkeringen op het talud	A-2
A.2 Verticale posities van de versnellingsopnemers	A-3
B Figuren	B-1
B.1 Tekening van Verkalit® GOR	B-2
B.2 Locaties van de monsternamen en laagdiktemetingen van het filter	B-4
B.3 Zeefkromme filtermateriaal voor alle proevenseries	B-5
B.4 Golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra	B-6
B.5 Verschilplots van de 3D laserscans voor alle proeven	B-10
B.6 Opgemeten hoogte van het filtermateriaal in de spleten	B-16
C Foto's	C-1
C.1 Inbouw opstelling	C-1
C.2 Serie 6	C-9
C.3 Serie 7	C-17
C.4 Serie 8	C-25
D Aanpassing Steentoets	D-1
D.1 Inleiding	D-1
D.2 Grens voor de toepasbaarheid van Steentoets2014	D-2
D.3 Aanpassing Steentoets	D-4
D.4 Vergelijking nieuwe Steentoets-V met Deltagootmetingen met Verkalit®	D-8
E Begrenzings in Steentoets2014	E-1
E.1 Leklengtetheorie	E-1
E.2 Begrenzing bij kleine lek lengte	E-2
F Procedure voor bepaling stabiliteitsfactor van Verkalit®	F-1
F.1 Inleiding	F-1
F.2 Interpretatie van de proeven in de Deltagoot	F-1
F.3 Bepaling van stabiliteitsfactor	F-3

1 Inleiding

Dit rapport beschrijft de grootschalige proeven met een steenzetting van het type “Verkalit® GOR”, die zijn gericht op het bepalen van de stabiliteit van dit type dijkbekleding bij golfaanval in het project “Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken”. Tegelijkertijd zijn golfoplopmetingen uitgevoerd, die apart gerapporteerd zullen worden (Van Steeg, 2015).

1.1 Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken

In het kader van het project “Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken” onderzoekt Deltares in opdracht van Rijkswaterstaat WVL, namens het Projectbureau Zeeweringen, drie noordelijke waterschappen (Wetterskip Fryslân, Waterschap Noorderzijlvest en Waterschap Hunze en Aa's, 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 onderzoeksproject richt zich op twee eigenschappen van zetstenen: voor alle typen zetstenen wordt de stabiliteit bij hoge golven onderzocht en voor enkele typen wordt ook de golfoplooppremming onderzocht. Deltares onderzoekt deze eigenschappen op basis van grootschalige proeven in de Deltagoot. De zetstenen zijn daarvoor op schaal 1:2 getest.

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

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

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

ingebouwd en belast kan worden door grote golven. Door de grootte van deze golfgoot zijn er geen ongewenste schaaleffecten te verwachten.



Figuur 1.1 Golfaanval op Verkalit® GOR in de Deltagoot (tijdens proef V34 en V35)

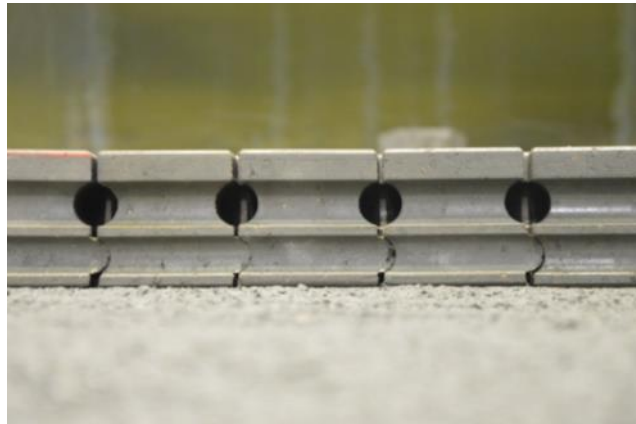
Het onderzoek is in december 2014 en januari 2015 uitgevoerd onder leiding van Mark Klein Breteler en Dorothea Kaste.

1.2 Steenzetting van Verkalit® GOR

In dit zesde deel van het project "Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken" is een steenzetting van het type Verkalit® "GOR" van LBN Betonwaren B.V./ BERDING BETON GmbH onderzocht. Verkalit® is een type steenzetting van beton, dat op een filterlaag wordt toegepast om dijken en oevers te beschermen tegen golfaanval en stromingsbelasting. Het bijzondere aan Verkalit® is dat het een interlocking systeem heeft: de stenen hebben aan elk van de vier zijden een veer of groef en worden in elkaar grijpend geplaatst (zie ook Figuur 1.2).

Ten opzichte van eerdere toepassingen van Verkalit® in Duitsland, heeft dit specifieke type een opening in één van de twee veren. Dit zorgt voor een grotere doorlatendheid van de steenzetting (zie ook Figuur 1.2, links en Bijlage B.1) en draagt bij aan de stabiliteit.

Het type GOR heeft bovendien nog een halfronde gleuf boven het groef-en-veer-systeem. Daardoor ontstaat tussen de gezette stenen een kanaalsysteem (zie Figuur 1.2, rechts), wat de golfploop zou kunnen verminderen. De golfploopremmende werking wordt apart gerapporteerd, in het huidige rapport wordt alleen de stabiliteit van de steenzetting uit Verkalit® GOR beschreven.



Figuur 1.2 Verkalit® GOR (links: schematische afbeelding van het blok, rechts: foto van de bovenkant van de gezette stenen in de Deltagoot)

Ervaring in Duitsland

De voorganger van de hier onderzochte Verkalit® GOR is een interlock systeem met vergelijkbare vorm, maar zonder het gat in de veer en zonder kanalen in de steenzetting (zonder halfronde gleuf in de zetstenen). Deze Verkalit® wordt in Duitsland al sinds 1970 toegepast (IWW, 2015). In het rapport van IWW (2015) is de ervaring beschreven en is een lijst met bijna 100 locaties gegeven waar Verkalit® is toegepast. Dit betreft locaties aan de kust en langs rivieren. Twee locaties aan de kust zijn in meer detail beschouwd, namelijk bij Schillig en Tossens (zeezijde van de dijk aan de Duitse Noordzeekust).



Figuur 1.3 Links: Verkalit® steenzetting bij Schillig. Rechts: Verkalit® steenzetting bij Tossens (oude gedeelte).

De steenzetting bij Schillig is gebouwd in 1978 en gedeeltelijk vernieuwd in 2002 (IWW, 2015, zie Figuur 1.3, links). Hier en daar zijn er wat verzakkingen van de ondergrond

geconstateerd, die goed gevolgd worden door de steenzetting. Verder zijn er enkele overgangsconstructies beschouwd die gepenetreerd zijn met beton.

Bij de locatie Tossens is er een Veralit[®] steenzetting van 1973 nader onderzocht, zie Figuur 1.3 rechts. In het oudste gedeelte is de steenzetting in vierkantverband geplaatst en is het volledig met gras begroeid. Een deel is later aangebracht en is in halfsteensverband gezet. De aansluitingen zijn met bitumen opgevuld. In de loop der jaren zijn er wat verzakkingen ontstaan, die netjes gevolgd worden door de Veralit[®] zonder dat de messing en groef uit elkaar zijn gegaan.

De conclusie van het rapport van IWW (2015) is dat er geen schade aan de twee beschouwde steenzetting is opgetreden en de steenzettingen er in goede staat bijliggen.

Modelonderzoek in Große Wellenkanal

Er zijn grootschalige modelproeven uitgevoerd in de Große Wellenkanal (GWK) in Hannover. Het onderzoek is gerapporteerd door Gier & Schüttrumpf (2011). Hierin zijn de oorspronkelijke Veralit[®] met een doorgaande veer en een aangepaste versie met drie groeven in een veer onderzocht. Die laatste heeft een iets lagere doorlatendheid dan die thans in de Deltagoot is onderzocht. De proeven zijn uitgevoerd met verschillende opstellingen en diktes van de toplaag. Zo zijn de Veralit[®] stenen ook vergeleken met rechthoekige betonblokken met vergelijkbare eigenschappen. De proeven zijn uitgevoerd op schaal 1:1 met een toplaagdikte van 18 cm en voor de aangepaste Veralit[®] ook met 25 cm. De testsectie was aangelegd op een 1:3 talud en werd door een scheidingswand opgedeeld in twee helften van ca. 2,5 m breedte, waardoor per goothelft er 8 blokken in de breedte van de opstelling lagen (zonder rubber langs de wanden).

Uit het onderzoek van Gier & Schüttrumpf (2011) blijkt dat de oorspronkelijke Veralit[®] (zonder gegroefde veer) veel stabiel is dan een rechthoekig betonblok en dat zowel de oorspronkelijke als ook de Veralit[®] met drievoudige gegroefde veer met een geringe vervorming de maximaal mogelijke golven met $H_s = 1,5$ m hebben weerstaan. Deze golfhoogte kon worden gehaald door een zandstrandje voor de dijk toe te passen waardoor de golven groter werden door shoaling.

Normering

De technische omschrijving van de Veralit[®] blokken met doorgaande veer en met de drievoudig gegroefde veer zijn gegeven in de "European Technical Approval ETA-12/0245" (ETA, 2012).

1.3 Opzet van het rapport

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

2 Schaling

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

2.1 Faciliteit

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

Afhankelijk van de waterdiepte en golfperiode kan het golfschot onregelmatige golven opwekken met een significante golfhoogte tot ongeveer $H_s = 1,6$ m. Met deze golfhoogte is het mogelijk de maximale golfcondities op beschutte locaties in estuaria en binnenwateren op volle schaal te reproduceren. Op veel plaatsen langs de Nederlandse kust zijn de maatgevende golven echter tot wel tweemaal zo hoog. Daarom is het onderhavige onderzoek uitgevoerd op schaal. Gekozen is voor een geometrische schaal van 1:2. Bij deze schaling komt de maximale significante golfhoogte die in de Deltagoot kan worden geproduceerd ($H_s = 1,6$ m) overeen met een significante golfhoogte in werkelijkheid van circa $H_s = 3,2$ m.

2.2 Schaling

2.2.1 Algemeen

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

Een geometrische schaal van 1:2 houdt in dat de afmetingen van de zetstenen in de modelopstelling twee maal zo klein moeten zijn als in werkelijkheid. Dit geldt voor zowel verticale als horizontale afmetingen van de zetstenen (hoogte, lengte en breedte), met behoud van de vorm van de zetsteen.

Voor het onderhavige onderzoek zijn Verkalit® GOR stenen als uitgangspunt genomen, die in werkelijkheid 30 cm hoog zijn. De stenen zijn speciaal voor het onderzoek op schaal gemaakt door de opdrachtgever. Daarvoor zijn speciale mallen gemaakt, waarbij alle maten een factor 2 kleiner zijn gekozen dan in werkelijkheid. Dit resulteerde in stenen met een hoogte, die

ongeveer de helft is van de werkelijke hoogte: de gemiddelde gemeten hoogte van de verschaalde blokken is 15,1 cm. De gemiddelde breedte en lengte zijn 14,7 cm en 15,0 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 verscalen 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. Deze schaalregels zijn echter strijdig met elkaar zodat vergaande verscaling tot onbetrouwbare resultaten leidt.

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

$$Fr = \frac{u^2}{gL} \quad (2.1)$$

met:

- Fr = Froude getal (-)
- u = snelheid (m/s)
- g = versnelling van de zwaartekracht (m/s²)
- L = lengte (m)

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

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

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

2.2.3 Schaling dimensieloze parameters

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

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

met:

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

ρ_s = soortelijke massa van de zetstenen (kg/m^3)
 ρ_w = soortelijke massa van het water (kg/m^3)

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

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

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

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

2.2.4 Schaling van stroming in de constructie

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

$$\text{Re} = \frac{Lu}{\nu} \quad (2.3)$$

met:

Re = Reynolds getal (-)
 L = lengte (m)
 u = snelheid of doorlatendheid (m/s)
 ν = kinematische viscositeit (voor water: ca. $1,2 \cdot 10^{-6}$) (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 schaafeffecten verwaarloosbaar. Het huidige onderzoek voldoet hier dus ruimschoots aan.

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

$$\Lambda = \sqrt{\frac{kbD}{k'}} \quad (2.4)$$

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 lek lengte heeft de dimensie m en schaalt met de lengteschaal: $n_{\Lambda} = n_L = 2$. Met het rekenmodel STEENTOETS (Klein Breteler, 2014) is de lek lengte bij een werkelijke dijkopbouw en in het schaalmodel berekend. Met deze berekeningen zijn de gradering en de laagdikte van de filter geschaald.

Voor Verkalit® kan het filter vrij fijn gekozen worden omdat de spleten in de toplaag relatief smal zijn en er geen grote gaten aanwezig zijn waardoorheen het fijne filter kan uitspoelen. Daarom is in de proeven gewerkt met een filter met korrelgrootte van $D_{f15} = 3$ mm en laagdikte van 5 cm. Dit komt volgens de berekeningen met Steentoets overeen met een filter van 7 cm dik en korrelgrootte met een $D_{f15} = 5$ mm in werkelijkheid.

Met een fijner filter (kleinere D_{f15}) en dunner filter wordt de lek lengte kleiner, waardoor bij dezelfde golfcondities het stijghoogteverschil over de toplaag kleiner wordt. Dit stijghoogteverschil is de primaire oorzaak van instabiliteit. Wordt dit kleiner, dan is de stabiliteit groter. Bij steenzettingen met zuilen is dit meestal geen optie, omdat het filtermateriaal dan te makkelijk door de toplaag kan uitspoelen.

De berekende lek lengte is gegeven in Tabel 2.1.

Parameter	Symbool	Eenheid	waarde op ware grootte	waarde op schaal
dikte van de toplaag	D	[m]	0,30	0,15
open oppervlak	Ω	%	6,5	6,5
spleetbreedte	s	[mm]	16	8
filterlaagdikte	b	[m]	0,07	0,05
korrelgrootte	D_{f15}	[mm]	5	3
lek lengte	Λ	[m]	0,16	0,08

Tabel 2.1 Parameter met betrekking tot de stroming met de waarden op ware grootte en de geschaalde waarden

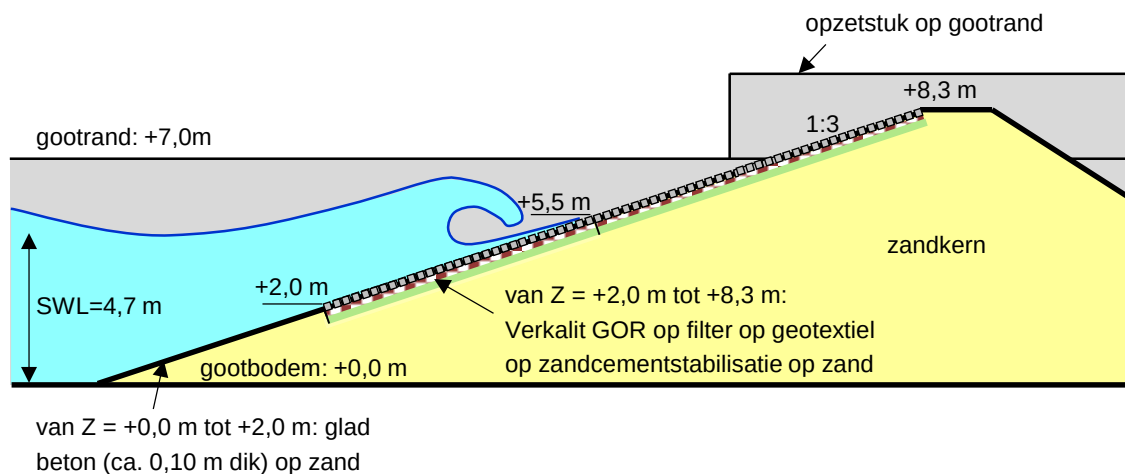
Omdat in de werkelijkheid diverse soorten filtermateriaal en diverse filterlaagdiktes worden toegepast, kunnen in het schaalmodel binnen bepaalde grenzen ook andere waarden gebruikt worden. Uiteindelijk wordt de stabiliteitsfactor bepaald op basis van Steentoets-berekeningen die uitgevoerd worden met exact dezelfde waarden als toegepast is in het schaalmodel. Daardoor heeft de keuze van het filtermateriaal binnen ruime grenzen een verwaarloosbare invloed op de resulterende stabiliteitsfactor.

3 Modelopstelling en proevenprogramma

3.1 Modelopstelling

3.1.1 Algemeen

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



Figuur 3.1 Schematische lengtedoorsnede van de beproefde modelopstelling met Verkalit® GOR

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

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

De testsectie bestaat uit een steenzetting van Verkalit® GOR op een filterlaag op geotextiel. Onder het geotextiel bevindt zich een laag zandcementstabilisatie (zie ook Figuur C.1 in Bijlage C.1). Die simuleert de slecht waterdoorlatende en erosiebestendige kleilaag, die gewoonlijk onder steenzettingen op dijken aanwezig is. Het geotextiel is aangebracht om uitspoeling van eventueel losgekomen zand te voorkomen.

De steenzetting van Verkalit® GOR is op de testsectie op het ondertalud en op het boventalud aangebracht. Voor de stabiliteitsproeven van Verkalit® GOR wordt alleen het ondertalud belast en beschouwd. Het boventalud is aangebracht om in andere proeven de golfoploop te meten. De golfoploopproeven zijn echter in een apart rapport beschouwd. Daarom wordt in dit rapport alleen ingegaan op de eigenschappen van de ondere testsectie. De twee steenzettingen zijn onafhankelijk van elkaar opgebouwd met een houten schot ertussen, dat de bovensectie steunt. Zo kon de steenzetting op het ondertalud onafhankelijk in- en uitgebouwd worden en is er geen invloed te verwachten van de steenzetting in de oploopzone op de normaalkracht in de steenzetting in de golfklapzone.

Een overzicht met de belangrijkste eigenschappen van de testsectie ondertalud (van $Z = 2,0 \text{ m} - 5,5 \text{ m}$) is onderstaand gegeven. De eigenschappen van de testsectie worden in de volgende paragrafen gedetailleerder beschreven.

- Hoogte van de dijk t.o.v. de gootbodem: 8,3 m
- Taludhelling: 1:3
- Verkalit® GOR:
 - Gemiddelde steenhoogte: $D = 15,1 \text{ cm}$ (standaardafwijking 0,04 cm)
 - Gemiddelde breedte: $B = 14,7 \text{ cm}$ (standaardafwijking 0,03 cm)
 - Gemiddelde lengte: $L = 15,0 \text{ cm}$ (standaardafwijking 0,11 cm)
 - Soortelijke massa: gemiddeld $\rho_s = 2342 \text{ kg/m}^3$
 - Relatief open oppervlak: 6,5% (conform NEN7024)
- Filterlaag:
 - Gemiddelde dikte:

Serie 6:	$b = 5,0 \text{ cm}$
Serie 7:	$b = 5,1 \text{ cm}$
Serie 8:	$b = 5,0 \text{ cm}$
 - Gradering:

Serie 6	$D_{f15} = 2,8 \text{ mm}$, $D_{f50} = 5,1 \text{ mm}$ en $D_{f90} = 12,1 \text{ mm}$
Serie 7:	$D_{f15} = 2,7 \text{ mm}$, $D_{f50} = 4,9 \text{ mm}$ en $D_{f90} = 11,8 \text{ mm}$
Serie 8:	$D_{f15} = 2,7 \text{ mm}$, $D_{f50} = 4,9 \text{ mm}$ en $D_{f90} = 11,8 \text{ mm}$
- Geotextiel:
 - dikte $d = 5,3 \text{ mm}$
 - openingsgrootte $O_{90} = 0,10 \text{ mm}$
 - doorlatendheid $q = 37,5 \text{ l/m}^2/\text{s}$
 - wrijvingscoëfficiënt met breuksteen $f_w = 0,89$ (zie Kaste, 2016)
 - non-woven geotextiel

Het open oppervlak van de steenzetting is bepaald volgens NEN7024 op basis van de tekening van de stortmal. De maatgevende doorsnede ligt in de bovenste helft van de messing&groef, zie laatste figuur in Bijlage B.1.

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

$$Z = \frac{X - 168,75}{3,00} \quad (3.1)$$

Met:

- Z = verticale afstand tot de gootbodem (m)
- X = horizontale afstand tot het golfshot (m)

3.1.2 Filterlaag en geotextiel

Voor Verkalit® kan een relatief fijn filtermateriaal gekozen worden omdat de spleten in de toplaag relatief smal zijn en er geen grote gaten aanwezig zijn waardoorheen het fijne filter kan uitspoelen. Daarom is gewerkt met een filter met korrelgrootte met een $D_{f15} = 3$ mm en laagdikte van 5 cm in de Deltagoot. Dit komt volgens de berekeningen met Steentoets overeen met een filter van 7 cm dik en korrelgrootte van $D_{f15} = 5$ mm in werkelijkheid.

Bij steenzettingen met zuilen kan het filter doorgaans niet fijner gekozen worden, omdat dan het filter kan uitspoelen door de toplaag. De spleten in Verkalit® GOR hebben in de Deltagoot een breedte van 8 mm, terwijl er een filter is toegepast met korrelgrootte 2 – 16 mm. Met de zeefkromme van Figuur B.1 in paragraaf B.3 is te zien dat daardoor 30% van het filter een te grote korrelgrootte heeft om door de spleten te gaan. Tijdens de proeven is gebleken dat dit voldoende is om uitspoeling te voorkomen.

Omdat in de werkelijkheid diverse soorten filtermateriaal met diverse diktes kunnen worden toegepast, hadden in het schaalmodel binnen bepaalde grenzen ook andere waarden gebruikt kunnen worden. De gemeten karakteristieke waarden zijn hierboven in het overzicht gegeven. De gemeten zeefkrommes zijn gegeven in Bijlage B.3.

Als geotextiel is bij deze proeven door de opdrachtgever gekozen voor Naue Terrafix 609, een dik non-woven geotextiel (zie Figuur C.2 en Figuur C.3 in Bijlage C.1). De eigenschappen van het geotextiel is in het bovenstaande overzicht gegeven.

Filterlaagdikte:

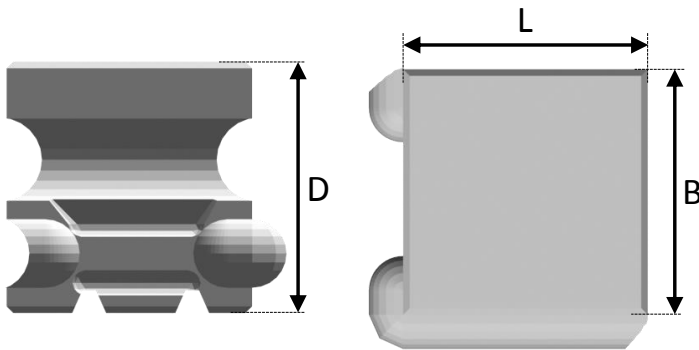
Tijdens het hele onderzoek is driemaal een nieuwe filterlaag aangebracht (zie Figuur 3.3, links, en Figuur C.4 in Bijlage C.1): voorafgaand aan elke serie. Van de filterlagen is de dikte gemeten op 24 locaties (zie Bijlage B.2 en Figuur C.5 in Bijlage C.1). Daarvan zijn de meeste metingen uitgevoerd in de zone waarin de schade aan de bekleding werd verwacht. De filterlaagdikte is gedefinieerd als de afstand loodrecht op het talud, tussen het geotextiel en de onderzijde van de blokken. De filterlaagdikten zijn in bovenstaand overzicht gegeven.

Filtergradering:

Van het gebruikte filtermateriaal zijn tijdens de inbouw van de stenen monsters genomen (zie Bijlage B.2 voor de locaties en Figuur C.6 in Bijlage C.1 voor een voorbeeld). Vervolgens zijn zeefkrommes gemaakt en weergegeven in Bijlage B.3. Het filtermateriaal is samengesteld door meerdere standaard steensorteringen te mengen, zodanig dat de beoogde gradering werd verkregen.

3.1.3 Verkalit® GOR

De testsectie heeft een toplaag van Verkalit® blokken van het type “GOR”. De blokken zijn op schaal 1:2 machinaal geproduceerd met een stalen mal en aardvochtig beton. De blokken hebben een gemiddelde hoogte $D = 15,1$ cm (zie Figuur 3.2 voor de definitie), welke is bepaald op basis van 10 blokken, waarvan de individuele hoogte varieerde van 15,0 cm tot 15,1 cm. Ook de lengte en de breedte van de blokken zijn opgemeten (zie Figuur 3.2 voor de definitie). De breedte van de blokken heeft een gemiddelde van $B = 14,7$ cm met een minimum van 14,6 cm en een maximum van 14,7 cm. De lengte heeft een gemiddelde van $L = 15,0$ cm, met een range van 14,9 cm tot 15,2 cm. Een tekening met de ontwerpmaten van de Verkalit® blokken op ware grootte is gegeven in Bijlage B.1.



Figuur 3.2 Definitie afmetingen van de Verkalit® GOR

Soortelijke massa:

De soortelijke massa van de blokken is bepaald van 10 blokken. De gemiddelde soortelijke massa is $\rho_s = 2342 \text{ kg/m}^3$ (met $\rho_{s,\max} = 2358 \text{ kg/m}^3$ en $\rho_{s,\min} = 2328 \text{ kg/m}^3$). De soortelijke massa is bepaald door de natte blokken boven water en onder water te wegen. De dichtheid kan daaruit afgeleid worden met de volgende formule:

$$\rho_s = \frac{M_{\text{boven}}}{(M_{\text{boven}} - M_{\text{onder}})} \cdot 1000 \quad (3.2)$$

met:

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



Figuur 3.3 Links: aanbrengen en afvlakken van de filterlaag met een balk. Rechts: plaatsen van de Verkalit® blokken

Wrijvingscoëfficiënt:

De blokken zijn van aardvochtig beton vervaardigd. De wrijvingscoëfficiënt is met 40 metingen bepaald en bleek gemiddeld 0,68 te zijn, met een standaardafwijking van 0,055.

De wrijvingsproeven zijn uitgevoerd door een blok op een plank vast te maken en een ander blok daarop te leggen (zie Figuur 3.4). Vervolgens is de helling van de plank vergroot totdat het bovenste blok van de onderste afschoof en is de hoek tussen de plank en de grond genoteerd. De tangens van deze hoek is de wrijvingscoëfficiënt.



Figuur 3.4 Opstelling van de wrijvingsproeven voor Verkalit® GOR met extra gewicht

De wrijvingsproef is uitgevoerd voor 14 contactvlakken met telkens twee herhalingen. Steeds zijn de proeven uitgevoerd met natte blokken. Omdat de blokken het interlocksysteem hebben en de wrijving van de zijkanten dus moeilijker te meten is, is de wrijving tussen de bovenkanten van de blokken, resp. tussen een bovenkant en een onderkant, gemeten.

Voor sommige contactvlakken is de wrijvingsproef herhaald met een extra gewicht van 10 kg bovenop het bovenste blok (zie Figuur 3.4). Het extra gewicht heeft, zoals te verwachten is, geen noemenswaardige invloed op de wrijvingscoëfficiënt.

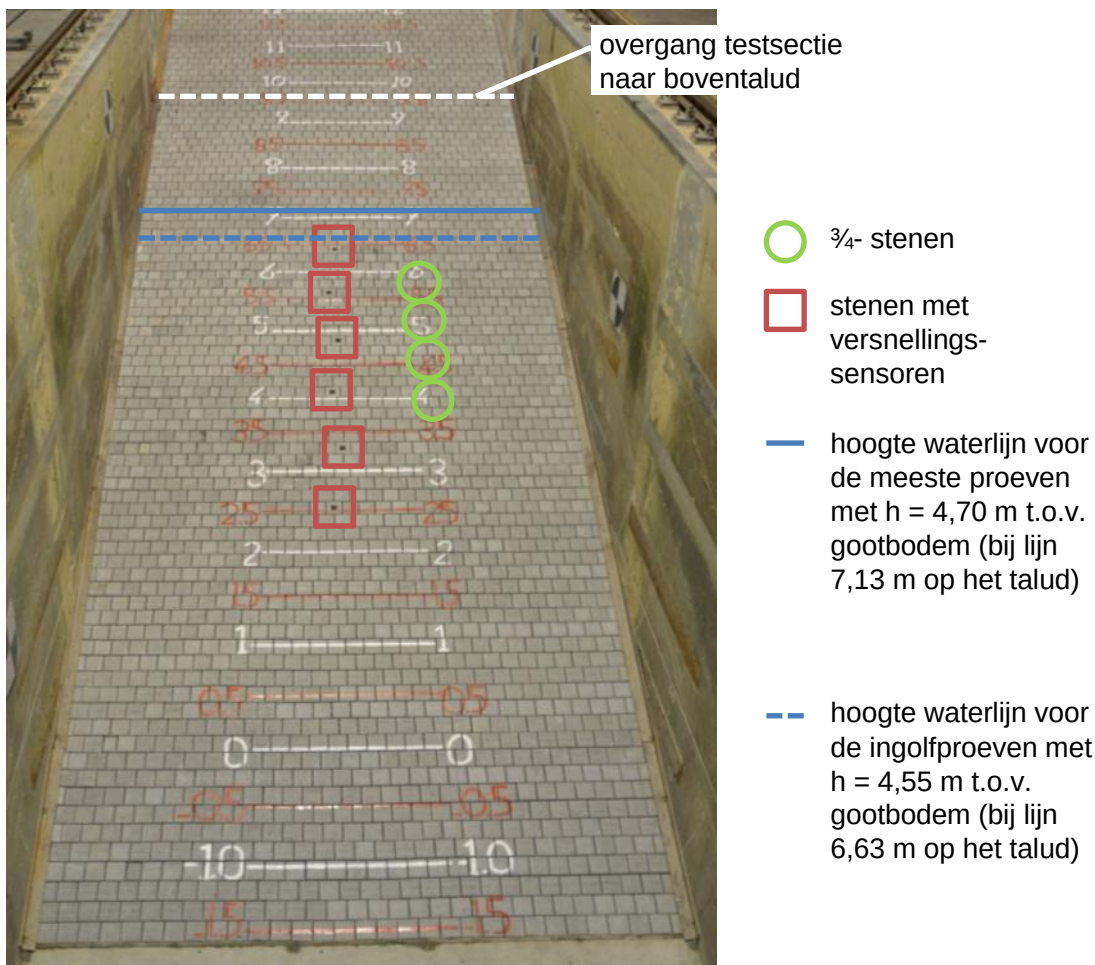
Plaatsing:

De Verkalit® blokken zijn met de hand geplaatst (zie Figuur 3.3, rechts en Figuur C.7 in Bijlage C.1) conform de tekening van de opdrachtgever (zie Bijlage B.1), dus met de gegroefde veer wijzend naar links (van de teen van het talud uit gezien) en de hele veer wijzend naar de teen. De stenen zijn in ongeveer halfsteensverband gezet, beginnend op de meetcabinezijde met afwisselend en hele en een halve steen (zie Figuur C.9 in Bijlage C.1). Door maatafwijkingen zaten de spleten in de bovenliggende rijen niet altijd halverwege de blokken.

Boven de testsectie, vanaf +5,5 m boven de gootbodempl (bij lijn 9,5 m op het talud, zie Paragraaf 3.1.4) is eveneens een steenzetting van Verkalit® GOR aangebracht. Die was tijdens eerdere proeven ingebouwd om de golfoplooppremmende werking van Verkalit® GOR te testen. Dit is in een apart rapport geanalyseerd.

Voor de bovenste rij van de testsectie op het ondertalud zijn de meeste blokken gezaagd om erin te passen (zie Figuur C.11 en Figuur C.12 in Bijlage C.1).

In Figuur 3.5 is een overzicht van de testsectie te zien.



Figuur 3.5 Overzicht van de testsectie met Veralit® voor Serie 6 (links is halzijde en rechts is meetcabinezijde)

Als op de dijk het patroon iets verloopt, bijvoorbeeld door een bocht, wordt er een $\frac{3}{4}$ -steen geplaatst, om het patroon weer op een halfsteensverband te brengen. Om de invloed hiervan op de stabiliteit te kunnen onderzoeken zijn in de proeven in 4 rijen een $\frac{3}{4}$ -steen toegepast. Deze liggen in de zone, waar de grootste belasting verwacht wordt. De $\frac{3}{4}$ -stenen zijn in Figuur 3.5 te zien in de groene cirkels. De $\frac{3}{4}$ -stenen zijn gemaakt van Veralit®-stenen zonder het kanaalsysteem (type Veralit® mgv), omdat ze met het kanaalsysteem te kwetsbaar zijn (zie ook Figuur C.8 in Bijlage C.1). Dit zal volgens de opdrachtgever ook zo worden gedaan op de dijk.

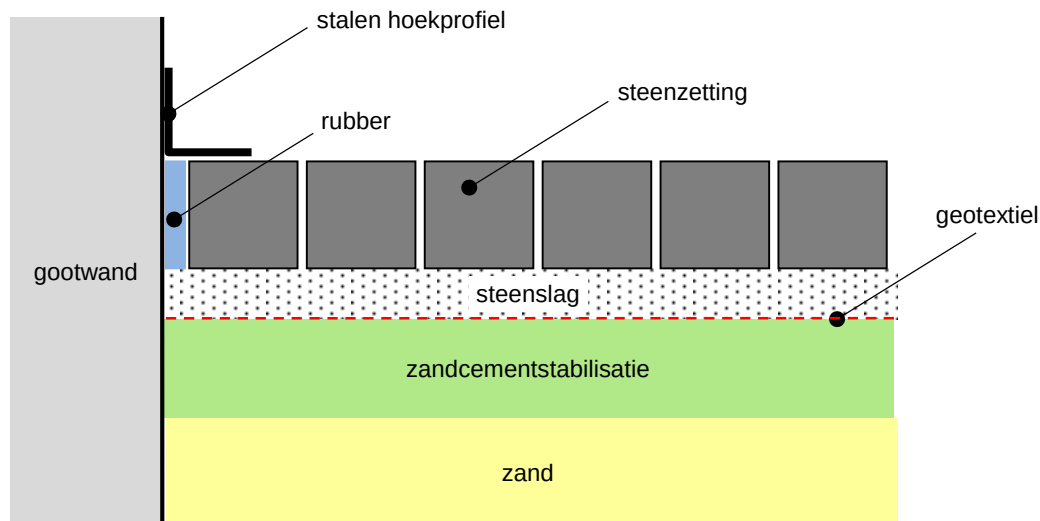
Bij de proeven zijn in 6 blokken versnellings-sensoren geplaatst om de beweging van de blokken tijdens de proeven te meten (zie Paragraaf 3.2.4 en 5.1). De blokken zijn ook in de zone geplaatst, waar de grootste belasting verwacht wordt. Deze blokken zijn in Figuur 3.5 met een rode rechthoek gemarkeerd. Op de foto zitten de instrumenten nog niet in de stenen en is er daarom een rond gat te zien.

3.1.4 Afwerking van de modelranden en aanbrengen markering

Tussen de gootwand en de bekleding is een strook rubber aangebracht, zie Figuur 3.6. 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 blokken naar het rubber en van het rubber naar de gootwanden (zie Figuur C.10 in Bijlage C.1).

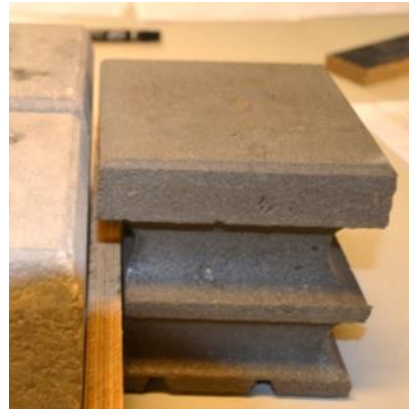
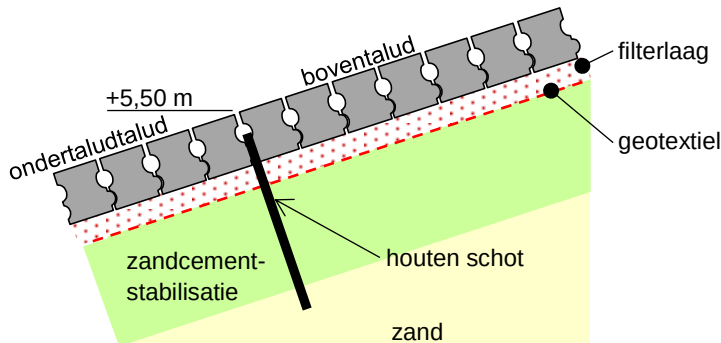


Figuur 3.6 Aansluiting van de steenzetting tegen de gootwand (schematische dwarsdoorsnede)

Zoals is te zien in Figuur 3.5, is op het talud belijning aangebracht ten behoeve van het uitvoeren van golfploopmetingen (zie Paragraaf 3.2.3) en ten behoeve van het vastleggen van de proefresultaten. De lijnen zijn op het talud geschilderd met een onderlinge afstand van 0,5 m, gemeten langs het talud (dit komt neer op een hoogteverschil tussen de lijnen van circa 15,8 cm). Locaties op het talud, in de lengterichting van de goot, worden in dit rapport meestal uitgedrukt als x' -coördinaat, waarbij de waarde van x' correspondeert met het lijnnummer, bijvoorbeeld: lijn 8,5 komt overeen met $x' = 8,5$ m. Merk op dat de teenzijde van de testsectie niet begint bij lijn 0, omdat de belijning van voorgaande Deltagootproeven is aangehouden. Voor de posities van de lijnen wordt verwezen naar Bijlage A.1.

Boven de beproefde testsectie is er ook een steenzetting van Verkalit® GOR aangelegd op het boventalud. Dit is gebruikt voor golfplooppoeven, die in een apart rapport beschreven zijn (Van Steeg, 2015). Tussen de twee steenzettingen zit een houten schot dat het bovenste deel steunt, zodat geen normaalkrachten in het onderste deel doorgegeven worden (zie Figuur 3.7, links). Dit is belangrijk, omdat alleen de onderste steenzetting zal worden beschouwd voor de stabiliteitsproeven.

Voor de aansluiting op het houten schot zijn van de stenen van de onderste rij van het boventalud de gesloten veer en een deel van de onderzijde van de steen afgezaagd (zie Figuur 3.7, rechts). Daardoor sluit de bovenste rij van het ondertalud netjes aan op de onderste rij van het boventalud met een spleetbreedte gelijk aan de overige spleten.



Figuur 3.7 Overgang testsectie naar boventalud (links: schematisch; rechts: model van de overgang)

3.2 Metingen

Gedurende het onderzoek zijn de volgende metingen uitgevoerd:

- Golfcondities
- Profielmetingen
- Golfploopmetingen
- Beweging van de blokken tijdens de proeven

Bovengenoemde metingen worden in de onderstaande paragrafen toegelicht.

3.2.1 Golfcondities

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

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

$$H_i = \frac{H_t}{\sqrt{1 + C_r^2}} \quad (3.3)$$

met:

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

Voor de golfhoogtemeters is een bemonsteringsfrequentie van 200 Hz gebruikt.

3.2.2 Profielmetingen

Het oppervlak van de steenzetting is gemeten met een 3D laserscanner (*FARO Focus^{3D} Multi Sensor Laser Scanner*) in combinatie met de software *SCENE 5.0*. Met behulp van de 3D laserscanner wordt een compleet 3D beeld van het talud gemaakt. De resulterende figuur is een verzameling van miljoenen ingemeten punten welke een digitale reproductie van het werkelijke taludoppervlak vormen.

De laserscanner hangt tijdens de meting boven de goot (zie Figuur 3.8) en projecteert een laserstraal vanuit een draaiende spiegel richting de in te meten oppervlakte. Na terugkaatsing via het talud wordt de straal weer opgevangen door de scanner. Vervolgens kunnen de afstand tot het talud en de relatieve verticale en horizontale hoeken worden berekend. Deze data wordt vastgelegd ten behoeve van het genereren van een 3D profiel.

De laserscans zijn standaard uitgevoerd vanaf twee locaties boven de testsectie ($x = 184,20$ m en $x = 187,73$ m vanaf het golfschot, in het hart van de goot), waarna de resultaten van beide 3D scans zijn gecombineerd. Dit vergroot de nauwkeurigheid.

De laserscans zijn vóór elke proefserie en in elke serie na elke proef uitgevoerd. Daarmee zijn verschilplots aangemaakt van het talud na een proef ten opzichte van voor de proefserie. Deze verschilplots van de laserscans zijn per proef weergegeven in de Bijlage B.5.



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

3.2.3 Golfploopmetingen

Tijdens elke test zijn er golfploopmetingen uitgevoerd. Deze golfploopmetingen worden apart gerapporteerd (Van Steeg, 2015).

De oploophoogte van elke golfploop is zowel vastgelegd op video als visueel waargenomen en genoteerd. Ten behoeve van de golfploopmetingen zijn lijnen op het talud geschilderd met een onderlinge afstand van 0,5 m, gemeten langs het talud (dit komt neer op een hoogteverschil tussen de lijnen van circa 15,8 cm). Locaties op het talud, in de lengterichting van de goot, worden in dit rapport meestal uitgedrukt als x' -coördinaat, waarbij de waarde van x' correspondeert met het lijnnummer, bijvoorbeeld: lijn 8,5 komt overeen met $x' = 8,5$ m. Voor de posities van de lijnen wordt verwezen naar Bijlage A.1.

Bij een waterstand $h = 4,70$ m snijdt de stilwaterlijn het oorspronkelijke taludoppervlak bij $x' = 7,13$ m. Bij waterstand $h = 4,55$ m (ingolfproeven) snijdt de stilwaterlijn het oorspronkelijke taludoppervlak bij $x' = 6,63$ m.

Tijdens de proeven is per golf steeds de hoogst overschreden lijn van elke oploop genoteerd. Dit is gewoonlijk gedaan gedurende 60 minuten van elke proef, maar tijdens enkele proeven is korter gemeten, vanwege de kortere proefduur.

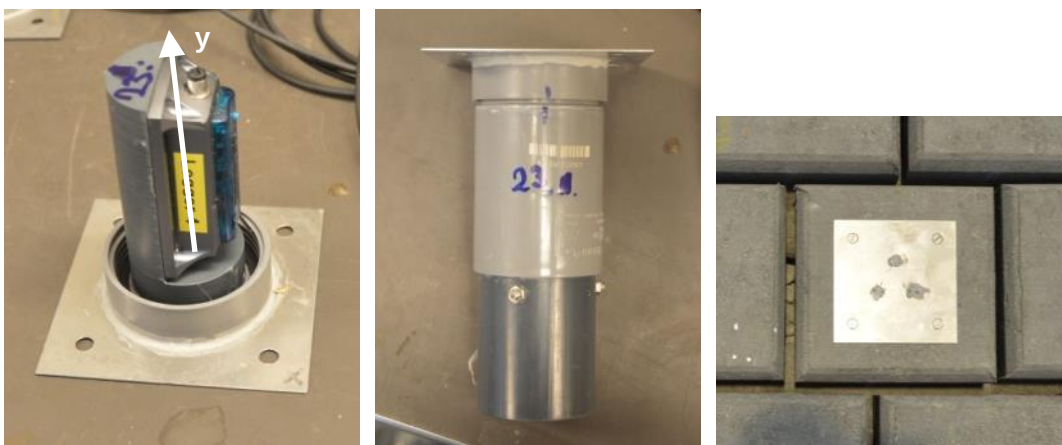
3.2.4 Meting van de beweging van de blokken tijdens de proeven

Gezien het verwachte bezwijkmechanisme is het voor dit type steenzetting relevant om de beweging van de blokken tijdens de proeven te meten. Door het interlock-systeem is er een samenhangend oppervlak, dat alleen in zijn geheel opgedrukt kan worden door de stijghoogteverschillen als gevolg van de brekende golven. Afzonderlijke blokken kunnen niet uit de steenzetting gelicht worden. Zodra de stijghoogteverschillen groot genoeg zijn om de steenzetting in beweging te krijgen, zal het filter de ruimte krijgen om te gaan migreren. Daardoor kan er een blijvende vervorming van het taludoppervlak ontstaan (S-profiel).

De eerste fase van het proces naar bezwijken is dus het op en neer bewegen van de toplaag tijdens grote golven. De vorming van zo'n S-profiel is de tweede fase en in de derde fase kan de steenzetting uiteindelijk opbarsten. Door het uitvoeren van metingen aan de bewegingen van de toplaag is het mogelijk de eerste fase van het bezwijkproces te identificeren.

De metingen zijn gedaan met versnellingssensoren in het gebied met de grootste verwachte belasting door stijghoogteverschillen. De sensoren zijn op 6 locaties geplaatst, halverwege de breedte van goot (zie Figuur 3.5). De sensoren kunnen de versnelling in 3 richtingen meten en zijn zodanig in de blokken geplaatst, dat de y-as haaks op het talud staat (zie Figuur 3.9, links). De versnelling moet twee keer geïntegreerd worden om de beweging te berekenen, zoals nader beschreven is in Paragraaf 5.1.

De versnellingssensoren zijn in een waterdicht huisje geplaatst (zie Figuur 3.9, midden). De huisjes zijn in een gat in het midden van een steen geplaatst en met schroeven vastgezet (zie Figuur 3.9, rechts). Er is staal in het huisje toegevoegd om het gewicht van het geïnstrumenteerde blok hetzelfde te laten zijn als de normale blokken.



Figuur 3.9 Links: versnellingsopnemer ingebouwd in zijn huisje; midden: gesloten huisje van de versnellingsopnemer; rechts: versnellingsopnemer ingebouwd in de steenzetting

De metingen worden doorgevoerd met een frequentie van 50 Hz. De meetdata worden in het instrument zelf opgeslagen. Na elke proef is het uit de steen gehaald en zijn de meetdata uitgelezen. Op deze wijze waren er geen draden nodig van het instrument naar de meetcabine.

3.3 Proevenprogramma

Het proevenprogramma bestaat uit drie testseries, zie Tabel 3.1. De eerste twee proevenseries bestaan uit korteduurproeven van circa 1000 golven, waarvan de eerste serie is uitgevoerd met relatief lange golven en een kleine golfsteilheid (golfsteilheid van 2%) en de tweede serie met relatief korte golven en een grotere golfsteilheid (golfsteilheid van 4%). Binnen deze series wordt bij elke volgende proef de golfhoogte steeds een stukje opgehoogd totdat de bekleding bezwijkt.

Tijdens de derde proevenserie is een langeduurproef uitgevoerd. Deze proef, met gelijkblijvende golfcondities, is voortgezet totdat de steenzetting bezweek. Deze serie geeft inzicht in de langeduursterkte van de bekleding. De langeduurproef van de derde serie is uitgevoerd met golfcondities die tijdens de tweede serie (met dezelfde golfsteilheid) nog net geen schade hadden opgeleverd.

De nummering van de proevenseries sluit aan bij voorafgaande proeven met Verkalit[®] mgv. Dus zijn de series voor Verkalit[®] GOR Serie 6, 7 en 8.

Serie	Soort serie	Golfsteilheid s_{op} (-)
6	Korteduurproeven	2%
7	Korteduurproeven	4%
8	Langeduurproeven	4%

Tabel 3.1 Overzicht proevenseries

Na elke proef is de vervorming van het taludoppervlak (S-profiel) met de laserscanner ingemeten. Omdat de analyse van de laserscanner enige tijd duurt, is aanvullend de vervorming met een balk ingemeten, als nodig. De vervormingen zijn tijdens de proevenseries niet hersteld tenzij anders vermeld.

Aan het begin van de proevenseries zijn op de nieuw aangelegde steenzetting eerst ingolfproeven uitgevoerd. Tijdens deze ingolfproeven was de waterstand 4,55 m boven de gootbodem. Tijdens alle andere stabiliteitsproeven is een waterstand aangehouden van 4,70 m boven de gootbodem. Na afloop van elke proef is de waterstand verlaagd en is de bekleding geïnspecteerd om te zien of er al schade was ontstaan.

De proeven zijn uitgevoerd met onregelmatige golven. De golfcondities van de proeven worden gekarakteriseerd door de significante golfhoogte (H_s), de spectrale golfperiode ($T_{m-1,0}$) en de piekperiode (T_p). Alle proeven zijn uitgevoerd met een Jonswap spectrum. Dit spectrum is karakteristiek voor de golfcondities langs de Nederlandse kust.

In Tabel 3.2 zijn de gerealiseerde golfcondities (in modelwaarden) weergegeven. Merk op dat waar in de tabel de significante golfhoogte H_s genoemd wordt, het in werkelijkheid de op het golfspectrum gebaseerde H_{m0} betreft. Beide komen echter sterk overeen. De golfhoogte-

overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra van de uitgevoerde proeven zijn weergegeven in de Bijlage B.4.

Een proef werd gestopt zodra er bezwijken was ontstaan of zodra de vooraf ingestelde duur was bereikt (meestal ca. 1000 golven). Een serie proeven is beëindigd bij het optreden van bezwijken tijdens een proef, of als de capaciteit van de Deltagoot het niet toelaat om grotere golven te maken. De genoemde waarden in Tabel 3.2 betreffen de condities zoals gemeten in de Deltagoot (schaal 1:2). De overeenkomstige belastingduur is in werkelijkheid dus $\sqrt{2}$ groter.

Serie	Proef	h [m]	H _s [m]	T _p [s]	T _{m-1,0} [s]	S _{op} [-]	S _{om} [-]	ξ _{op} [-]	ξ _{om} [-]	N [-]	duur [h]	H _s /(ΔD) [-]
6	V24	4,55	0,68	4,58	4,34	0,021	0,023	2,32	2,20	475	0,50	3,34
	V25	4,70	0,86	5,16	4,76	0,021	0,024	2,32	2,14	1012	1,17	4,23
	V26	4,70	0,99	5,63	5,28	0,020	0,023	2,35	2,21	999	1,27	4,90
	V27	4,70	1,14	6,09	5,74	0,020	0,022	2,37	2,24	983	1,35	5,64
	V28	4,70	1,32	6,64	6,13	0,019	0,023	2,40	2,22	1013	1,45	6,53
	V29	4,70	1,56	7,02	6,38	0,020	0,024	2,34	2,13	1036	1,55	7,67
7	V30	4,55	0,84	3,69	3,47	0,039	0,044	1,68	1,58	567	0,50	4,12
	V31	4,70	0,85	3,69	3,46	0,040	0,046	1,66	1,56	1033	0,90	4,21
	V32	4,70	1,01	3,98	3,77	0,041	0,045	1,65	1,57	1013	0,98	4,96
	V33	4,70	1,15	4,28	4,09	0,040	0,044	1,66	1,59	1024	1,05	5,69
	V34	4,70	1,36	4,65	4,48	0,040	0,043	1,66	1,60	980	1,10	6,70
	V35	4,70	1,45	4,95	4,84	0,038	0,040	1,71	1,68	176	0,20	7,14
8	V36	4,55	0,67	3,31	3,12	0,039	0,044	1,68	1,59	627	0,50	3,30
	V37	4,70	1,10	4,16	4,00	0,041	0,044	1,65	1,59	2008	2,00	5,44
	V38	4,70	1,12	4,25	3,96	0,040	0,046	1,67	1,56	3900	4,00	5,52
	V39	4,70	1,11	4,23	4,00	0,040	0,044	1,67	1,58	8065	8,00	5,46
	V40	4,70	1,11	4,20	3,99	0,040	0,045	1,66	1,58	12013	12,00	5,47

Tabel 3.2 Proevenprogramma met de gerealiseerde golfcondities

In deze tabel zijn de volgende parameters gebruikt:

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

H_s = significante golfhoogte (m)

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

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

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

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

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

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

g = versnelling van de zwaartekracht (m/s²)

α = taludhelling (°)

N = aantal golven (-)

H_s/(ΔD) = belastingparameter (-)

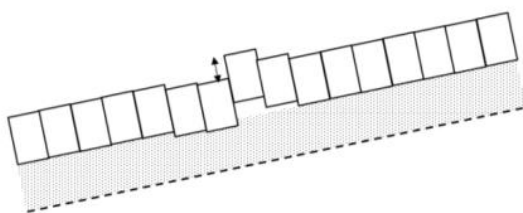
4 Proefresultaten en observaties

4.1 Definitie van de schadecategorieën

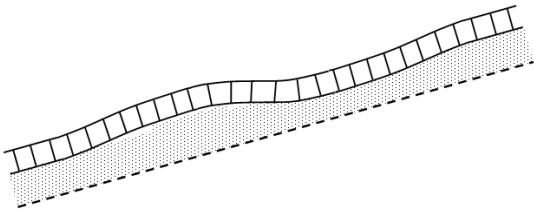
In dit hoofdstuk zijn de proefresultaten besproken. Hiervoor is de schade aan de steenzetting gekarakteriseerd volgens de volgende schadecategorieën (categorie a t/m d):

- a) De verplaatsing van een zetsteen ten opzichte van een naastliggend zetsteen is kleiner dan 10 % van de dikte van de toplaag ($0,1 \cdot D$, 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 $8 \cdot D$ tot $15 \cdot D$ (in het dwarsprofiel) net zoveel verzakt is als de dikte van de filterlaag, of
 - er is een zetsteen gebroken (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 bezwiken 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 6: korteduurproeven, kleine golfsteilheid (proeven V24 – V29)

Proef V24 (ingolfproef, $H_s = 0,68$ m), proef V25 ($H_s = 0,86$ m) en proef V26 ($H_s = 0,99$ m)

De serie begon met een ingolfproef met een lagere waterstand. Daarna werd stap voor stap de golfhoogte verhoogd. Tijdens de eerste drie proeven van de eerste serie voor Verkalit® GOR is er slechts een kleine vervorming opgetreden (schadecategorie a, zie Figuur C.14 t/m Figuur C.16 in Bijlage C.1).

Na proef V26 was een lichte vervorming te zien met een amplitude van 0,9 cm. Het taludoppervlak was niet gewoon S-vormig geworden (met één verdiepte strook en één opgebolde strook), maar had twee bulten met een dal ertussen. De grootste bult lag ongeveer bij $x' = 3,5$ m, de wat lagere bult lag bij ca. $x' = 4,5$ m (zie Figuur 4.3).



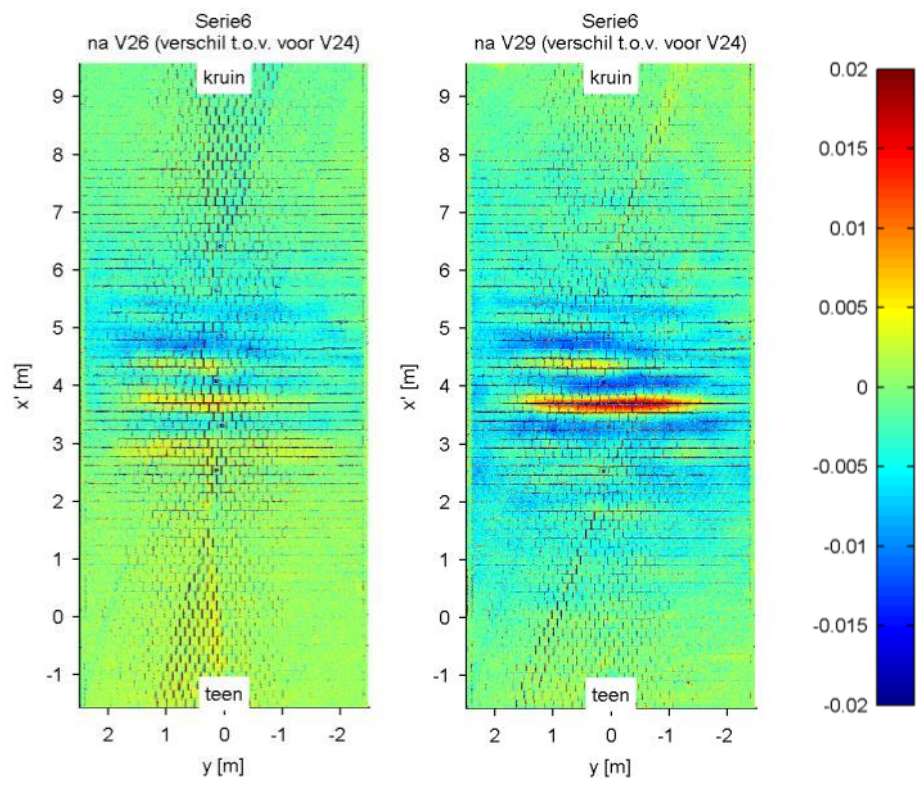
Figuur 4.3 Foto van het talud na proef V26

De vervorming is ook in de verschilplot van de laserscans van proef V26 t.o.v. voor Serie 6 te zien (zie Figuur 4.4, links). Bij de bult bij lijn 3,5 is er een verhoging van de steenzetting van 0,8 cm. Bij het dal was er een verlaging van de stenen van 1,1 cm. Dit geeft een amplitude van de vervorming van 0,9 cm, die in schadecategorie a ligt.

Omdat het filtermateriaal vrij fijn is, kunnen de kleinste korrels uit het filter door de open spleten in de steenzetting uitspoelen (waar de veer onderbroken is om water door te laten). Voor een deel blijven ze op de gesloten spleten liggen (waar de spleet gesloten is door de

veer, zie Figuur 4.5 voor een voorbeeld). Bij de eerste proeven is er wel wat filtermateriaal op de gesloten spleten gespoeld, maar niet veel.

Ook vullen de spleten zich van beneden met de kleinere korrels uit het filtermateriaal. Dit is na elke proef opgemeten bij elke belijning op drie plekken ter plaatse van de open spleet (links, midden, rechts, zie Figuur C.24 in Bijlage C.2). De gemeten waarden zijn gegeven in Bijlage B.6. Na proef V26 zat er gemiddeld 2 á 3 cm filtermateriaal van beneden in de open spleten tussen de 4- en de 7-m-lijn. Dit is gemeten ten opzichte van de onderzijde van de blokken. Aan de bovenkant van de testsectie, vanaf de 8-m-lijn, zijn de spleten iets hoger gevuld, ca. 3 á 5 cm. Op de rest van het talud was het 0 á 1 cm. Het volume aan filtermateriaal dat zich heeft verplaatst naar de spleten is gering. Dit leidde niet tot verzakkingen of holtevorming.



Figuur 4.4 Verschilplots van de laserscans na V26 (links) en V29 (rechts) t.o.v. voor Serie 6

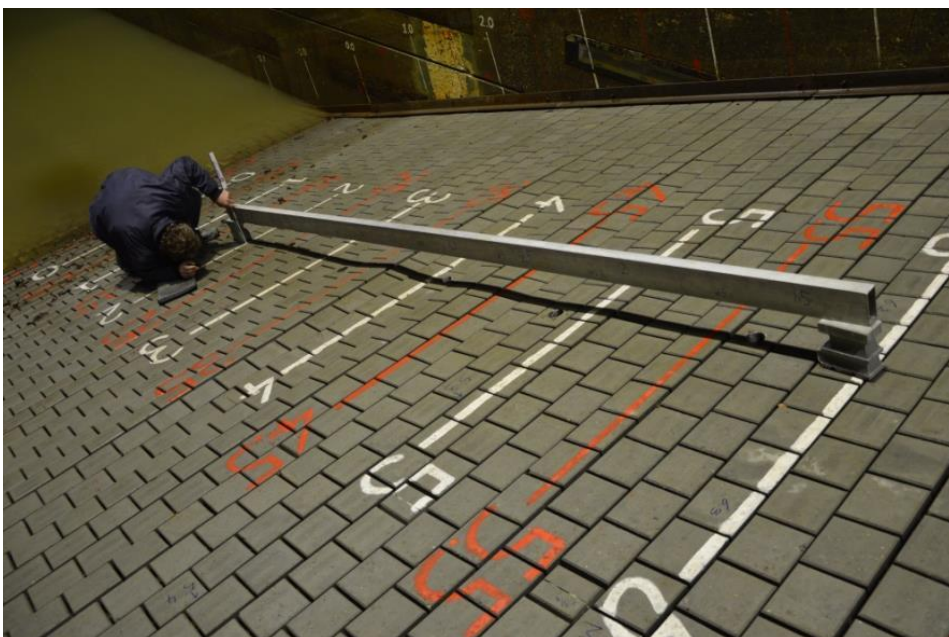


Figuur 4.5 Voorbeeld van het filtermateriaal op de gesloten spleet (na proef V33)

Proef V27 ($H_s = 1,14$ m), proef V28 ($H_s = 1,32$ m) en proef V29 ($H_s = 1,56$ m)

Bij deze proeven is de golfhoogte eveneens bij elke proef verhoogd (zie Figuur C.17 en C.22 in Bijlage C.2 voor een impressie van de golven). Na afloop van proef V29 was de vervorming van de steenzetting iets groter, maar was de steenzetting nog niet bezwaken (schadecategorie a, zie Figuur C.18 t/m C.23 in Bijlage C.2). Vanwege de maximale capaciteit van de golfmachine kon de golfhoogte niet verder meer opgehoogd worden boven $H_s = 1,56$ m en is de proevenserie gestopt.

De vervormingen zijn tijdens de laatste drie proeven van Serie 6 iets groter geworden. In Figuur 4.6 is een foto van de steenzetting na proef V29 gegeven en daarin is de vervorming duidelijk zichtbaar. De bult bij de 3,5-m-lijn had nu een verhoging van 1,8 cm en het dal was 1,4 cm verzakt, zie het resultaat van de laserscan in Figuur 4.4, rechts. Dit geeft een amplitude van 1,6 cm wat nog steeds in schadecategorie a ligt. Daarmee gold de steenzetting nog steeds niet als bezwaken. Maar omdat de golfhoogte niet verder vergroot kon worden, is de serie gestopt.



Figuur 4.6 Foto van het talud na V29

Na proef V29 is geconstateerd dat de spleten bijna op het hele talud van beneden gevuld waren tot 2 á 3 cm ten opzichte van de onderzijde van de blokken. Onder de 2-m-lijn wordt dit minder (zie Bijlage B.6).

De steenzetting en het filter zijn na deze proef tot op 1,5 m verwijderd en opnieuw ingebouwd. In de zwaarst belaste zone, tussen ca. 3,0 m en ca. 5,5 m, zijn hiervoor nieuwe stenen gebruikt.

4.3 Serie 7: korteduurproeven, grote golfsteilheid (proeven V30 – V35)

Proef V30 (ingolfproef, $H_s = 0,84$ m), proef V31 ($H_s = 0,85$ m) en proef V32 ($H_s = 1,01$ m)

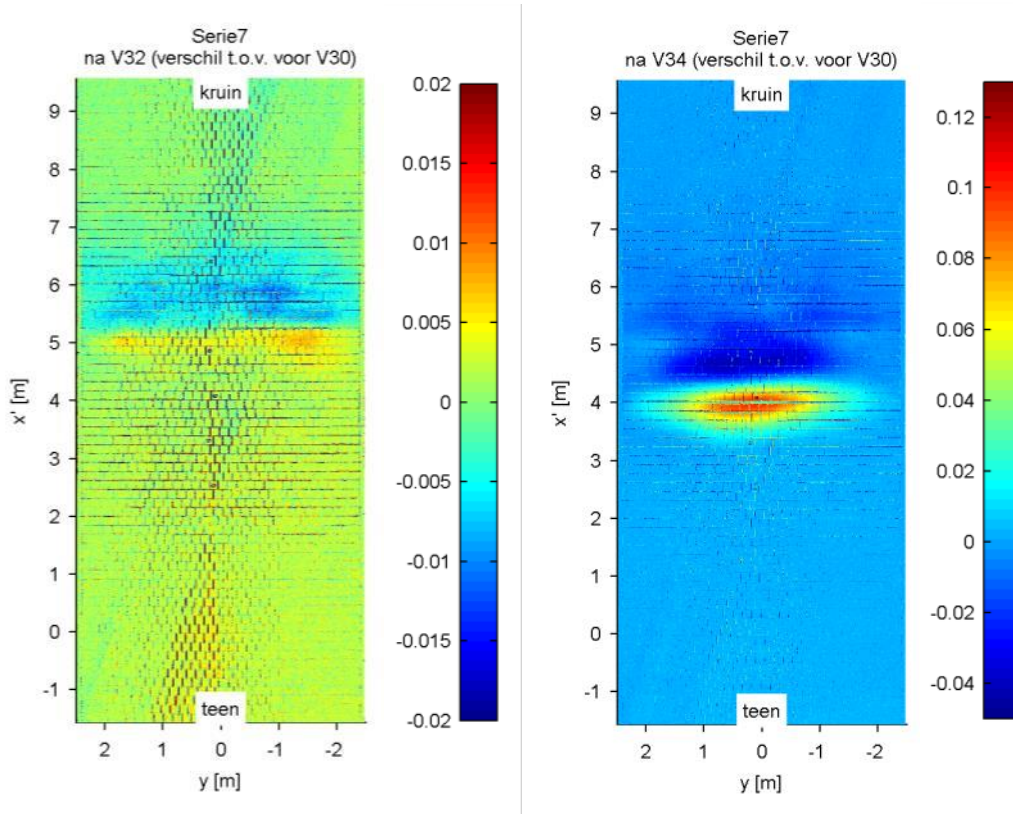
De proevenserie 7 begon met een ingolfproef en in de volgende proeven is de golfhoogte steeds verder verhoogd (zie Figuur C.28 in Bijlage C.3 voor een impressie van de golven). Na de eerste drie proeven (V30 t/m V32) was de vervorming op het talud nog steeds gering, (schadecategorie a). Figuur 4.7 toont de steenzetting na proef V32 (zie Figuur C.26 t/m Figuur C.29 in Bijlage C.3).



Figuur 4.7 Steenzetting na proef V32

Vanuit de verschilplots van de laserscanner blijkt dat na proef V32 een klein dal van ca. 1,0 cm tussen de 5,5 m en 6 m aanwezig is (zie Figuur 4.8, links). Rond de 5-m-lijn is een lichte bolling ontstaan, met ca. 0,9 cm hoogte. Dit geeft een amplitude van 1,0 cm en daarmee nog duidelijk schadecategorie a.

Bij de proeven van Serie 7 is opnieuw opgevallen dat een deel van de fijne korrels van het filtermateriaal blijkbaar uit de spleten is gespoeld en nu tussen de stenen zit (zie Figuur 4.5). Het uitgespoelde filtermateriaal is bij elke proef wat meer geworden. Ook was zichtbaar dat het filtermateriaal in de open spleet, bij de gegroefde veer, hoger van beneden tussen de stenen zit. Uit de metingen blijkt dat na proef V32 het filtermateriaal ca. 1 á 2 cm hoog in de spleten zit. Plaatselijk zijn de spleten ook tot 5 cm gevuld bij de 1,5-m-lijn (zie ook Bijlage B.6). Het volume aan filtermateriaal dat zich heeft verplaatst naar de spleten was wederom gering. Dit leidde niet tot verzakkingen of holtevorming, waaruit blijkt dat de korrelgrootte van het filter voldoende groot is ten opzichte van de spleetbreedte om uitspoeling te voorkomen.



Figuur 4.8 Verschilplots van de laserscans na V32 (links) en V34 (rechts) t.o.v. voor Serie 7 (let op de verschillende schalen)

Proef V33 ($H_s = 1,15$ m) en proef V34 ($H_s = 1,36$ m)

Bij de proeven V33 en V34 was de golfhoogte weer steeds groter ingesteld tot een golfhoogte van $H_s = 1,36$ m was bereikt (zie Figuur C.30 en Figuur C.32 in Bijlage C.3 voor aanvullende foto's). Na proef V34 was er een behoorlijke vervorming te zien rond de 4-m-lijn (zie Figuur 4.9). De vervorming was zo groot, dat ze in schadecategorie c ingedeeld is en de steenzetting dus als bezweken gold. Voor aanvullende foto's zie Figuur C.31 t/m Figuur C.33 in Bijlage C.3.

Ook op de laserscan is de vervorming duidelijk te zien (Figuur 4.8, rechts). Daaruit blijkt dat het dal 4,0 cm diep is en de top 10 cm hoog. Dit geeft een amplitude van 7,0 cm en wordt dus in schadecategorie c ingedeeld.

Er zat na proef V33 en V34 behoorlijk wat filtermateriaal tussen de spleten (zie Figuur 4.5 voor een voorbeeld). Na proef V33 waren de spleten nog iets hoger van beneden gevuld, tot 2 á 3 cm ten opzichte van de onderzijde van de blokken. Plaatselijk was de vulling tot 5 cm aanwezig, zoals na proef V32. Na proef V34 was uit de metingen duidelijk te zien dat onder de opbolling bij de 4-m-lijn een open ruimte van ca. 3 cm is ontstaan (zie ook Bijlage B.6).

Proef V35 ($H_s = 1,45$ m)

Hoewel de steenzetting na de vorige proef al als bezweken gold, is er nog een proef met een hogere golfhoogte uitgevoerd. Proef V35 was de laatste proef van Serie 7 en is uitgevoerd

met een golfhoogte van $H_s = 1,45$ m (zie ook Figuur 4.10). De proef is al na ca. 12 minuten gestopt omdat er drie stenen uit de steenzetting zijn gelicht (schadecategorie d).

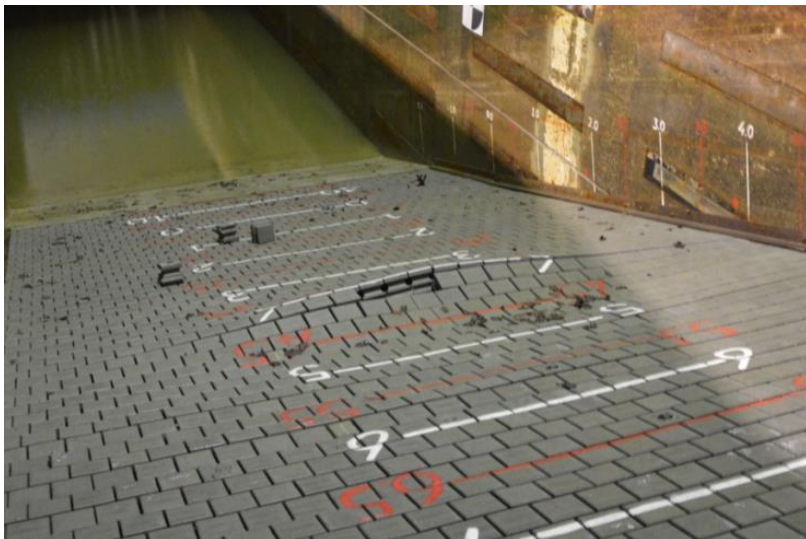


Figuur 4.9 Steenzetting na proef V34 (boven: balk parallel aan de gootwand, beneden: balk haaks op de gootwand)



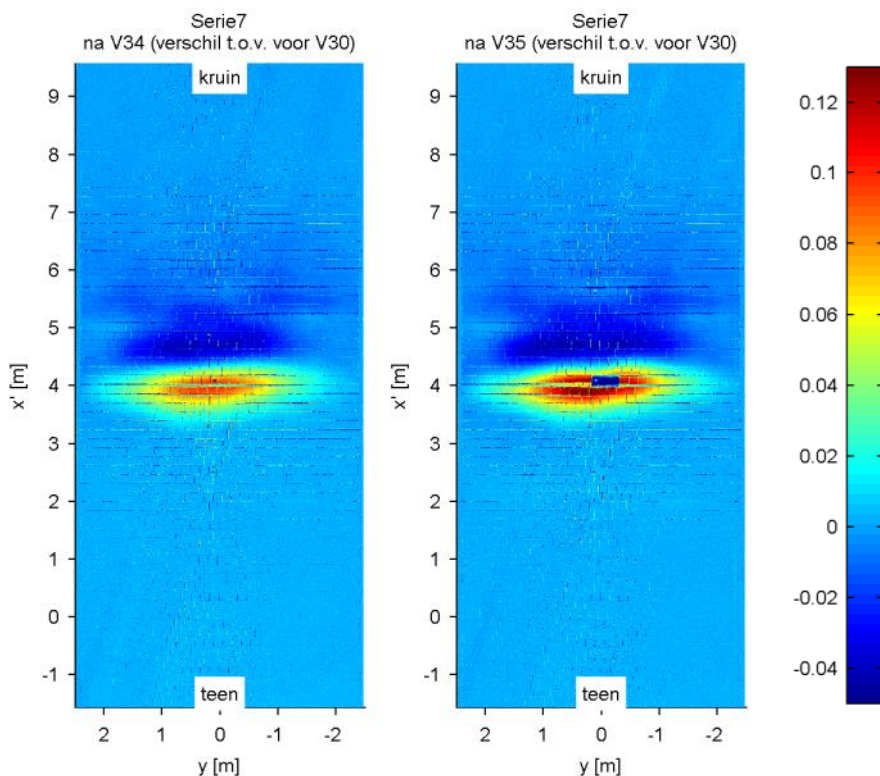
Figuur 4.10 Golven tijdens proef V35

De vervorming van de steenzetting rond de 4-m-lijn is tijdens de proef nog groter geworden zodat het verband uiteindelijk niet meer aanwezig was en er drie stenen uitgelicht zijn (zie Figuur 4.11 en Figuur C.34 in Bijlage C.3).



Figuur 4.11 Steenzetting na proef V35

Ook op de verschilplot van de laserscans van voor Serie 7 en na proef V35 is te zien dat de vervorming nog verder is toegenomen t.o.v. de vorige proef (zie Figuur 4.12).



Figuur 4.12 Verschilplots van de laserscans na V34 (links) en na V35 (rechts) t.o.v. voor Serie 7

Door de grote vervorming was er ruimte ontstaan tussen het filter en de toplaag (ca. 5 cm ter plaatse van het gat, zie Figuur 4.13). Ook in de metingen was dit te zien: onder de opbolling naast het gat zit er een holle ruimte van ca. 3 cm (zie ook Bijlage B.6). Vanaf de opbolling naar beneden zijn de spleten ongeveer 3 cm van beneden gevuld met filtermateriaal.



Figuur 4.13 Afstand tussen filterlaag en stenen in het gat na proef V35



Figuur 4.14 Tijdens de uitbouw van de steenzetting na proef V35

Tijdens de uitbouw van de steenzetting is opgevallen dat er rond de 5-m-lijn bijna geen filtermateriaal meer aanwezig was (zie Figuur 4.14). Dit filtermateriaal was kennelijk tijdens

de proeven gemigreerd naar de zone onder de opbolling. Op de laserscan is ook te zien dat de steenzetting op deze plek bijna 5 cm is gezakt.

Na deze proef is de steenzetting hersteld. Daarbij is de steenzetting en het filter uitgebouwd tot op ca. de 2-m-lijn. De stenen zijn hergebruikt als ze niet beschadigd waren.

4.4 Serie 8: langeduurproeven, grote golfsteilheid (proeven V36 – V40)

Proef V36 (ingolfproef, $H_s = 0,67$ m), proef V37 ($H_s = 1,10$ m) en proef V38 ($H_s = 1,12$ m)

Vóór de langeduurproef is een ingolfproef uitgevoerd met een lagere waterstand en een lagere golfhoogte dan de langeduurproef, namelijk met waterstand op +4,55 m t.o.v. de gootbodem en $H_s = 0,67$ m. De langeduurproef is daarna in stukken van 2, 4, 8 en 12 uur uitgevoerd. Er is gestreefd naar zo constant mogelijke golfcondities, met een gewenste golfhoogte van $H_s = 1,10$ m en een gewenste golfsteilheid van 4% (zie Figuur C.36 in Bijlage C.4 voor een impressie). In werkelijkheid wijkt het hier soms ongeveer 1 cm vanaf.

Na 6 uur golven (na proef V38) was er een lichte vervorming te zien (zie Figuur 4.15 en Figuur C.37 in Bijlage C.4, schadecategorie a).

In de verschilplot van de laserscans van voor Serie 8 en na proef V38 is de vervorming ook duidelijk te zien (zie Figuur 4.16, links). Het dal boven de 5-m-lijn was 2,3 cm diep en de top tussen de 4,5- en de 5-m-lijn was 2,4 cm hoog. Dit geeft een amplitude van 2,4 cm wat schadecategorie a betekent.



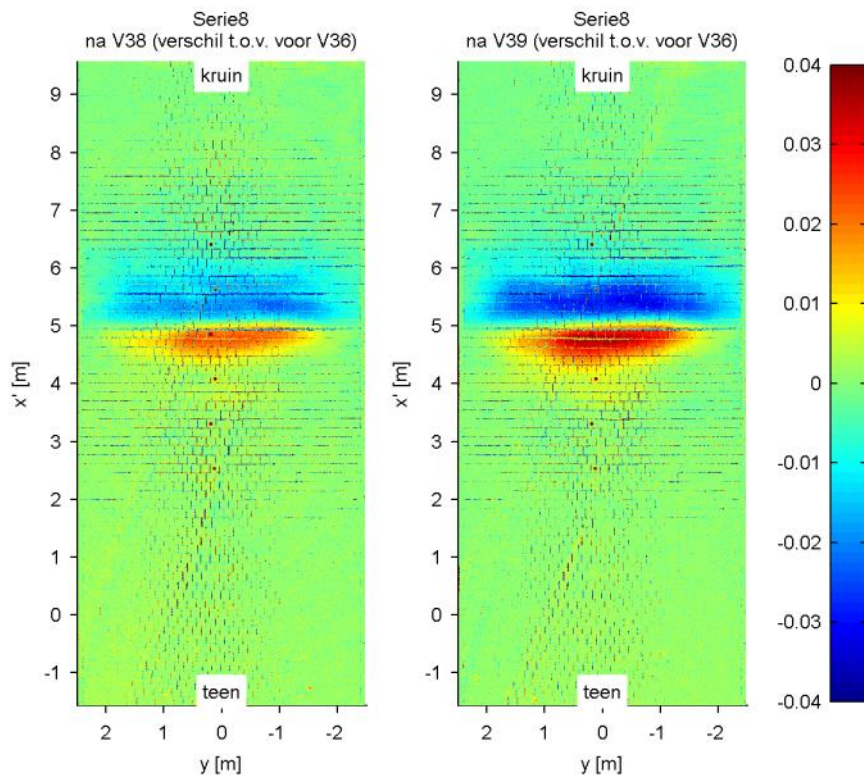
Figuur 4.15 Steenzetting na proef V38

Na proef V38 zijn de spleten bijna overal tot 2 á 3 cm met filtermateriaal van beneden gevuld in de open veer (zie Bijlage B.6). Onder de 2-m-lijn tonen de metingen dat de spleten veel hoger zijn gevuld, maar dit gedeelte van de steenzetting was niet hersteld en daarom zat daar het filtermateriaal nog ertussen van de vorige proevenserie. Boven de 7-m-lijn zijn de spleten minder gevuld.

Tijdens proef V38 bleek de steenzetting ter plaatse van de aansluiting op het talud in de golfoploopzone, bij +5,5 m boven de gootbodem, niet helemaal goed gebouwd te zijn. Daar zaten twee stenen los, die kleiner gezaagd waren om goed aan te sluiten op het houten schot. Dat schot was daar aangebracht om te voorkomen dat de steenzetting uit de oploopzone de normaalkracht in de steenzetting in de golfklapzone zou vergroten (zie Figuur

3.7 in Paragraaf 3.1.4). Deze twee stenen zijn tijdens de proeven uit het talud gekomen (zie Figuur 4.17, boven). Dit is overduidelijk een modeffect, en heeft niets te maken met de stabiliteit van de steenzetting.

De schade is gerepareerd en er is een stalen strip over de stenen gezet (zie Figuur 4.17, beneden) om dit modeffect in de verdere proeven te voorkomen.



Figuur 4.16 Verschilplot van de laserscans na V38 (links) en na V39 (rechts) t.o.v. voor Serie 8

Proef V39 ($H_s = 1,11$ m)

Proef V39 is uitgevoerd met een duur van 8 uur, zodat de cumulatieve belastingduur van de langeduurproef na deze proef 14 uur is. De vervorming is iets groter geworden en valt nu in schadecategorie b. Figuur 4.18 toont de steenzetting na deze proef (zie ook Figuur C.38 in Bijlage C.4).

De verschilplot van de laserscans laat zien dat het dal 3,0 cm diep en de top tussen de 4,5- en de 5-m-lijn 3,6 cm hoog is (zie Figuur 4.16, rechts). Dit geeft een amplitude van 3,3 cm, die in schadecategorie b wordt ingedeeld. Dit betekent nog geen bezwijken van de steenzetting.

Tijdens proef V39 zijn de spleten tussen 2 m en 4 m van beneden gevuld geraakt met filtermateriaal tot 4 cm hoogte ten opzichte van de onderzijde van de blokken, waaruit blijkt dat er dus behoorlijk wat bijgekomen is. Desondanks heeft dit niet geleid tot een bijdrage aan de vervormingen, want het volume aan filtermateriaal in de spleten was daarvoor te gering.



Figuur 4.17 Schade (boven) en reparatie (beneden) aan de onderste rij van het boventalud tijdens proef V38

Tussen de 4,5- en de 5-m-lijn is er een bult in het taludoppervlak ontstaan. Er is vastgesteld dat de steenzetting daar nog wel op het filtermateriaal ligt, en er geen holle ruimte is ontstaan tussen het filter en de steenzetting. Er zit op die plek ook geen filtermateriaal in de open spleten (zie Bijlage B.6).

Proef V40 ($H_s = 1,11$ m)

De laatste proef van de langeduurserie is uitgevoerd met een totale duur van 12 uur. Bij deze proef is de vervorming verder toegenomen (zie Figuur 4.19 en Figuur C.39 in Bijlage C.4). Na deze proef was de vervorming zo groot, dat het in schadecategorie c valt, wat bezwijken betekent.

Vanuit de verschilplot van de laserscans is te zien dat het dal nu een diepte van 4,5 cm heeft en de top 8,5 cm hoog ligt (zie Figuur 4.20). Dit is een amplitude van 6,5 cm (schadecategorie c).

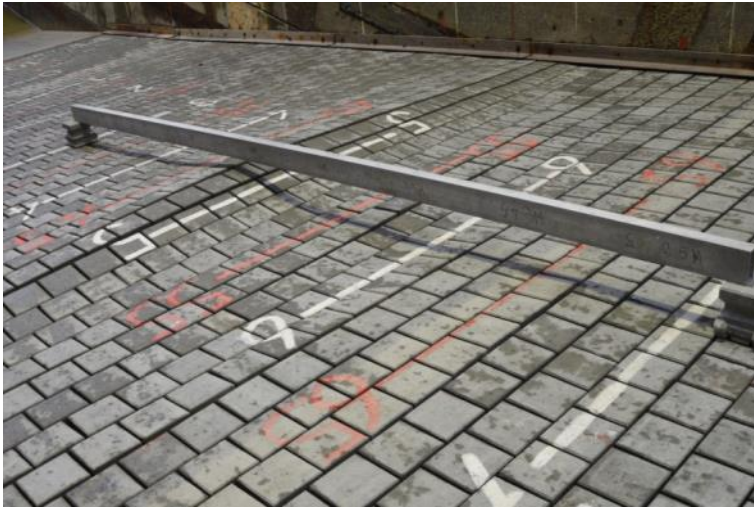


Figuur 4.18 Steenzetting na proef V39

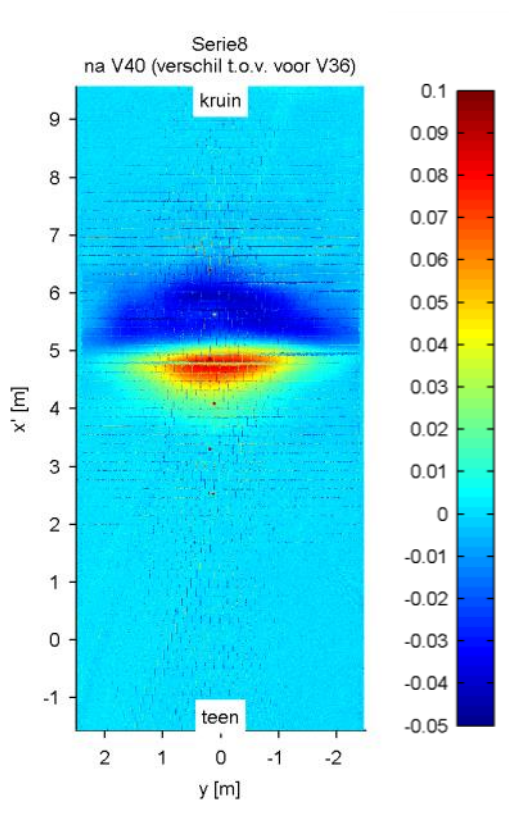
Door het niveau van het filteroppervlak te meten via de open spleten, is vastgesteld dat er onder de bult bij de 5-m-lijn een holle ruimte zit. De afstand tussen het filteroppervlak en de onderzijde van de steenzetting is ca. 1,5 cm.

Ter plaatse van de bult zijn de spleten niet gevuld met filtermateriaal. Daarboven zijn de spleten ca. 2 cm van beneden gevuld en daarbeneden zijn ze ca. 5 cm gevuld.

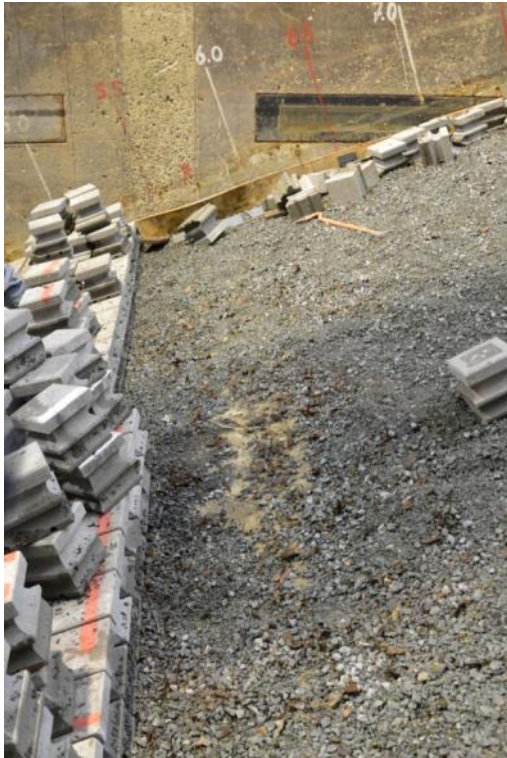
Tijdens het uitbouwen van de steenzetting is, net zoals na Serie 7, opgevallen dat er plaatselijk bijna geen filtermateriaal meer aanwezig was. Ter hoogte van het dal van de vervorming bij de 6-m-lijn (zie Figuur 4.21) was vrijwel al het filtermateriaal gemigreerd naar de zone lager op het talud.



Figuur 4.19 Steenzetting na proef V40



Figuur 4.20 Verschilplot van de laserscans na V40 t.o.v. voor Serie 8



Figuur 4.21 Tijdens de uitbouw van de steenzetting na proef V40

5 Analyse van de proefresultaten

5.1 Beweging van de blokken tijdens de proeven

De beweging van de blokken is tijdens de korteduurseries 6 en 7 gemeten met behulp van versnellingsopnemers (VS) op 6 locaties in het midden van de goot (zie Figuur 5.1 en Paragraaf 3.2.4). De verticale niveaus van het taludoppervlak ter plaatse van het hart van de versnellingsopnemers zijn opgemeten en gegeven in Bijlage A.2.

De gemeten versnelling moet twee keer geïntegreerd worden om de verplaatsing te verkrijgen. De snelheid is te berekenen door de versnelling één keer te integreren. Daarvoor zijn de volgende formules gebruikt:

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

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

met $v(t_0) = s(t_0) = 0$

met:

a = versnelling (m/s^2)

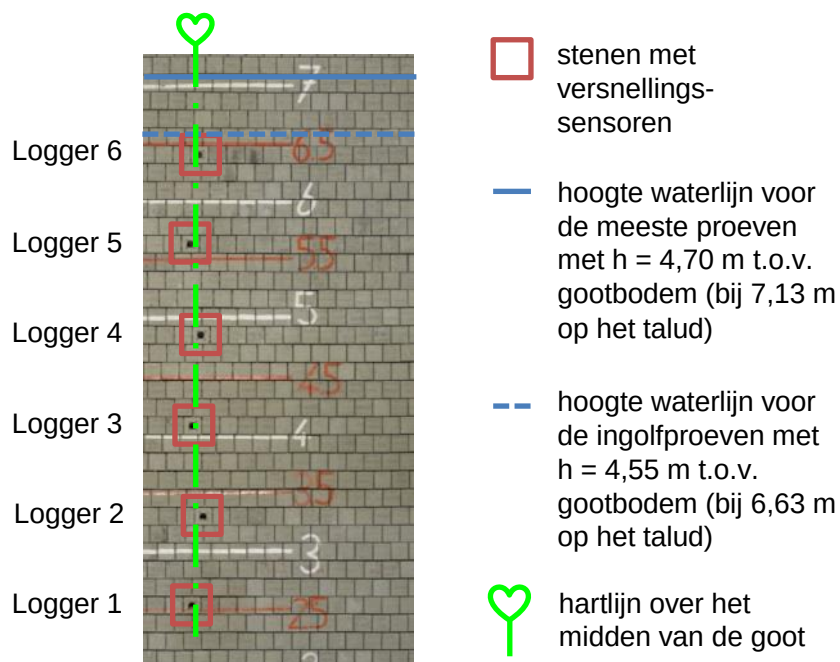
v = snelheid (m/s)

s = verplaatsing (m)

Δt = grootte van de tijdstappen van de metingen (s)

t_i = beschouwde tijdstap (s)

t_{i-1} = tijdstap voor de beschouwde tijdstap (s)

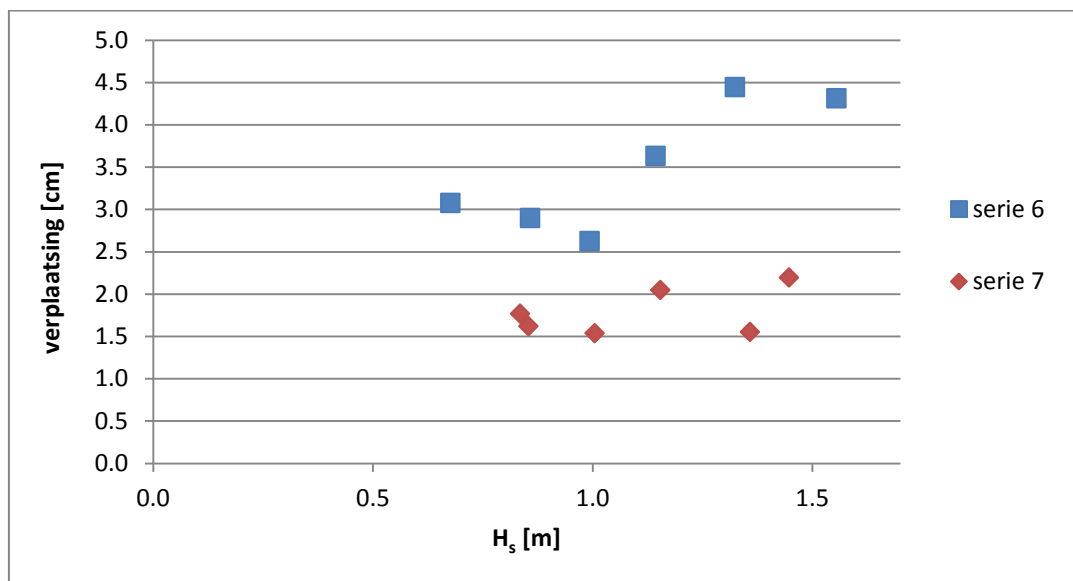


Figuur 5.1 Locaties en naamgeving van de versnellingsensoren

Aannemende dat de vervorming van de filterlaag en de zandcementstabilisatie minder is dan 1 mm, wordt de gemeten verplaatsing volledig toegeschreven aan de toplaag.

De gemeten signalen zijn eerst gefilterd, omdat het signaal een ruis bevatte. Uit het berekende bewegingssignaal zijn de maximale opwaartse verplaatsingen van de steen in elke golf bepaald. Daarvan is de 2%-overschrijdingswaarde t.o.v. het aantal golven beschouwd. De analyse is verder uitgevoerd met deze 2%-overschrijdingswaarden.

De grootste 2%-overschrijdingswaarde van de 6 sensoren per proef is in Figuur 5.2 gegeven als functie van de significante golfhoogte H_s van de proef.



Figuur 5.2 Verplaatsing in relatie met de golfhoogte

In de figuur valt allereerst op dat bewegingen behoorlijk groot zijn. Kennelijk gaat de steenzetting tijdens de grootste golven meerdere centimeter op en neer. Het is daarom niet vreemd dat het filter is gaan migreren en er op den duur een vervorming van het taludoppervlak is ontstaan.

In de figuur is de trend te zien dat de beweging steeds groter wordt naarmate de golfhoogte groter wordt. Bij Serie 7 is dit minder duidelijk, maar toch herkenbaar. Dit is ook logisch omdat de stijghoogteverschillen bij een grotere golfhoogte ook groter zijn.

Vergeleken met de metingen bij Verkalit[®] mgv (Kaste, 2016) zijn de geregistreerde bewegingen bij Verkalit[®] GOR wat groter bij de serie met lange golven (vergelijk serie 6 en serie 5). Bij $H_s \approx 1,5$ m zijn de bewegingen hier ca. 1,0 cm groter. Bij de serie met korte golven (vergelijk serie 7 en serie 2&3) zijn de bewegingen bij Verkalit[®] mgv ca. 0,5 cm groter dan bij GOR bij gelijke golfhoogte.

Gekeken naar het aantal bewegingen blijkt dat bijvoorbeeld bij proef V34 ($H_s = 1,36$ m) bij ca. 20% van de golven de beweging van de blokken groter is dan 0,5 cm. Dat is ongeveer even veel als bij Verkalit[®] mgv bij proef V09, maar daar gold een $H_s = 1,53$ m. Dus is blijkbaar het aantal bewegingen bij GOR iets groter (bij gelijke golfhoogte).

Er is kennelijk geen duidelijk verschil gemeten bij de steenzettingen met Verkalit[®] mgv en Verkalit[®] GOR waarmee het geconstateerde stabiliteitsverschil kan worden verklaard.

5.2 Stabiliteit van de steenzetting

De steenzetting is tijdens het onderzoek tweemaal bezweken, namelijk:

- Aan het einde van Serie 7 ($s_{op} = 0,04$)
- Aan het einde van Serie 8 ($s_{op} = 0,04$ met een langdurige belasting)

Na elke proef is de waterstand verlaagd en is 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 hier berekend is met de gemeten gemiddelde soortelijke massa van de blokken. Er is gebruik gemaakt van het gemiddelde, omdat de schade geïnitieerd is door de vervorming van een groep blokken en niet door individuele blokken. De gemiddelde soortelijke massa is daarom relevanter dan extreme waarden.

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	H_s	T_p	$T_{m-1,0}$	s_{op}	s_{om}	ξ_{op}	ξ_{om}	N	$\frac{H_s}{\Delta D}$	schade	amplitude vervorming
		[m]	[m]	[s]	[s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]		[cm]
6	V24	4,55	0,68	4,58	4,34	0,021	0,023	2,32	2,20	475	3,34	a	0,6
	V25	4,70	0,86	5,16	4,76	0,021	0,024	2,32	2,14	1012	4,23	a	0,8
	V26	4,70	0,99	5,63	5,28	0,020	0,023	2,35	2,21	999	4,90	a	0,9
	V27	4,70	1,14	6,09	5,74	0,020	0,022	2,37	2,24	983	5,64	a	1,4
	V28	4,70	1,32	6,64	6,13	0,019	0,023	2,40	2,22	1013	6,53	a	1,5
	V29	4,70	1,56	7,02	6,38	0,020	0,024	2,34	2,13	1036	7,67	a	1,6
7	V30	4,55	0,84	3,69	3,47	0,039	0,044	1,68	1,58	567	4,12	a	0,7
	V31	4,70	0,85	3,69	3,46	0,040	0,046	1,66	1,56	1033	4,21	a	0,8
	V32	4,70	1,01	3,98	3,77	0,041	0,045	1,65	1,57	1013	4,96	a	1,0
	V33	4,70	1,15	4,28	4,09	0,040	0,044	1,66	1,59	1024	5,69	a	1,1
	V34	4,70	1,36	4,65	4,48	0,040	0,043	1,66	1,60	980	6,70	c	7,0
	V35	4,70	1,45	4,95	4,84	0,038	0,040	1,71	1,68	176	7,14	d	>>
8	V36	4,55	0,67	3,31	3,12	0,039	0,044	1,68	1,59	627	3,30	a	0,4
	V37	4,70	1,10	4,16	4,00	0,041	0,044	1,65	1,59	2008	5,44	a	1,8
	V38	4,70	1,12	4,25	3,96	0,040	0,046	1,67	1,56	3900	5,52	a	2,4
	V39	4,70	1,11	4,23	4,00	0,040	0,044	1,67	1,58	8065	5,46	b	3,3
	V40	4,70	1,11	4,20	3,99	0,040	0,045	1,66	1,58	12013	5,47	c	6,5
	totaal	4,70	1,11	4,22	3,99	0,040	0,045	1,67	1,58	25986	5,47	c	6,5

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

Bij de proeven met Veralit® GOR is een vrij fijn filter toegepast. Bij steenzettingen met zuilen kan het filter doorgaans niet fijner gekozen worden, omdat dan het filter kan uitspoelen door de toplaag. De spleten in Veralit® GOR hebben in de Deltagoot een breedte van 8 mm,

terwijl er een filter is toegepast met korrelgrootte 2 – 16 mm. Met de zeefkromme van Figuur B.1 in paragraaf B.3 is te zien dat daardoor 30% van het filter een te grote korrelgrootte heeft om door de spleten te gaan. Hoewel geconstateerd is dat er wat fijne korrels in de spleten gingen zitten tijdens de proeven, was de door de toplaag getransporteerde hoeveelheid filtermateriaal gering. Er is namelijk geen verzakking of holtevorming geconstateerd. Daaruit kan geconcludeerd worden dat het kennelijk voldoende is als 30% van het filter niet door de spleten past (D_{f70} groter dan spleetbreedte s).

Het toepassen van een dergelijk fijn filter stelt daardoor eisen aan de kwaliteit van het zetwerk in de praktijk. De zetstenen moeten goed tegen elkaar geplaatst worden. Als er kleine tussenruimtes bestaan bij (sommige) zetstenen, kan dat leiden tot het (lokaal) uitspoelen van het filtermateriaal. Dergelijk tussenruimtes zouden ook kunnen ontstaan door toekomstige zettingen van de ondergrond.

Voor Serie 8 zijn van alle delen van de langeduurproef de gemiddelden waarden van de golfcondities berekend. Dit is het gewogen gemiddelde van de energie (energie maal aantal golven), zie Formules (5.3), (5.4) en (5.5). Verder wordt het totale aantal golven gehanteerd in de analyse, dus 25986 golven.

$$T_{m-1,0,N} = \frac{m_{-1}}{m_0} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i m_{-1i})}{\sum_{i=1}^n (N_i m_{0i})} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i H_{si}^2 T_{m-1,0,i})}{H_{sN}^2 \sum_{i=1}^n N_i} \quad (5.3)$$

$$H_{sN} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i H_{si}^2)}{\sum_{i=1}^n N_i}} \quad (5.4)$$

$$T_{pN} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i H_{si}^2 T_{pi})}{H_{sN}^2 \sum_{i=1}^n N_i} \quad (5.5)$$

met:

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

$T_{m-1,0,N}$ = spectrale golfperiode, gemiddeld over de beschouwde proeven (s)

m_0 = $\int f^0 \cdot E(f) df$ = nulde moment van de energiedichtheid (oppervlak onder het spectrum) (m^2)

m_{-1} = $\int f^{-1} \cdot E(f) df$ (m^2)

$E(f)$ = energiedichtheid als functie van f (grafiek van het spectrum) (m^2s)

f = golffrequentie = $1/T$ (Hz)

n = aantal proeven (-)

N_i = aantal golven in proef i (-)

H_{si} = significante golfhoogte in proef i (m)

H_{sN} = significante golfhoogte, gemiddeld over de beschouwde proeven (m)

T_{pi} = de golfperiode bij de piek van het spectrum in proef i (s)

T_{pN} = de golfperiode bij de piek van het spectrum, gemiddeld over de beschouwde proeven (s)

Voor elke serie is tevens berekend bij welke golfhoogte de steenzetting volgens Steentoets2014 (versie v14.1.2.1) 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 blokken (zie Paragraaf 3.1.3).

De flexibiliteit van de steenzetting is zo groot dat er met Steentoets gerekend moet worden zonder klemming. De klemming-module in Steentoets gaat er namelijk van uit dat klemming niet alleen een verhoogde wrijving tussen de zetstenen veroorzaakt, maar dat er ook een buigend moment opgenomen kan worden in de bekleding. Juist dat laatste is niet aan de orde bij Verkalit[®], vanwege de grote flexibiliteit. De flexibiliteit blijkt ook uit de analyse van de geometrie van het systeem, het opgetreden bezwijkmechanisme tijdens de proevenseries en het met Steentoets narekenen van de schade in serie 1 van Verkalit[®] mgv (Kaste, 2016).

Serie	Invoer		Resultaat			
	s_{om} [-]	N [-]	H_s [m]	$T_{m-1,0}$ [s]	ξ_{om} [-]	$H_s/(\Delta D)$ [-]
6	0,024	1000	1,15	5,54	2,15	5,70
7	0,043	1000	1,18	4,19	1,61	5,81
8	0,045	25986	1,01	3,79	1,57	4,97

Tabel 5.2 Resultaten van de berekeningen met Steentoets2014, versie 14.1.2.1.

De resultaten van de proeven en de Steentoetsberekeningen zijn grafisch weergegeven in Figuur 5.3. Op de horizontale as staat de brekerparameter ξ_{om} (zie Paragraaf 3.3 voor de definitie). Deze brekerparameter is gebaseerd op de spectrale periodemaat $T_{m-1,0}$. Op de verticale as staat de belastingparameter $H_s/(\Delta D)$ op basis van de gemiddelde soortelijke massa.

Van elke serie zijn de proeven weergegeven met de hoogste golfhoogte waarbij schadecategorie a of b (geen bezwijken) is opgetreden en de proeven met de laagste golfhoogte waarbij schadecategorie c of d (wel bezwijken) is opgetreden. De meetpunten met de open symbolen hebben betrekking op schadecategorie a of b, en de dichte symbolen op schadecategorie c of d.

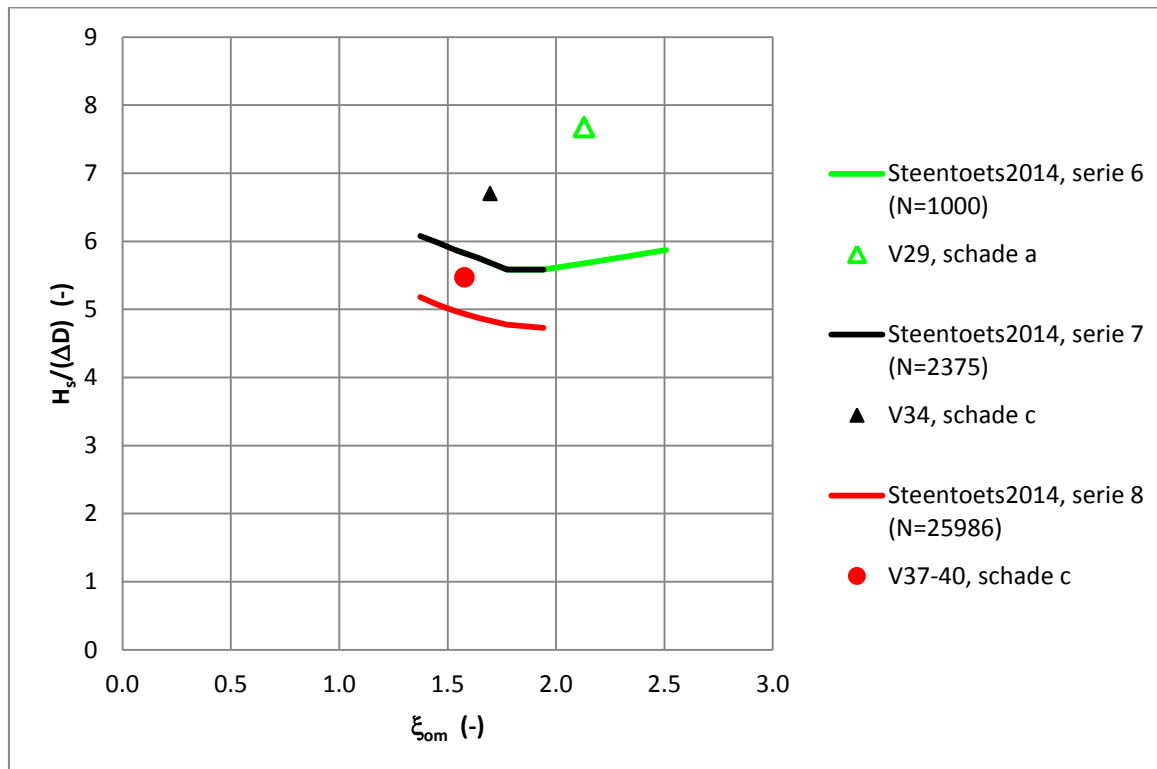
De lijnen geven de resultaten van de Steentoetsberekeningen. De meetpunten en lijnen met dezelfde kleur horen bij elkaar. Voor de berekeningen is uitgegaan van de maten en eigenschappen zoals gemeten in de Deltagoot.

In de figuur is te zien dat alle punten met waarbij bezwijken optrad boven de lijnen liggen die met Steentoets2014 zijn berekend. De steenzetting voldeed tijdens alle series dus beter dan op basis van Steentoets2014 berekend is.

Het valt op dat bij Serie 6 het meetpunt met de grootste golven veel hoger ligt dan de met Steentoets2014 berekende lijn, en dat terwijl er bij die proef slechts schadecategorie a was opgetreden. Dit betekent dat de steenzetting in dit geval nog niet bezwijken is en het werkelijke bezwijkpunt zelfs dus nog hoger ligt.

Bij de andere twee series liggen de bezwijkpunten veel dichterbij de berekende lijn en was de stabiliteit dus beduidend minder dan in Serie 6. In vergelijking tot Verkalit[®] mgv is de $H_s/(\Delta D)$ bij het bezwijken van de steenzetting duidelijk lager. Mogelijk is dat een gevolg van het feit dat de blokken lichter zijn als gevolg van de kanalen. Kennelijk hebben de kanalen bij

dit systeem een kleiner positief effect (mogelijke verkleining van het stijghoogteverschil over de toplaag) dan het negatieve effect als gevolg van het kleinere gewicht van de zetstenen.

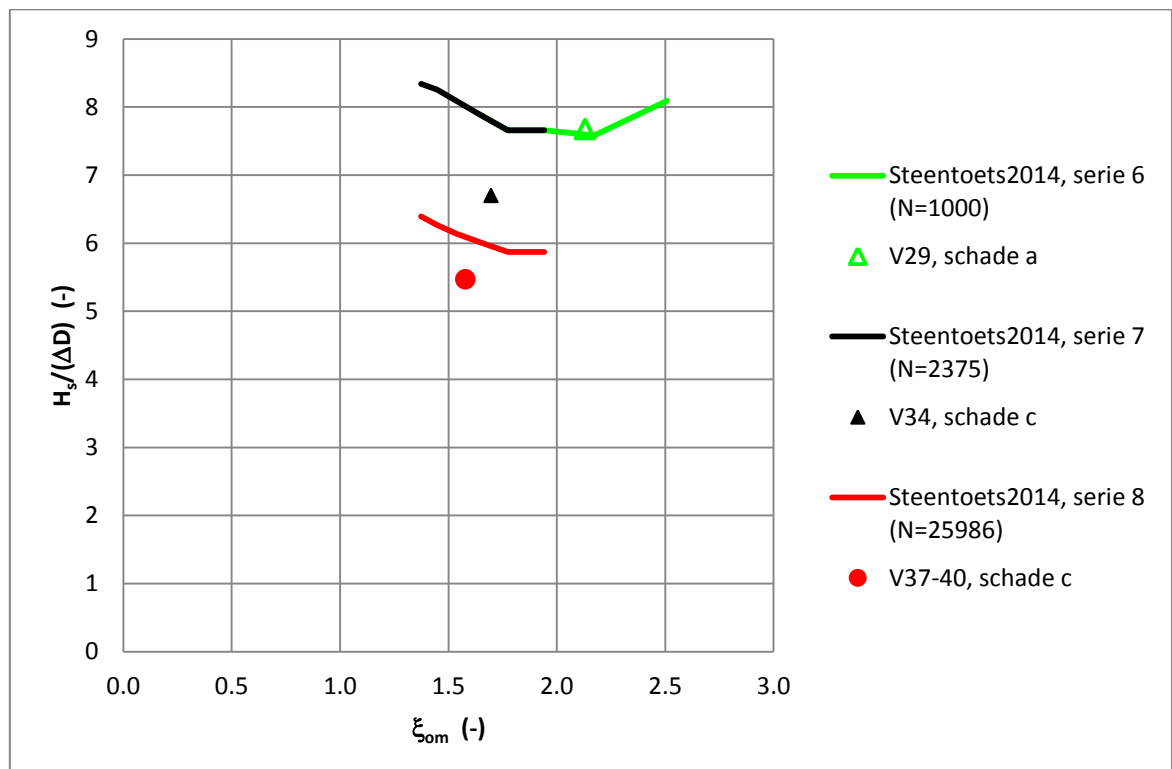


Figuur 5.3 Resultaten van de belangrijkste proeven en de overeenkomstige berekeningen met Steentoets2014

Bij een nadere analyse van de resultaten is echter duidelijk geworden dat Steentoets2014 niet goed in staat is om de stabiliteit van Verkalit® GOR op een fijn filter te berekenen. Deze tekortkoming in Steentoets is opgelost door een empirische relatie op te nemen in het programma dat zorgt voor een beter rekenresultaat voor steenzettingen met een fijn filter met korrelgrootte $D_{f15} < 5$ à 9 mm. Dit is nader toegelicht in bijlage D. Deze tekortkoming in Steentoets2014 was nog niet eerder een probleem, omdat open steenzettingen in Nederland altijd toegepast worden met een veel grover filter ($D_{f15} \gg 10$ mm).

In Figuur 5.4 zijn de resultaten van de belangrijkste proeven nogmaals getoond, maar nu in vergelijking tot een aangepaste versie van Steentoets, die tijdelijk de naam Steentoets-V heeft. De verschillen tussen Steentoets2014 en Steentoets-V zijn nader toegelicht in bijlage D. Inmiddels zijn Steentoets2014 en Steentoets-V samengevoegd in Steentoets2015.

In de figuur is te zien dat de berekende lijnen nu veel hoger liggen, waardoor de meeste schadepunten onder de berekende lijn liggen. Dat is een gevolg van het feit dat Steentoets-V is afgestemd op Verkalit® mgv, die een hogere stabiliteit had dan Verkalit® GOR.



Figuur 5.4 Resultaten van de belangrijkste proeven en de overeenkomstige berekeningen met Steentoets-V (met $f_b = 0,68$)

5.3 Stabiliteitsfactor

Op basis van de drie uitgevoerde proevenseries is voor Verkalit® GOR een stabiliteitsfactor berekend, waarmee het resultaat van Steentoetsberekeningen zodanig zal worden gecorrigeerd dat het overeenkomt met de proefresultaten uit de Deltagoot, rekening houdend met een veiligheidsfactor. Deze stabiliteitsfactor is voor elk type steenzetting anders en wordt voor de gebruiker onzichtbaar opgenomen in de code van Steentoets. De benodigde toplaagdikte volgens Steentoets zal in het programma gedeeld worden door deze stabiliteitsfactor om zo rekening te houden met de specifieke stabiliteit van het betreffende type steenzetting. Voor Verkalit® zal daarbij gebruik gemaakt worden van de aangepaste Steentoets, namelijk Steentoets-V. Inmiddels zijn Steentoets2014 en Steentoets-V samengevoegd in Steentoets2015.

De met Rijkswaterstaat afgesproken procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor op basis van de Deltagootproeven is gedetailleerd beschreven in bijlage F. In de onderhavige paragraaf is dit uitgewerkt voor Verkalit® GOR.

De eerste stap bij het bepalen van de stabiliteitsfactor is het per serie vaststellen van de belasting waarbij de steenzetting is bezweken. Voor serie 6 en 7 (korteduurproeven met ongeveer hetzelfde aantal golven) is daarvoor de significante golfhoogte waarbij de steenzetting bezwijkt van belang: de bezwijkgolffhoogte $H_{s,bezwijk}$. Voor serie 8 (langeduurproef met dezelfde significante golfhoogte) is het aantal golven tot bezwijken van belang.

- **Serie 6:**

Tijdens serie 6 was geen schade ontstaan ondanks het feit dat de golfhoogte was verhoogd tot de maximale capaciteit van de Deltagoot: $H_s = 1,56$ m. 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 ongeveer 15% te werken. Conform de procedure wordt aangenomen dat bij die fictieve proef wél bezwijken van de steenzetting zou zijn opgetreden, dus bij $H_s = 1,79$ m. Dat resulteert in een bezwijkgolfhoogte $H_{s,bezwijk} = (1,56 + 1,79)/2 = 1,68$ m.

- **Serie 7:**
Conform de procedure uit bijlage F is $H_{s,bezwijk}$ 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 waarbij nog geen bezwijken is opgetreden (schadecategorie a of b).
Tijdens serie 7 was nog geen bezwijken opgetreden tijdens proef V33 ($H_s = 1,15$ m), maar wel tijdens V34 ($H_s = 1,36$ m). Dat resulteert in een bezwijkgolfhoogte $H_{s,bezwijk} = (1,15 + 1,36)/2 = 1,26$ m.
- **Serie 8:**
Voor de langeduurproef geldt naast de significante golfhoogte en golfperiode van de proef het aantal golven tot bezwijken als het resultaat van de proef. De gemiddelde golfhoogte was $H_{s,bezwijk} = 1,11$ m en dat leidde na $N = 25986$ golven tot bezwijken. Hier wordt de totale duur van de proeven V36 t/m V40 opgeteld.

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

$D_{\text{Steentoets}}$ = de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets-V bij de bezwijkgolfhoogte van de betreffende serie (m)
 $D_{\text{in modelproeven}}$ = de toplaagdikte die toegepast is in de Deltagoot (m), dus in dit geval geldt dat $D_{\text{in modelproeven}} = 0,151$ m

In de berekeningen met Steentoets-V zijn de tijdens het Deltagootonderzoek geconstateerde bezwijkgolfhoogtes als uitgangspunt genomen. Voor elke proevenserie is met Steentoets-V (met stabiliteitsfactor = 1) de toplaagdikte berekend die volgens Steentoets-V bij de geconstateerde bezwijkgolfhoogte nog net voldoende is.

De Steentoetsberekeningen zijn uitgevoerd met de waarden zoals gemeten in het model, dus op schaal. Er is gerekend met de gemeten gemiddelde soortelijke massa van het beton, de gemeten korrelgrootte D_{f15} van het filter (D_{f15} = korrelgrootte waarvoor geldt dat 15 gewichtsprocenten bestaat uit kleinere korrels), de gemeten dikte van de filterlaag bij aanleg, de gemeten golfcondities, de gemeten taludhelling, et cetera. Voor de dikte van de steenzetting is de hoogte van de zetstenen aangehouden.

Conform de procedure wordt de stabiliteitsfactor vervolgens voor elke serie afzonderlijk bepaald met formule (5.6).

$$f_{\text{stabiliteit}} = \frac{D_{\text{Steentoets}}}{\gamma \cdot D_{\text{in modelproeven}}} \quad (5.6)$$

Met:

$f_{\text{stabiliteit}}$ = stabiliteitsfactor van een bepaald type steenzetting (-)
 $D_{\text{in modelproeven}}$ = benodigde toplaagdikte volgens grootschalig experimenteel onderzoek (m)
 $D_{\text{Steentoets}}$ = benodigde toplaagdikte volgens Steentoets met $f_{\text{stabiliteit}} = 1$ (m)
 γ = veiligheidsfactor (-)

De waarde van de veiligheidsfactor γ is bepaald op basis van de standaardafwijking in de proefresultaten van alle 3 series (berekend met $D_{\text{Steentoets}}/D_{\text{in modelproeven}}$). Hiervoor is de

volgende formule gebruikt, die gebaseerd is op een Student-verdeling en een onderschrijdingskans van 10%:

- Drie proevenseries: $\gamma = 1,1 + 1,89 \cdot \sigma$ (5.7)

Met:

σ = standaardafwijking in de proefresultaten (-)

Het gemiddelde van de stabiliteitsfactoren van de afzonderlijke proevenseries is de stabiliteitsfactor die wordt aangehouden als eindresultaat. De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in Tabel 5.3.

Proevenserie	N _{landeduur} [-]	H _{s,bezwijk} [m]	H _s /(ΔD) [-]	D _{in modelproeven} [m]	D _{Steentoets} [m]	D _{Steentoets} / D _{in modelproeven} [-]
Serie 6, s _{om} = 0,024	n.v.t.	1,68*	8,29	0,151	0,161	1,066
Serie 7, s _{om} = 0,044	n.v.t.	1,26	6,22	0,151	0,125	0,828
Serie 8, s _{om} = 0,045	25986	1,11	5,47	0,151	0,138	0,914

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

De gemiddeldewaarde en standaardafwijking van D_{Steentoets}/D_{in modelproeven} zijn respectievelijk 0,937 en 0,122, waardoor de veiligheidsfactor wordt: $\gamma = 1,33$.

Conform de door Rijkswaterstaat vastgestelde procedure (zie bijlage F) resulteren de Deltagootproeven hiermee in de volgende stabiliteitsfactor voor Veralit[®] GOR met vorm zoals weergegeven in bijlage B.1: f_{stab} = 0,70. Deze stabiliteitsfactor geldt in combinatie met Steentoets-V, waarbij gerekend wordt zonder klemming, en als Veralit[®] GOR wordt toegepast op een laagje steenslag met daaronder een geotextiel. De wrijving tussen de steenslag en het geotextiel moet tenminste voldoen aan f_w > 0,7 (wrijvingscoëfficiënt van natte breuksteen op nat geotextiel). Dit is eenvoudig te realiseren met een non-woven geotextiel.

Er kan een relatief fijn filter worden toegepast onder Veralit[®] GOR. Voorwaarde is echter dat de D_{f70} groter is dan de spleetbreedte (D_{f70} = korrelgrootte waarvoor geldt dat 70 gewichtsprocenten bestaat uit kleinere korrels).

De resulterende stabiliteitsfactor is beduidend kleiner dan die voor Veralit[®] mgv. Het verschil is zelfs groter dan de gewichtsverhouding. Op basis van de gewichtsverhouding zou er een 13% lagere stabiliteitsfactor, terwijl dit nu 19% is. Dat wordt voornamelijk veroorzaakt door de vrij grote spreiding in de meetresultaten, waardoor de veiligheidsfactor bij Veralit[®] GOR 11% groter is dan bij Veralit[®] mgv.

Inmiddels zijn Steentoets2014 en Steentoets-V samengevoegd in Steentoets2015.

Hoewel de proeven zijn uitgevoerd met Veralit[®] GOR 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 blokhoogtes, 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 blokhoogte. 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 Verkalit[®] type “GOR” 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 de te toetsen bekleding met de onderstaande eigenschappen (maten op modelschaal). Boven $Z = 5,5$ m was er ook een steenzetting van Verkalit[®] GOR ingebouwd, waar in andere proeven de golfoploop getest werd. Tussen die twee proefvakken is een overgangsconstructie toegepast, zodat het beschouwde onderste gedeelte niet beïnvloed wordt door het bovenliggende (zie Paragraaf 3.1.4).

- Hoogte van de dijk t.o.v. de gootbodem: 8,3 m
- Taludhelling: 1:3
- Verkalit[®] GOR:
 - Gemiddelde steenhoogte: $D = 15,1$ cm (standaardafwijking 0,04 cm)
 - Gemiddelde breedte: $B = 14,7$ cm (standaardafwijking 0,03 cm)
 - Gemiddelde lengte: $L = 15,0$ cm (standaardafwijking 0,11 cm)
 - Soortelijke massa: gemiddeld $\rho_s = 2342$ kg/m³
 - Relatief open oppervlak: 6,5% (conform NEN7024)
- Filterlaag:
 - Gemiddelde dikte:

Serie 6:	$b = 5,0$ cm
Serie 7:	$b = 5,1$ cm
Serie 8:	$b = 5,0$ cm
 - Gradering:

Serie 6	$D_{f15} = 2,8$ mm, $D_{f50} = 5,1$ mm en $D_{f90} = 12,1$ mm
Serie 7:	$D_{f15} = 2,7$ mm, $D_{f50} = 4,9$ mm en $D_{f90} = 11,8$ mm
Serie 8:	$D_{f15} = 2,7$ mm, $D_{f50} = 4,9$ mm en $D_{f90} = 11,8$ mm
- Geotextiel:
 - dikte $d = 5,3$ mm
 - openingsgrootte $O_{90} = 0,10$ mm
 - doorlatendheid $q = 37,5$ l/m²/s
 - wrijvingscoëfficiënt $f_w = 0,89$
 - non-woven geotextiel

Bij de proeven met Verkalit[®] GOR is een vrij fijn filter toegepast. Bij steenzettingen met zuilen kan het filter doorgaans niet fijner gekozen worden, omdat dan het filter kan uitspoelen door de toplaag. Tijdens de proeven is gebleken dat het toepassen van een filter waarin de D_{f70} groter is dan de spleetbreedte voldoende is om bij Verkalit[®] GOR uitspoeling te voorkomen (D_{f70} = korrelgrootte waarvoor geldt dat 70 gewichtsprocenten bestaat uit kleinere korrels).

De steenzetting is getest door middel van drie proevenseries, waarbij de nummering aansluit op de voorgaande proeven met Verkalit[®] mgv (Kaste, 2016). Er zijn twee proevenseries uitgevoerd met korteduurproeven met een oplopende golfhoogte, maar een gelijkblijvende golfsteilheid (Serie 6 met $s_{op} = 0,02$ en Serie 7 met $s_{op} = 0,04$). Daarna is tijdens de derde proevenserie (Serie 8) een langeduurproef uitgevoerd met een gelijkblijvende golfhoogte en golfsteilheid ($s_{op} = 0,04$).

De resultaten zijn samengevat in Tabel 5.1 en Figuur 5.3 (in Paragraaf 5.2). In de figuur is te zien dat alle meetpunten waarbij bezwijken optrad boven de lijnen liggen die met Steentoets2014 zijn berekend. Tijdens Serie 6 was dit verschil behoorlijk groot, bij de andere series was het verschil duidelijk kleiner.

De flexibiliteit van de steenzetting is zo groot dat er met Steentoets gerekend is zonder klemming. De klemming-module in Steentoets gaat er namelijk van uit dat klemming niet alleen een verhoogde wrijving tussen de zetstenen veroorzaakt, maar dat er ook een buigend moment opgenomen kan worden in de bekleding. Juist dat laatste is niet aan de orde bij Verkalit®, vanwege de grote flexibiliteit.

Steentoets2014 is niet goed toepasbaar op open steenzettingen op een fijn filter, zoals Verkalit®. Daarom is speciaal voor Verkalit® Steentoets aangepast. Deze tekortkoming in Steentoets is opgelost door een empirische relatie op te nemen in het programma dat zorgt voor een beter rekenresultaat voor steenzettingen met een fijn filter met korrelgrootte $D_{f15} < 5$ à 9 mm. Deze empirische relatie is gebaseerd op de proefresultaten met Verkalit® en Deltagootonderzoek met Basalton op zandasfalt (zie bijlage D). Deze aangepaste versie wordt Steentoets-V genoemd en is gebruikt voor het bepalen van de stabiliteitsfactor. Inmiddels zijn Steentoets2014 en Steentoets-V samengevoegd in Steentoets2015.

Conform de door Rijkswaterstaat vastgestelde procedure (zie bijlage F) resulteren de Deltagootproeven hiermee in de volgende stabiliteitsfactor voor Verkalit® GOR met vorm zoals weergegeven in bijlage B.1: $f_{stab} = 0,70$. Deze stabiliteitsfactor geldt in combinatie met Steentoets-V (die inmiddels is opgenomen in de nieuwe Steentoets versie), waarbij gerekend wordt zonder klemming, en als Verkalit® GOR wordt toegepast op een laagje steenslag met daaronder een geotextiel. De wrijving tussen de steenslag en het geotextiel moet tenminste voldoen aan $f_w > 0,7$ (wrijvingscoëfficiënt van natte breuksteen op nat geotextiel). Dit is eenvoudig te realiseren met een non-woven geotextiel.

Hoewel de proeven zijn uitgevoerd met Verkalit® GOR 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 blokhoogtes, 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 blokhoogte. Het toepassingsgebied strekt zich daardoor, afhankelijk van de omstandigheden, uit tot een significante golfhoogte van maximaal ca. 4,5 m.

7 Referenties

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

ETA (2012):
European Technical Approval ETA-12/0245;
For Trade name: Verkalit elements made of concrete used in revetments.
Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, juni 2012.

Gier, F. en Schüttrumpf, H., 2011:
Wissenschaftliche Untersuchung der Stabilität von Verkalit®-Deckwerksteinen.
ndbericht Projektphase III: Auswertung der großmaßstäblichen Modellversuche.
RWTH Aachen, oktober 2011.

IWW (2015):
Proven-Strenght-Untersuchung – vorläufiger Ergebnisbericht Projektphase II –
Entwurf.
RWTH Aachen, concept rapport, augustus 2015.

Kaste, D.L., 2016:
Stabiliteit van VerkalitVerkalit® mgv steenzetting bij golfaanval- Vergelijkend
onderzoek zetstenen voor dijken.
Deltares, concept rapport 1208618-010, Maart 2016.

Klein Breteler, M., 2000
Grootschalig modelonderzoek naar de stabiliteit van taludbekledingen
Analyse van resultaten van Deltagootproeven
WL Delft Hydraulics, rapport H3272, mei 2000

Klein Breteler, M., 2014:
Documentatie STEENTOETS 2014.
Deltares, rapport 1208045-009, juli 2014.

Mansard, E., en E. Funke, 1980:
The measurement of incident and reflected spectra using a least-square method.
Proc. ICCE'80, ASCE pp154-172 Sydney.

Van Steeg, P., 2015:
Golfploopreductie taludbescherming Verkalit GOR - Vergelijkend onderzoek
zetstenen voor dijken.
Deltares, concept rapport, maart 2015.

TAW, 2002:
Technisch Rapport Golfploop en Golfoverslag op Dijken.
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Delft, mei 2002.

A Tabellen

Overzicht

A.1	Verticale posities van de lijnmarkeringen op het talud	A-2
A.2	Verticale posities van de versnellingsopnemers	A-3

A.1 Verticale posities van de lijnmarkeringen op het talud

Lijn	Hoogte t.o.v. gootbodem [m]		
	voor Serie 6	voor Serie 7	voor Serie 8
Kruin	8,30	8,30	8,30
18,0	8,17	8,17	8,17
17,5	8,01	8,01	8,01
17,0	7,86	7,86	7,86
16,5	7,69	7,69	7,69
16,0	7,54	7,54	7,54
15,5	7,37	7,37	7,37
15,0	7,22	7,22	7,22
14,5	7,07	7,07	7,07
14,0	6,91	6,91	6,91
13,5	6,74	6,74	6,74
13,0	6,58	6,58	6,58
12,5	6,43	6,43	6,43
12,0	6,27	6,27	6,27
11,5	6,10	6,10	6,10
11,0	5,94	5,94	5,94
10,5	5,79	5,79	5,79
10,0	5,63	5,63	5,63
9,5	5,48	5,48	5,48
9,0	5,32	5,32	5,32
8,5	5,17	5,16	5,16
8,0	5,00	4,98	4,98
7,5	4,82	4,82	4,82
7,0	4,66	4,66	4,66
6,5	4,51	4,50	4,50
6,0	4,35	4,34	4,34
5,5	4,19	4,18	4,18
5,0	4,03	4,03	4,03
4,5	3,87	3,87	3,87
4,0	3,71	3,71	3,71
3,5	3,55	3,55	3,55
3,0	3,39	3,39	3,39
2,5	3,24	3,23	3,23
2,0	3,09	3,08	3,08
1,5	2,93	2,92	2,92
1,0	2,77	2,76	2,76
0,5	2,61	2,60	2,60
0,0	2,45	2,45	2,45
-0,5	2,30	2,30	2,30
-1,0	2,16	2,16	2,16
-1,5	2,01	2,01	2,01
Rand	1,98	1,98	1,98

A.2 Verticale posities van de versnellingsopnemers

Logger	Hoogte t.o.v. gootbodem [m]		
	voor Serie 6	voor Serie 7	voor Serie 8
1	4,47	4,47	4,47
2	4,23	4,23	4,23
3	3,98	3,98	3,98
4	3,74	3,74	3,74
5	3,48	3,48	3,48
6	3,24	3,24	3,24

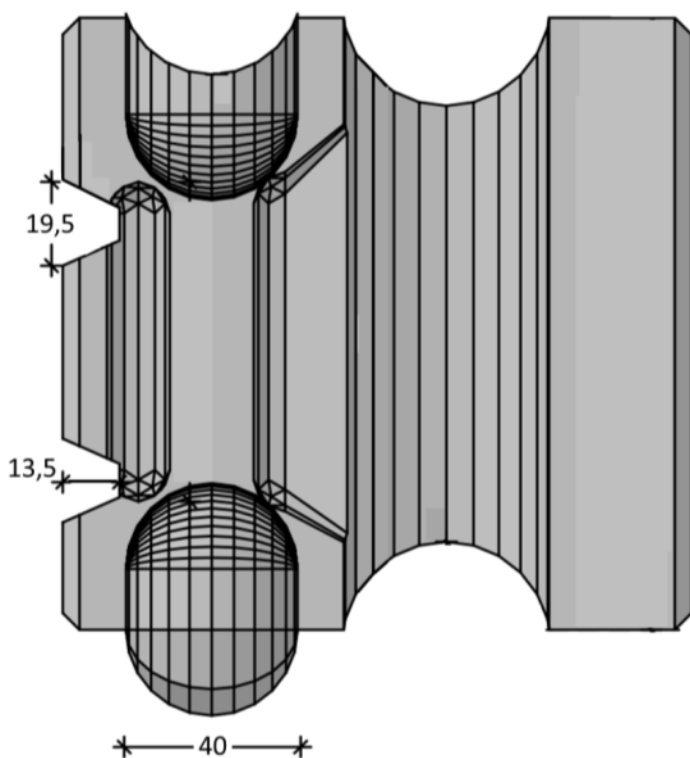
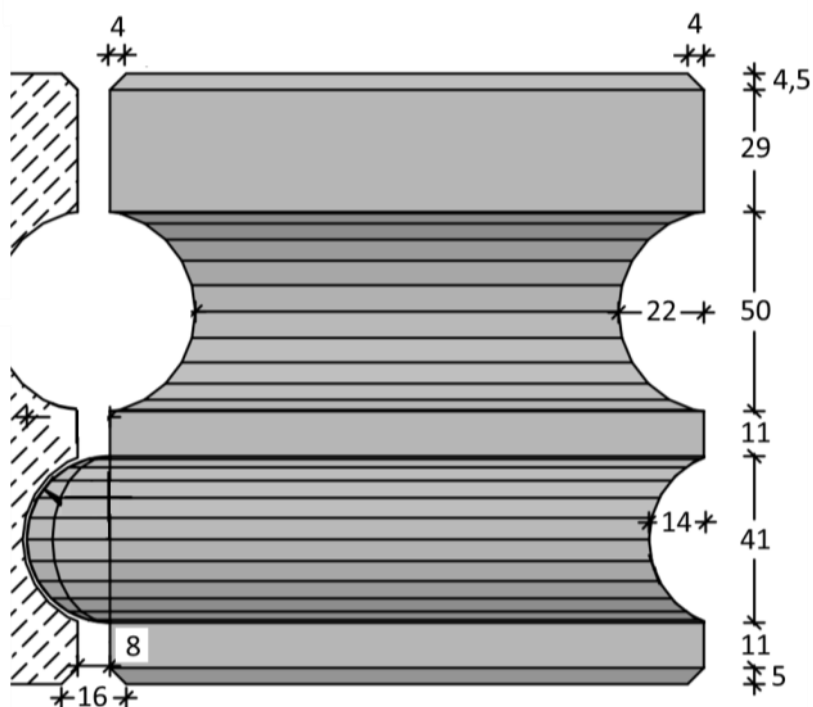
B Figuren

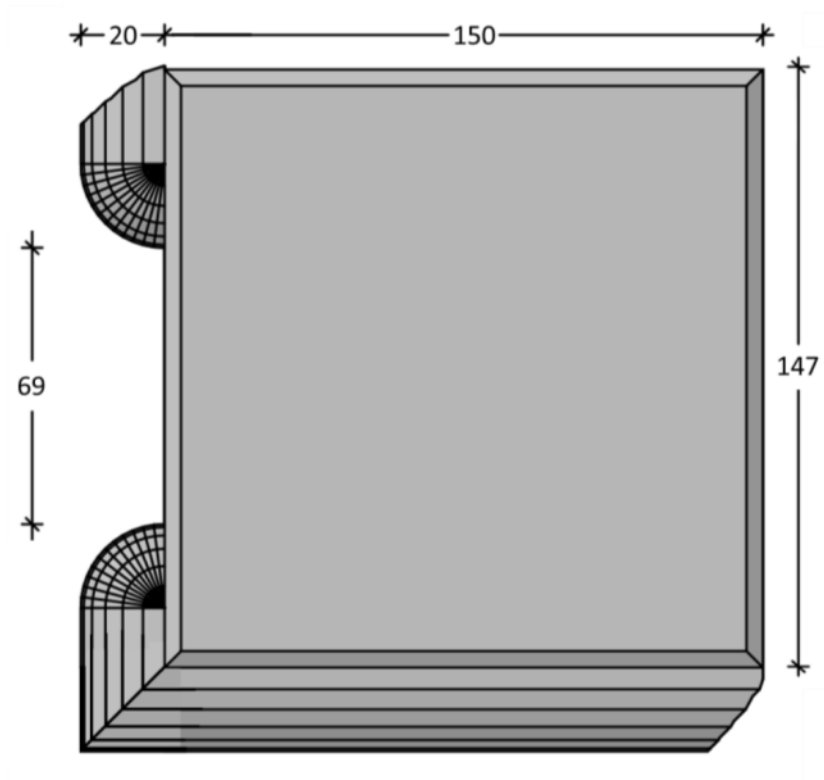
Overzicht

B.1	Tekening van Verkalit GOR	B-2
B.2	Locaties van de monsternamen en laagdiktemetingen van het filter	B-4
B.3	Zeefkromme filtermateriaal voor alle proevenseries	B-5
B.4	Golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra	B-6
B.5	Verschilplots van de 3D laserscans voor alle proeven	B-10
B.6	Opgemeten hoogte van het filtermateriaal in de spleten	B-16

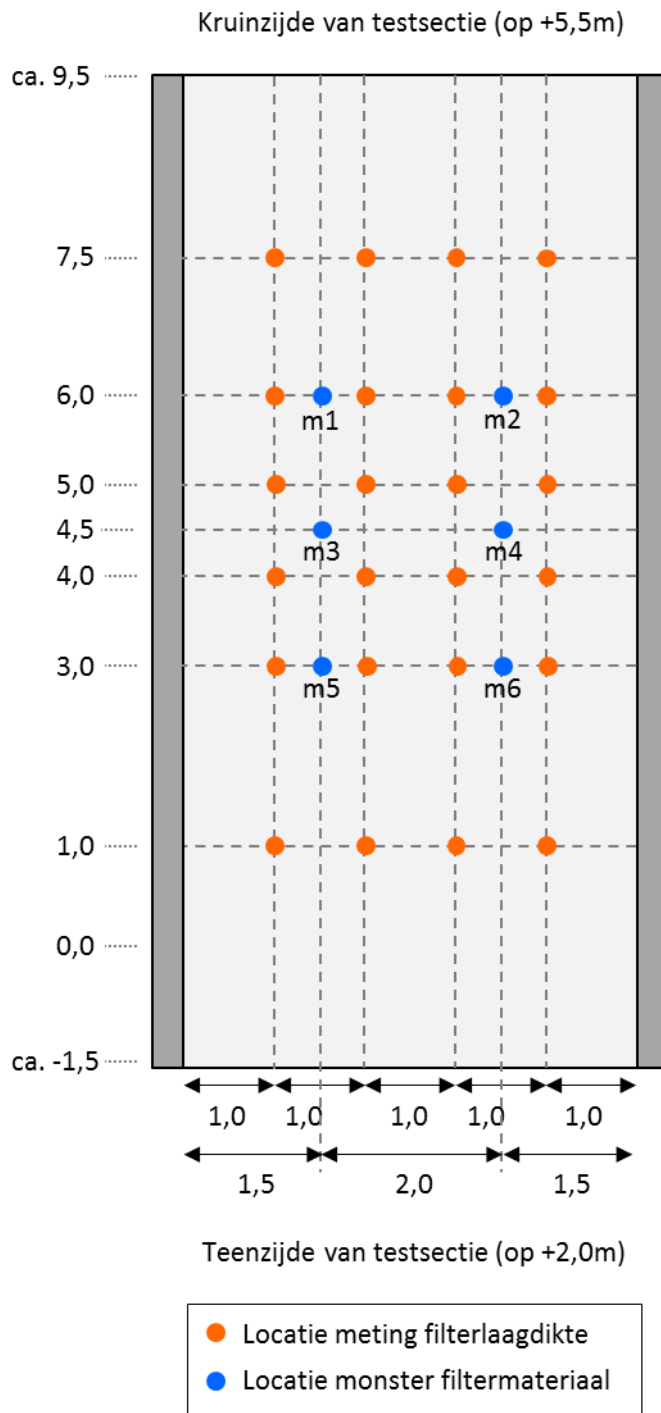
B.1 Tekening van Verkalit® GOR

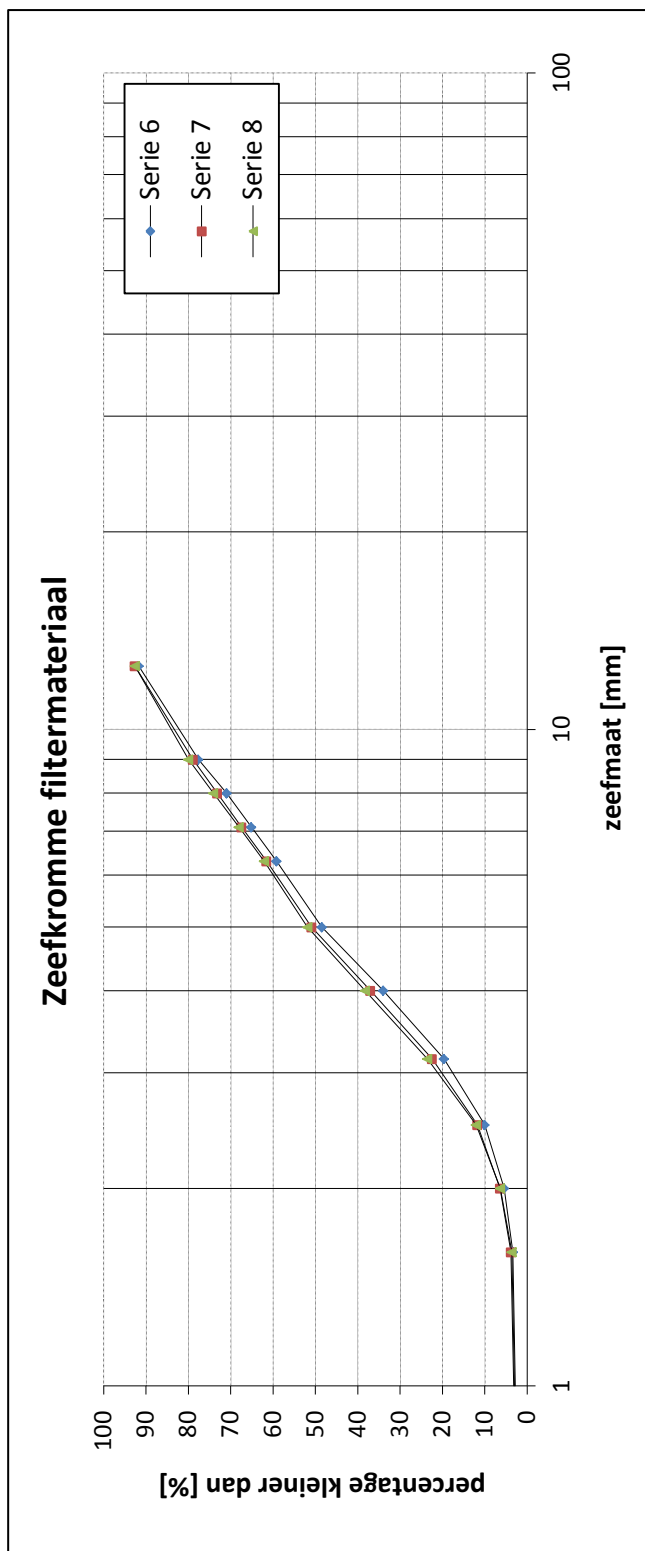
Onderstaande tekeningen zijn afkomstig van “Ontwerpen t.b.v. vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken” van Noppert Beton B.V. van 02.03.2014. De maten zijn opgemeten in de schaalmodellen (gemiddelde waarden) en gegeven in mm.





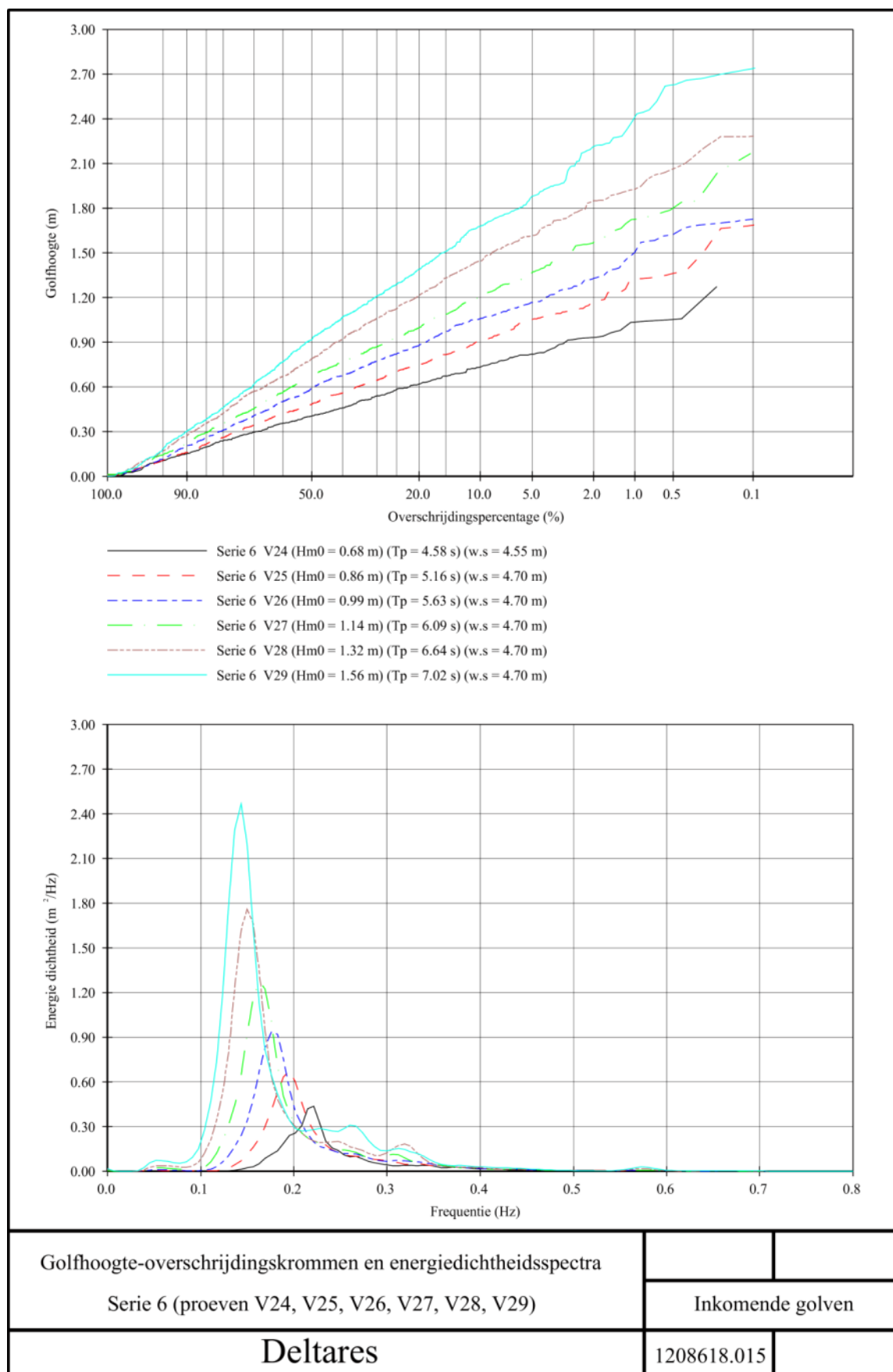
B.2 Locaties van de monsternamen en laagdiktemetingen van het filter

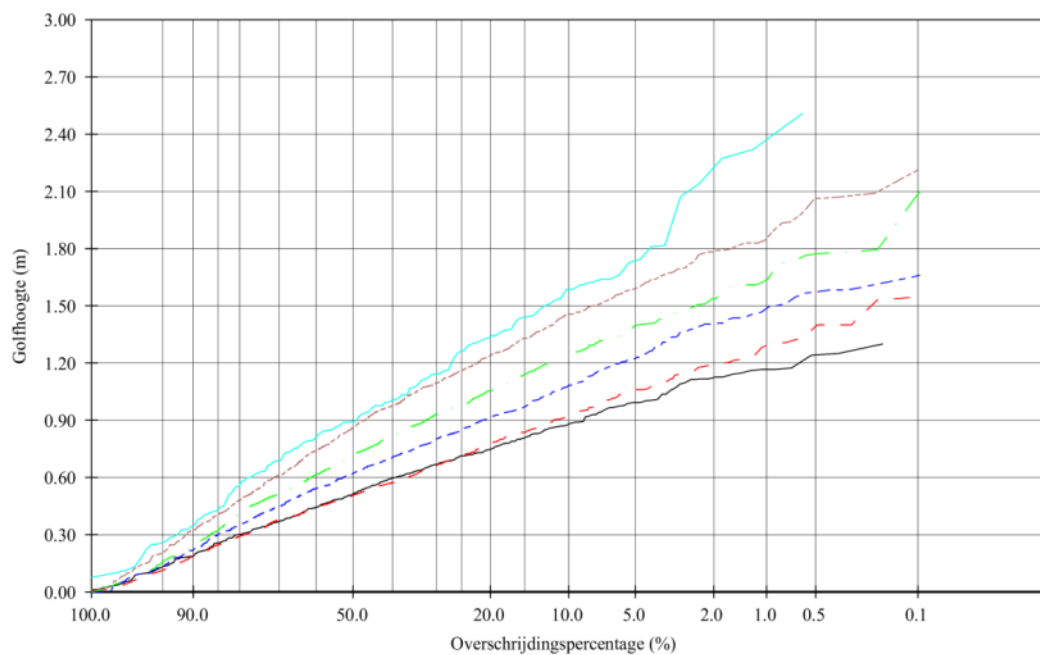


B.3 Zeefkromme filtermateriaal voor alle proevenseries

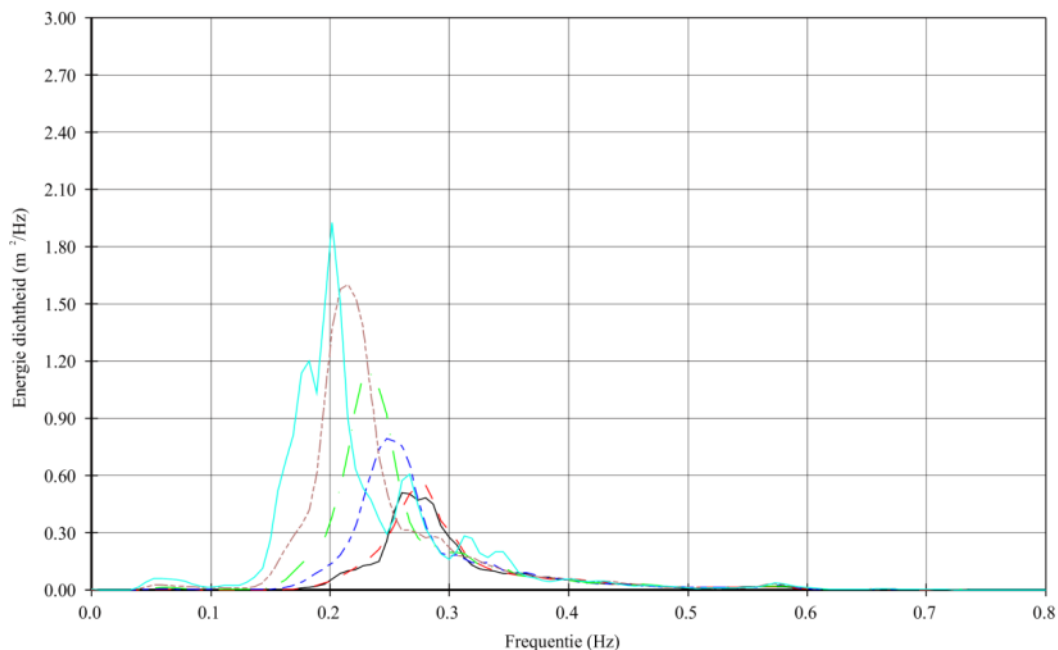
Figuur B.1 Gemeten zeefkrommes van het filtermateriaal voor Serie 6, Serie 7 en Serie 8

B.4 Golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra





- Serie 7 V30 ($H_{m0} = 0.84$ m) ($T_p = 3.69$ s) ($w.s = 4.55$ m)
- - - Serie 7 V31 ($H_{m0} = 0.85$ m) ($T_p = 3.64$ s) ($w.s = 4.70$ m)
- - - Serie 7 V32 ($H_{m0} = 1.01$ m) ($T_p = 3.98$ s) ($w.s = 4.70$ m)
- - - Serie 7 V33 ($H_{m0} = 1.15$ m) ($T_p = 4.28$ s) ($w.s = 4.70$ m)
- - - Serie 7 V34 ($H_{m0} = 1.36$ m) ($T_p = 4.65$ s) ($w.s = 4.70$ m)
- Serie 7 V35 ($H_{m0} = 1.45$ m) ($T_p = 4.95$ s) ($w.s = 4.70$ m)



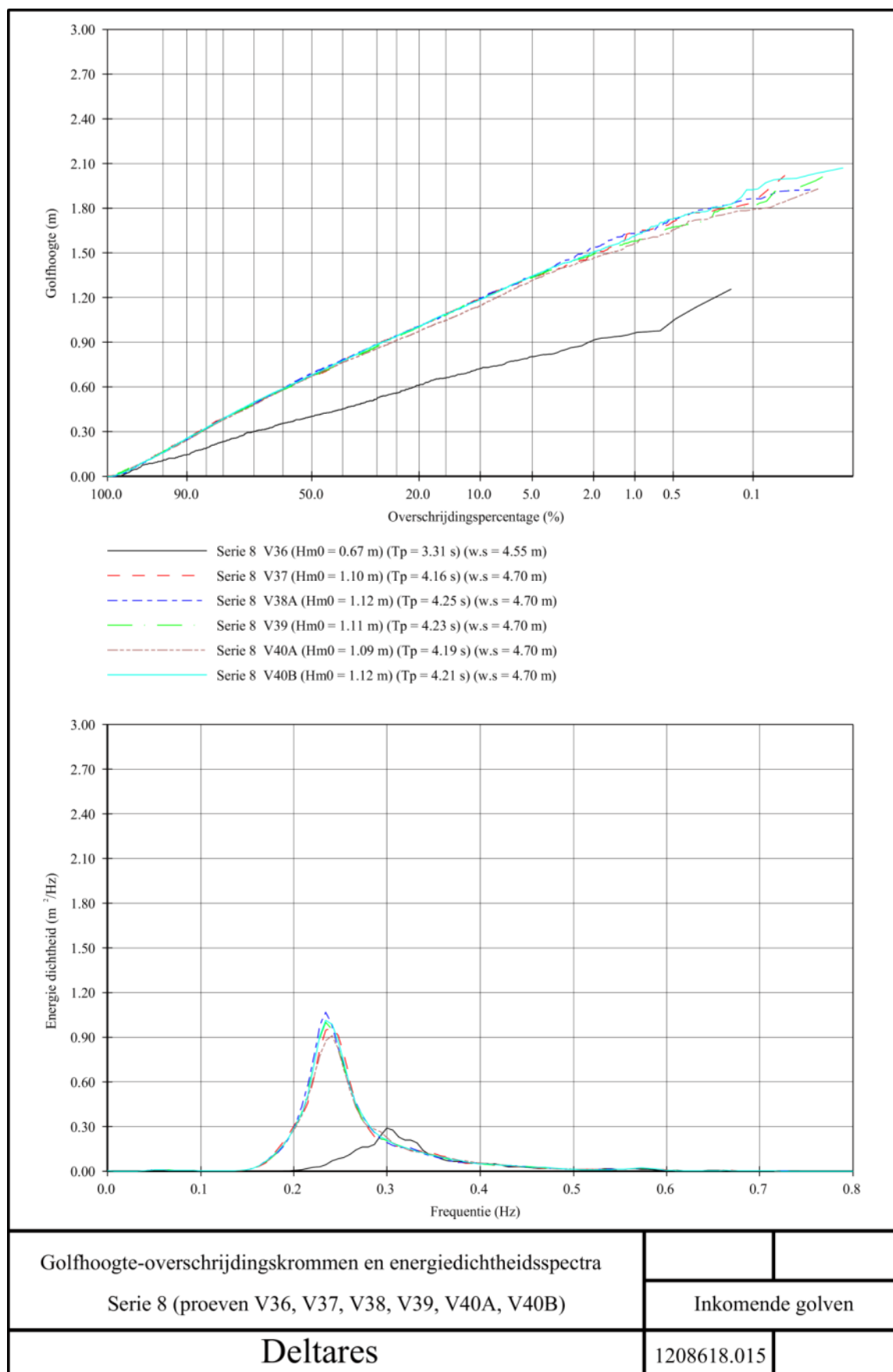
Golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra

Serie 7 (proeven V30, V31, V32, V33, V34, V35)

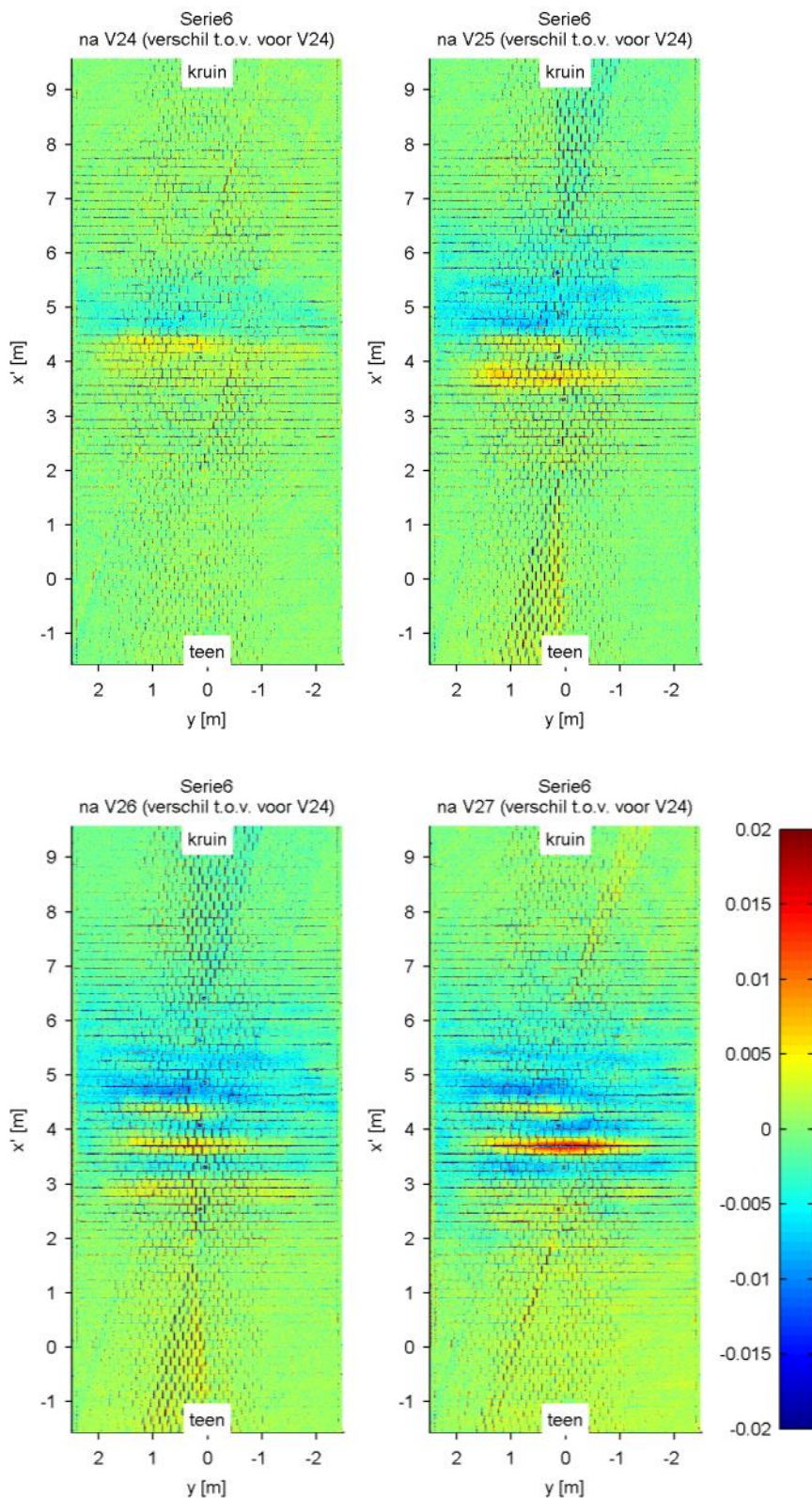
Inkomende golven

Deltares

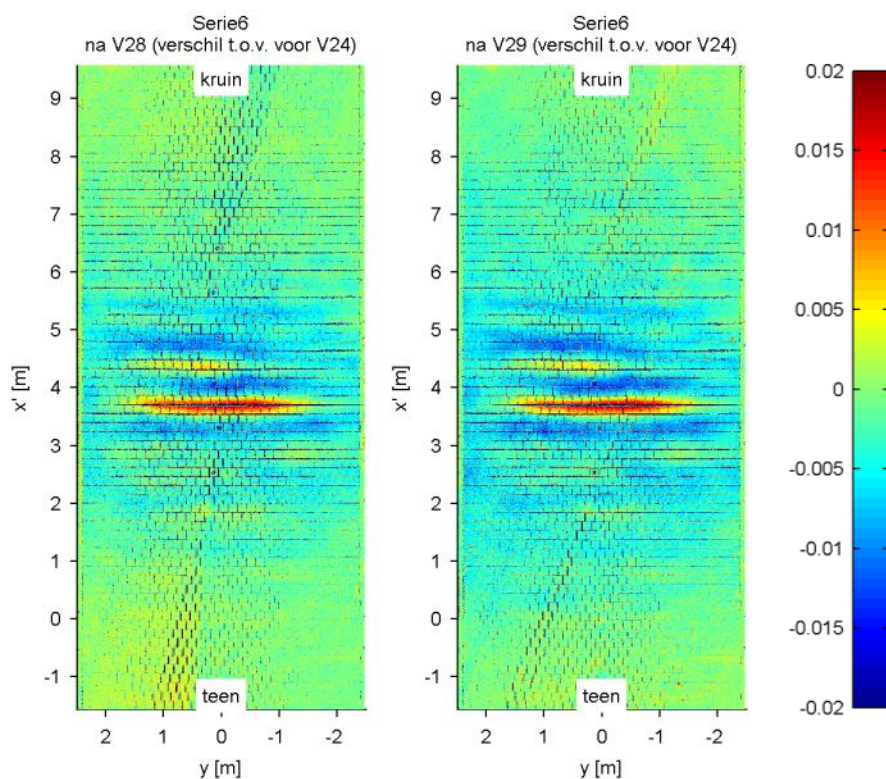
1208618.015



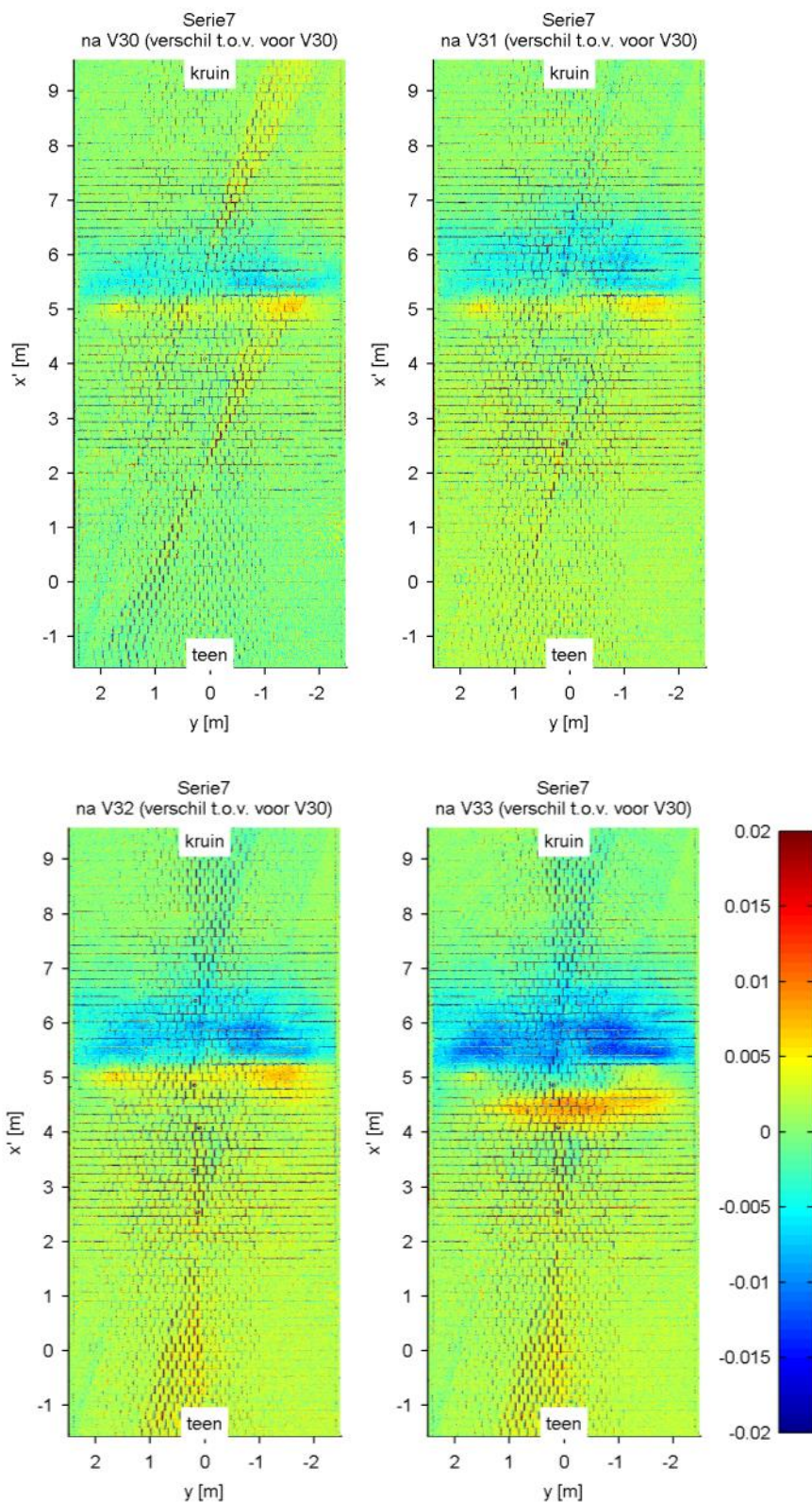
B.5 Verschilplots van de 3D laserscans voor alle proeven



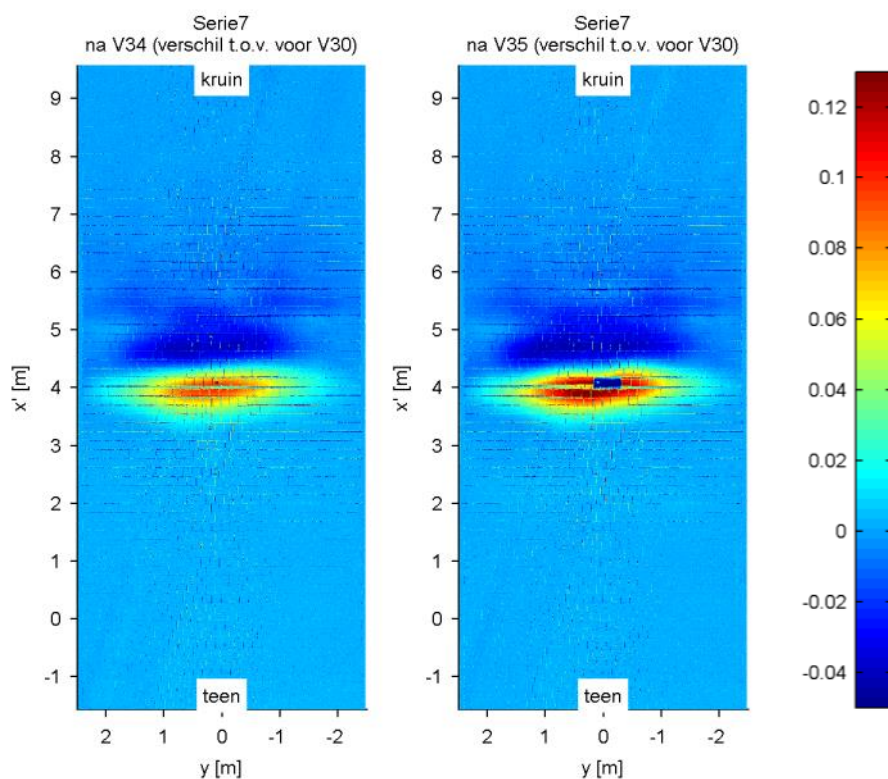
Figuur B.2 Verschilplots van de laserscans van Serie 6, proeven V24 t/m V27



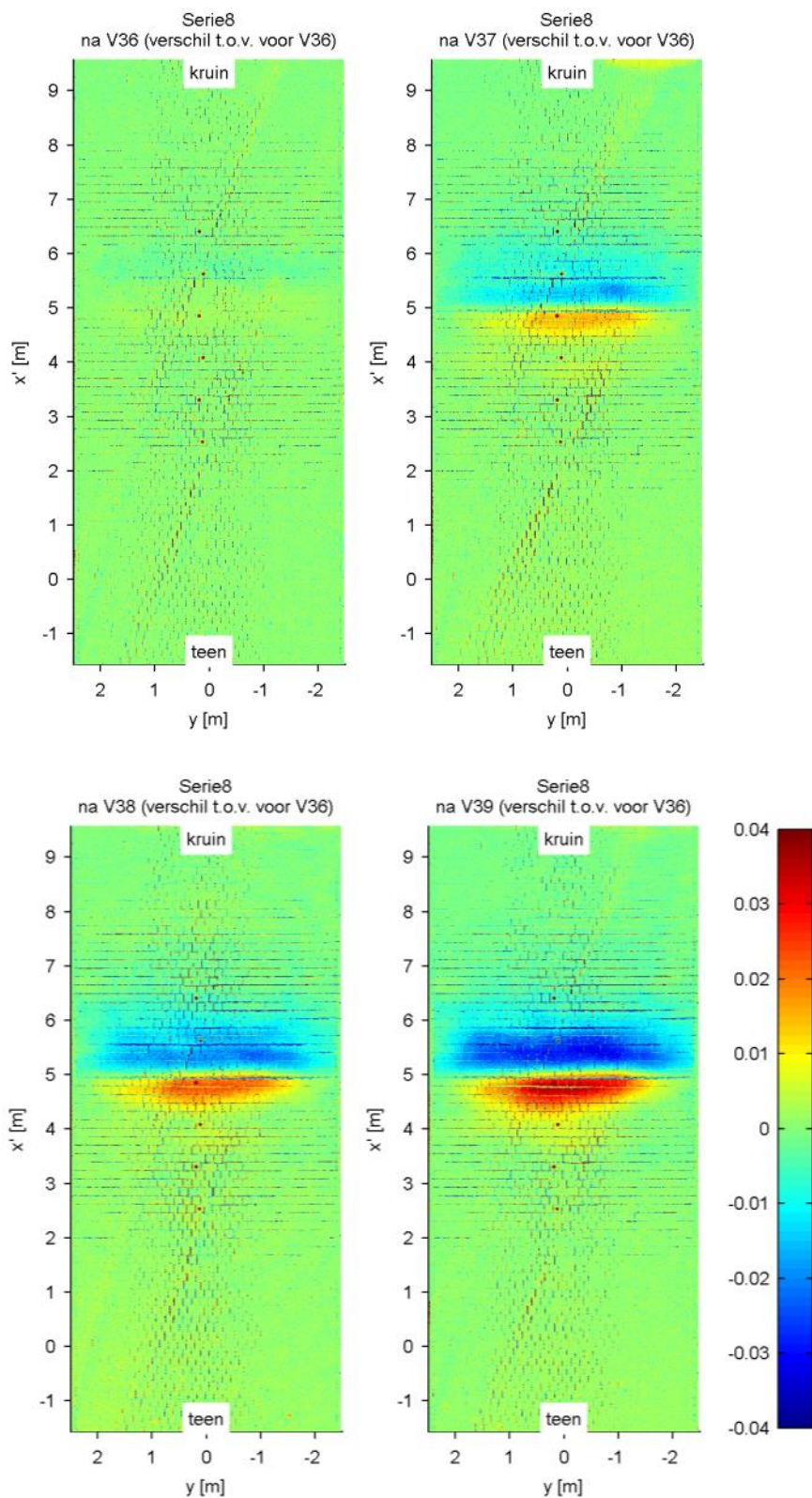
Figuur B.3 Verschilplots van de laserscans van Serie 6, proeven V28 t/m V29



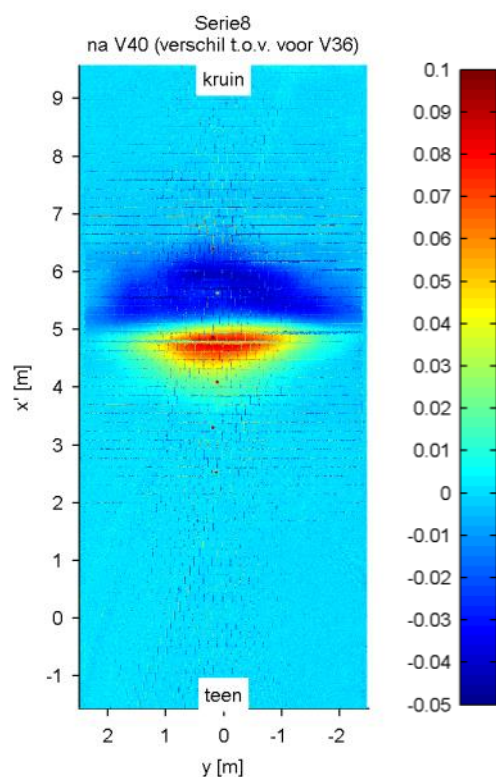
Figuur B.4 Verschilplots van de laserscans van Serie 7, proeven V30 t/m V33



Figuur B.5 Verschilplots van de laserscans van Serie 7, proeven V34 t/m V35

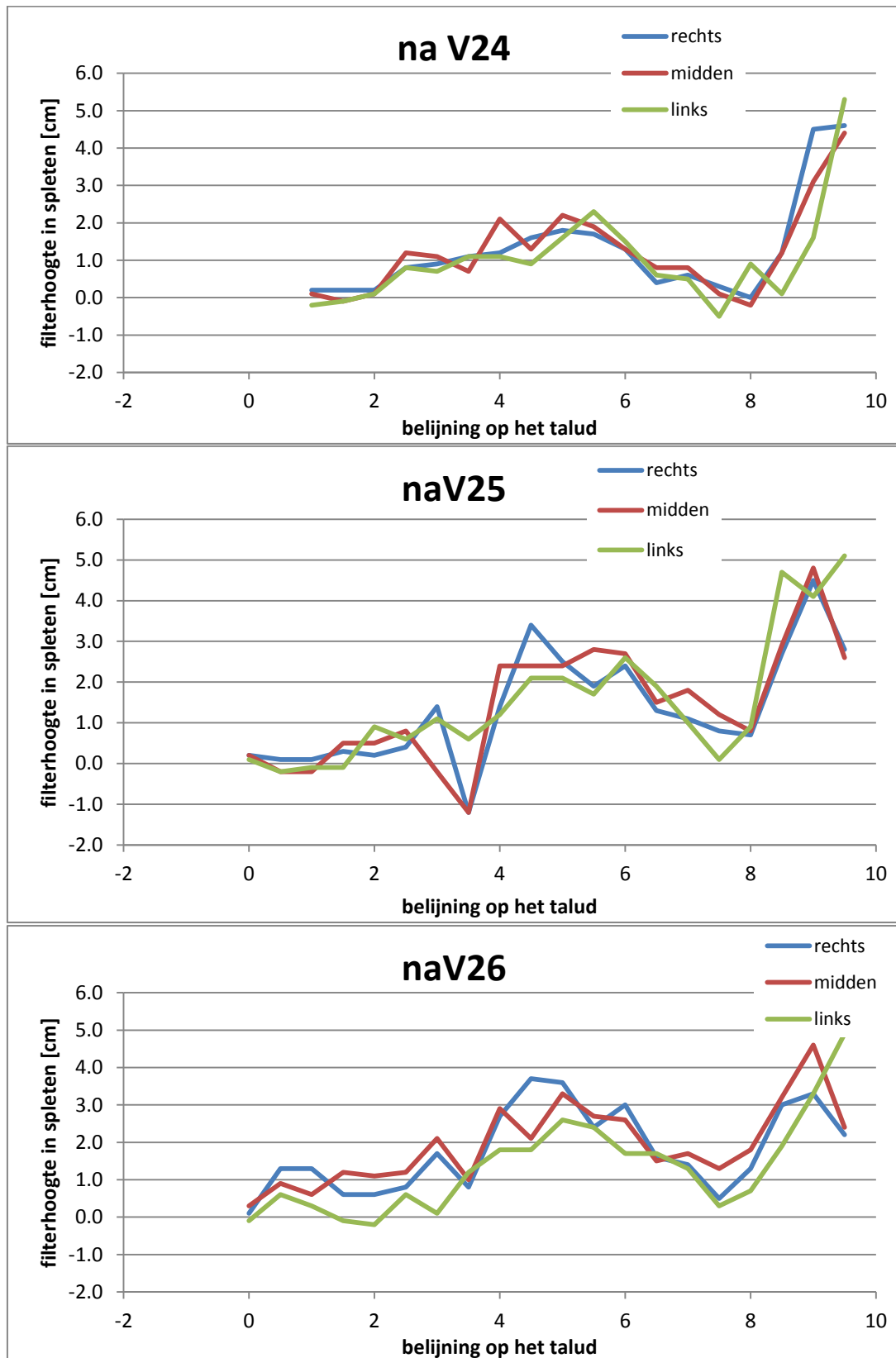


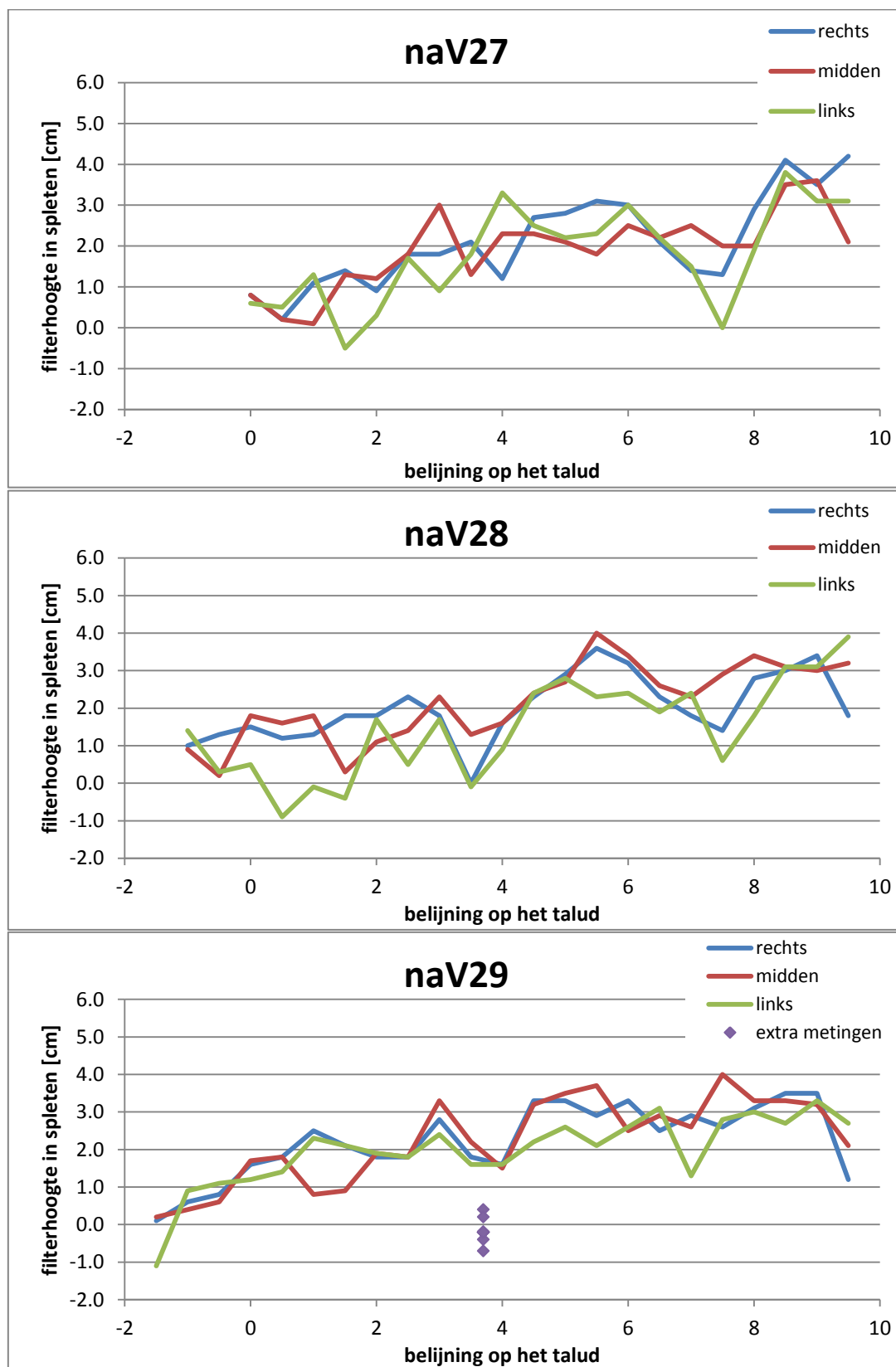
Figuur B.6 Verschilplots van de laserscans van Serie 8, proeven V36 t/m V39



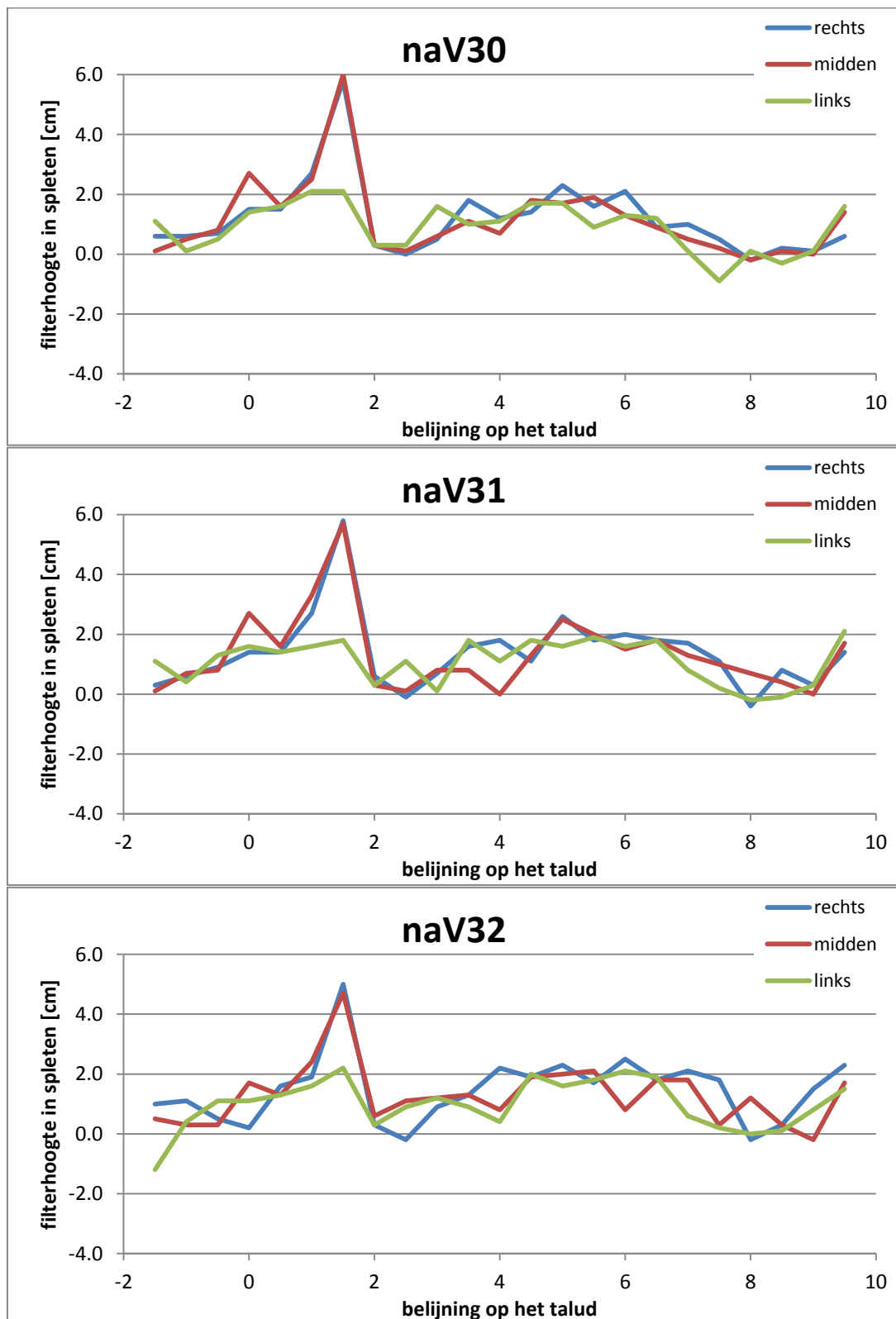
Figuur B.7 Verschilplot van de laserscans van Serie 8, proef V40

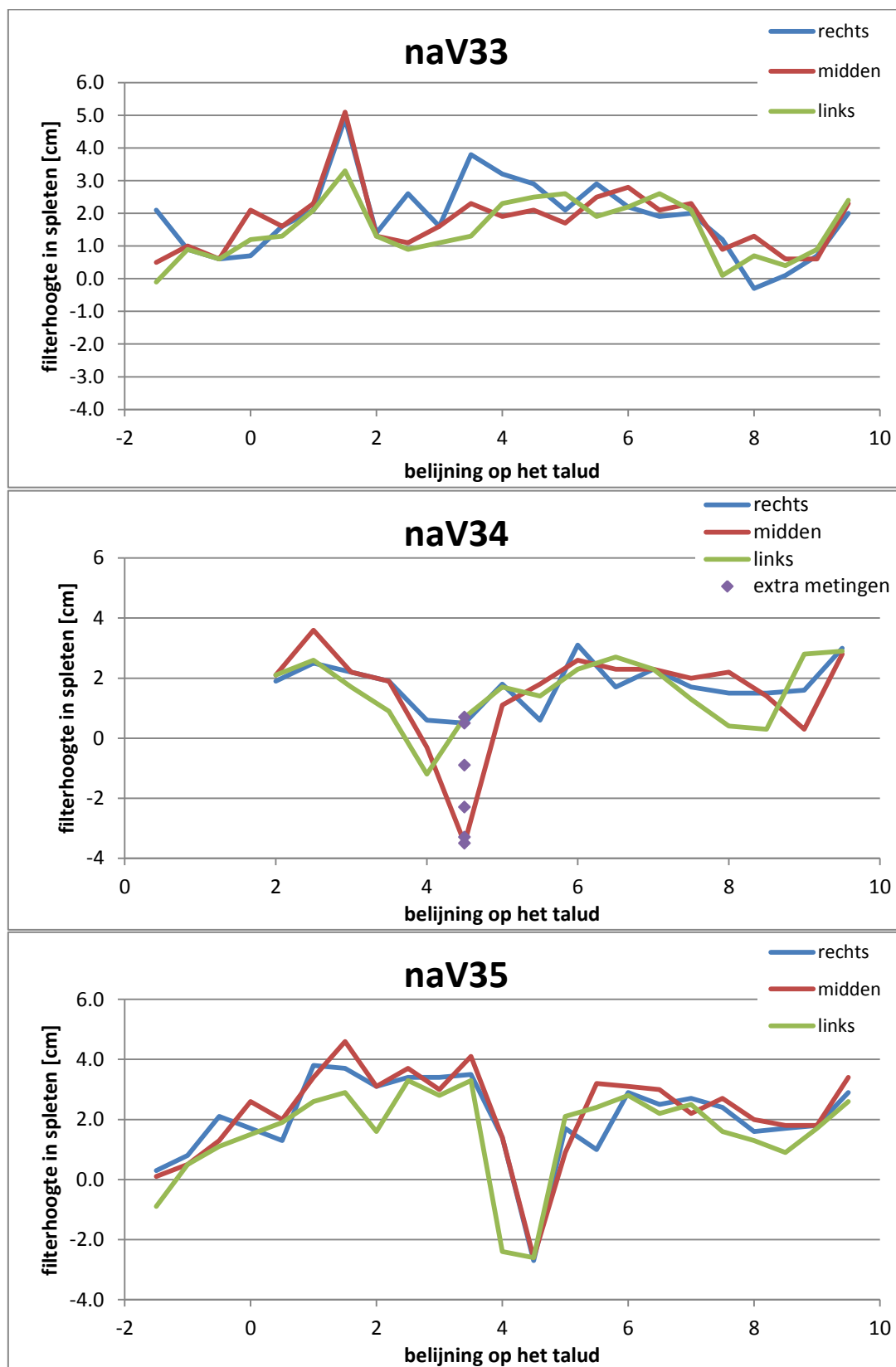
B.6 Opgemeten hoogte van het filtermateriaal in de spleten



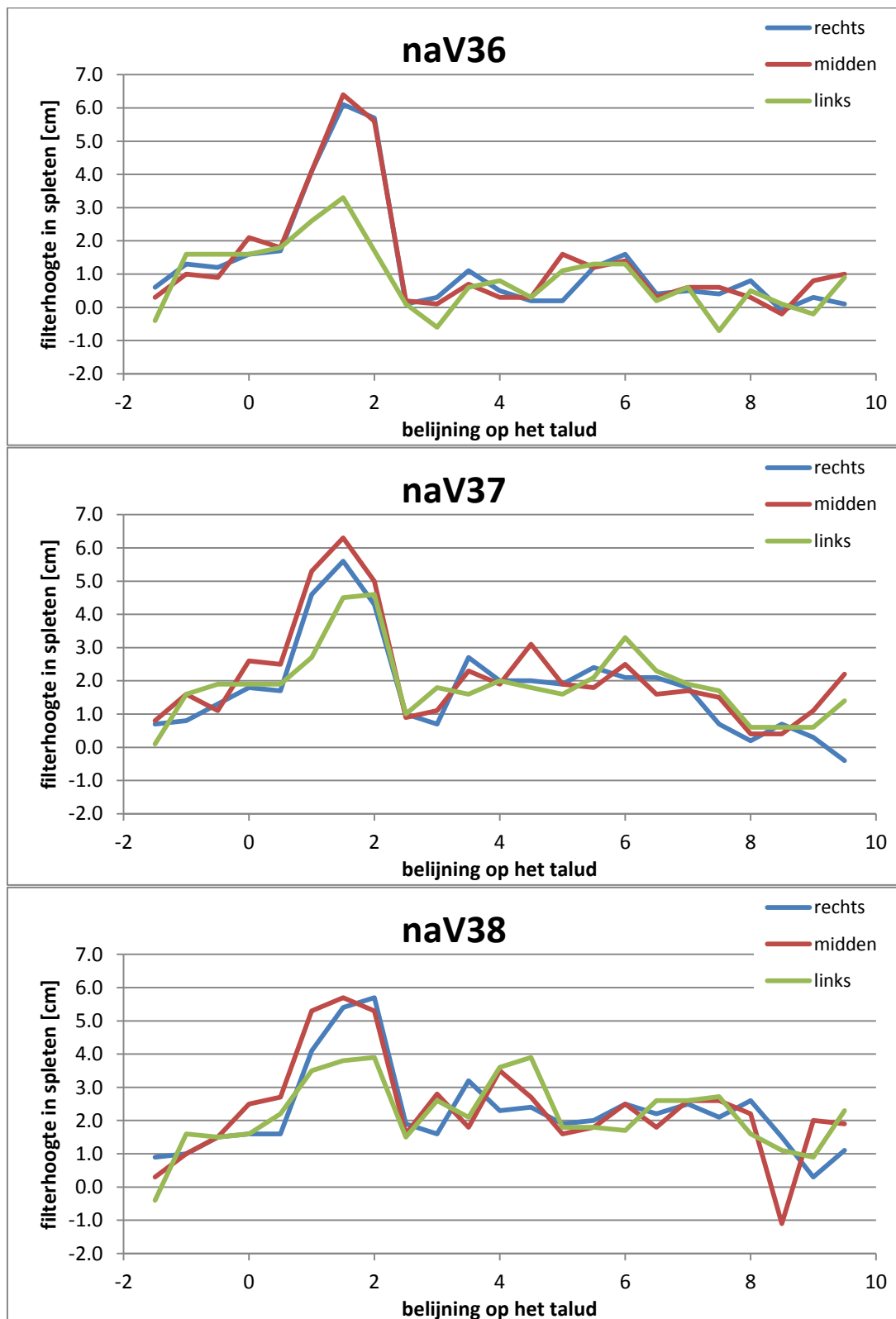


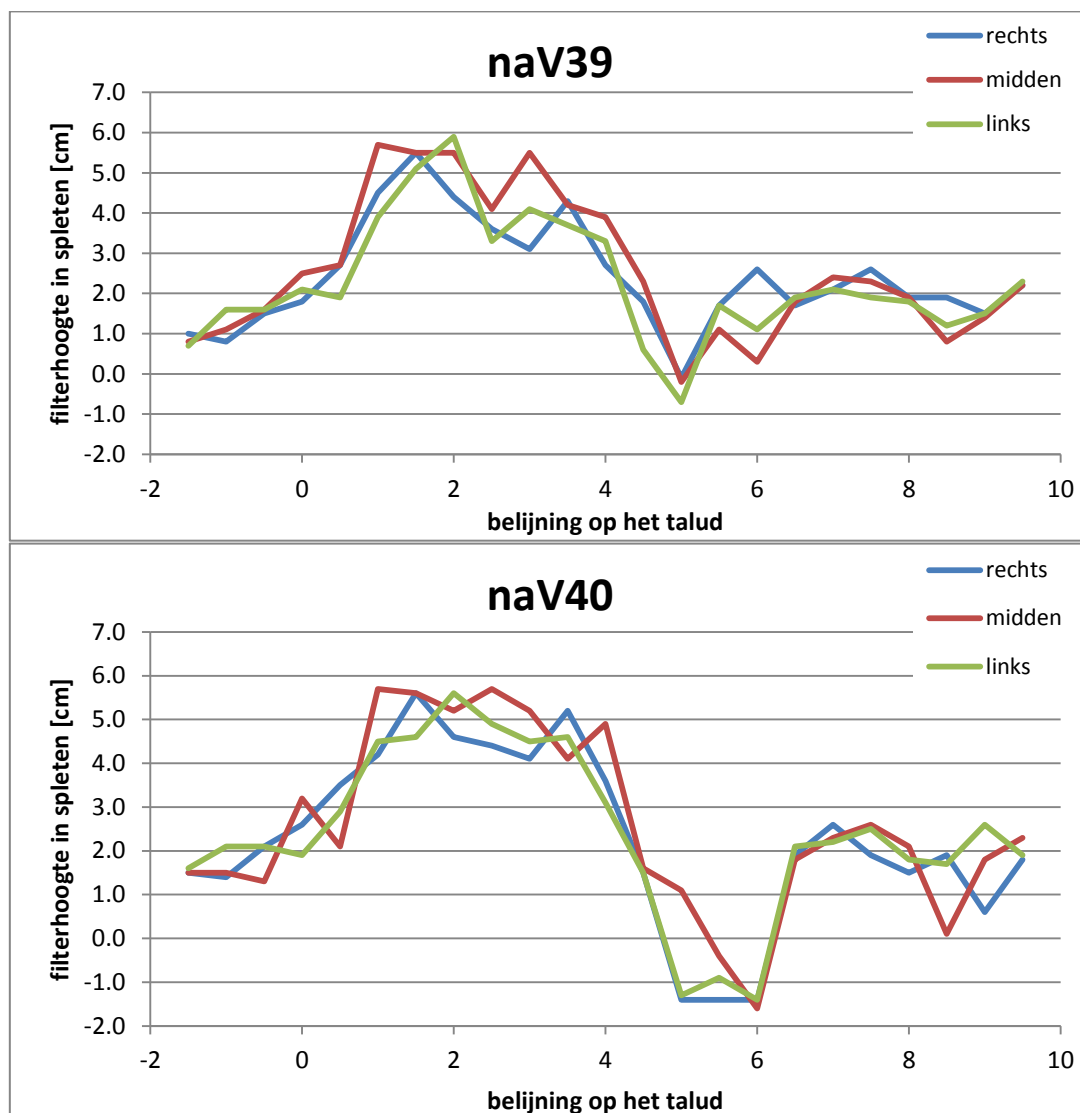
Figuur B.8 Opgemeten filterhoogte in de spleten van Serie 6





Figuur B.9 Opgemeten filterhoogte in de spleten van Serie 7





Figuur B.10 Opgemeten filterhoogte in de spleten van Serie 8

C Foto's

Overzicht

C.1 Inbouw opstelling	C-1
C.2 Serie 6	C-9
C.3 Serie 7	C-17
C.4 Serie 8	C-25

C.1 Inbouw opstelling

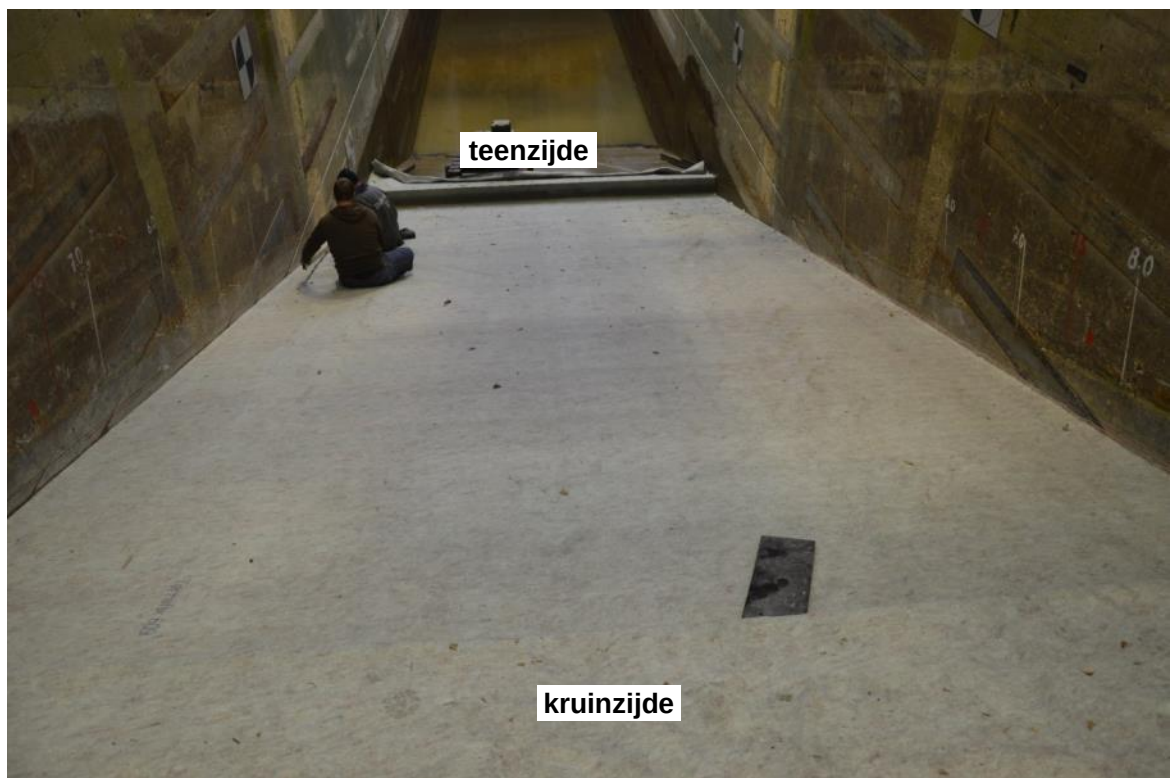
Figuur C.1	Zandcementstabilisatie als ondergrond voor de steenzetting	C-2
Figuur C.2	Dikte van het gebruikt geotextiel	C-2
Figuur C.3	Aangebracht geotextiel.....	C-3
Figuur C.4	Inbrengen van het filter met de kraan	C-3
Figuur C.5	Opmeten van de filterlaagdikte tijdens de inbouw van de stenen (locatie 5.3, voor Serie 8)	C-4
Figuur C.6	Monsternamen van het filtermateriaal (locatie M2, voor Serie 8)	C-4
Figuur C.7	Tijdens de inbouw van de Verkalit stenen (voor Serie 6)	C-5
Figuur C.8	Inbouw van een $\frac{3}{4}$ -steen in de steenzetting (voor Serie 6)	C-5
Figuur C.9	Afwerking modelrand, meetcabinezijde (voor Serie 6)	C-6
Figuur C.10	Afwerking modelrand, halzijde met stalen proefiel (voor Serie 8)	C-6
Figuur C.11	Inzetten van de bovenste twee rijen van de testsectie (voor Serie 7)	C-7
Figuur C.12	Afsluiting bovenkant van de steenzetting (voor Serie 8).....	C-7



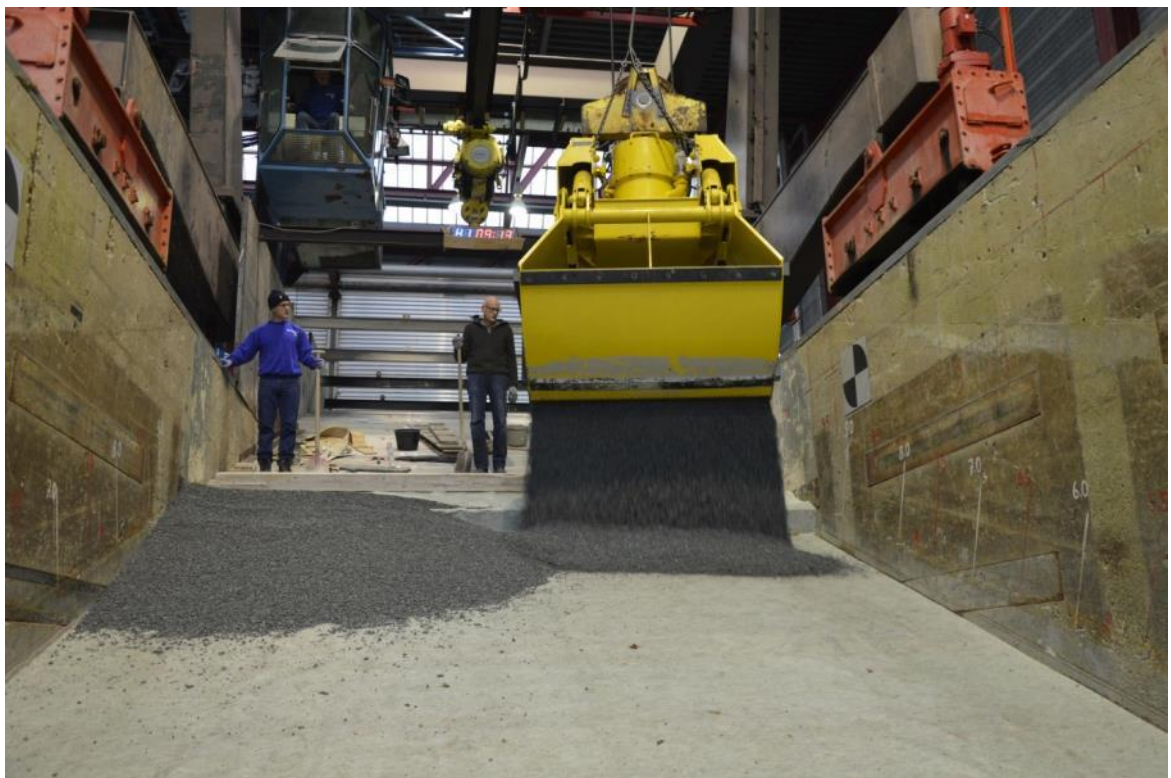
Figuur C.1 Zandcementstabilisatie als ondergrond voor de steenzetting



Figuur C.2 Dikte van het gebruikt geotextiel



Figuur C.3 Aangebracht geotextiel



Figuur C.4 Inbrengen van het filter met de kraan



Figuur C.5 Opmeten van de filterlaagdikte tijdens de inbouw van de stenen (locatie 5.3, voor Serie 8)



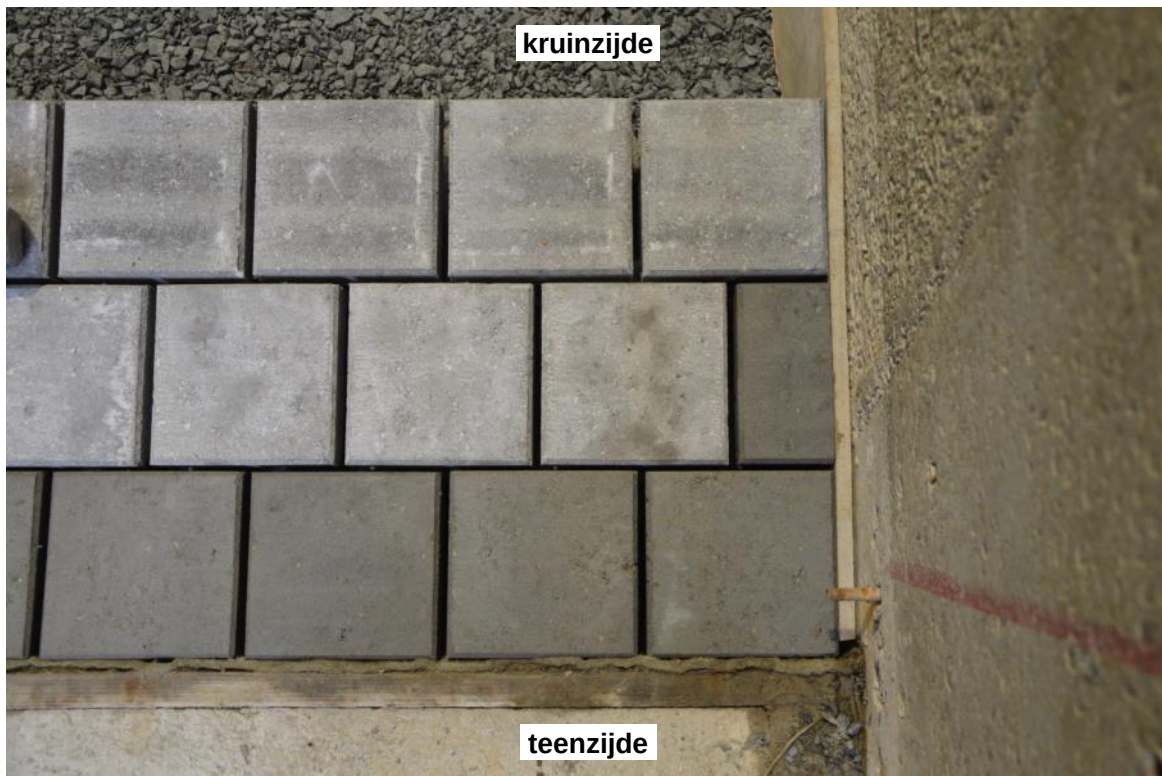
Figuur C.6 Monsternamen van het filtermateriaal (locatie M2, voor Serie 8)



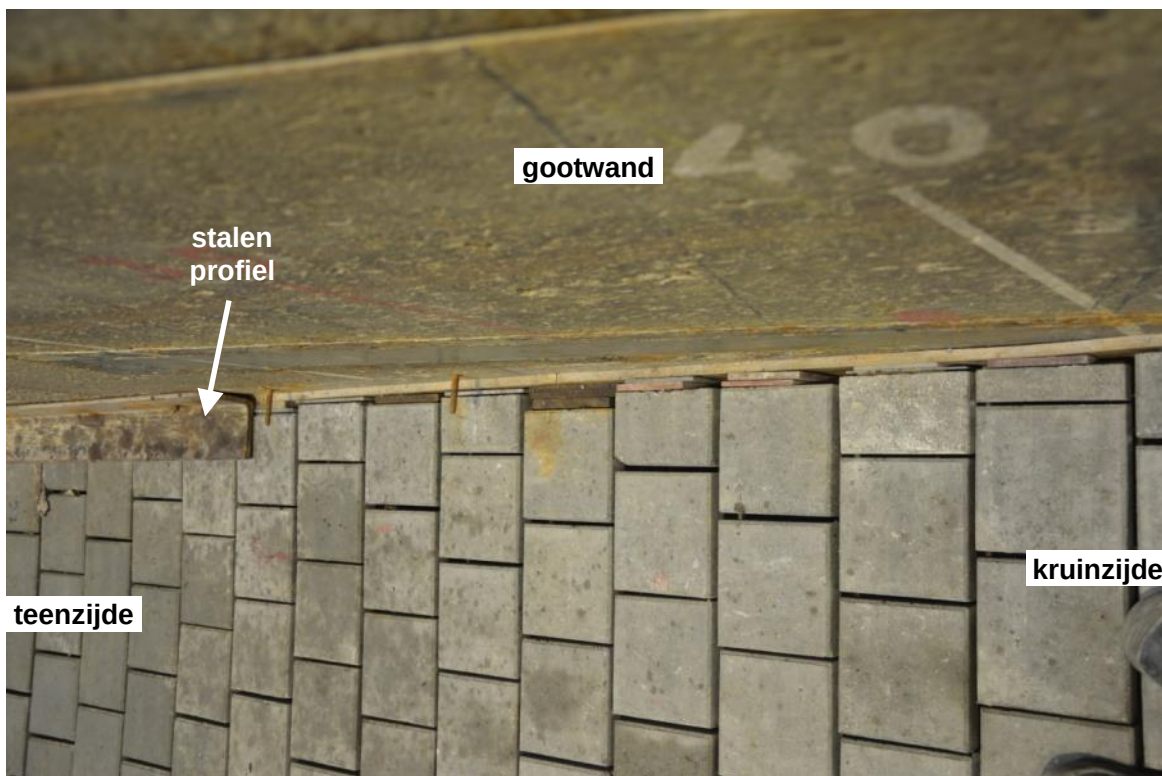
Figuur C.7 Tijdens de inbouw van de Verkalit stenen (voor Serie 6)



Figuur C.8 Inbouw van een ¾-steen in de steenzetting (voor Serie 6)



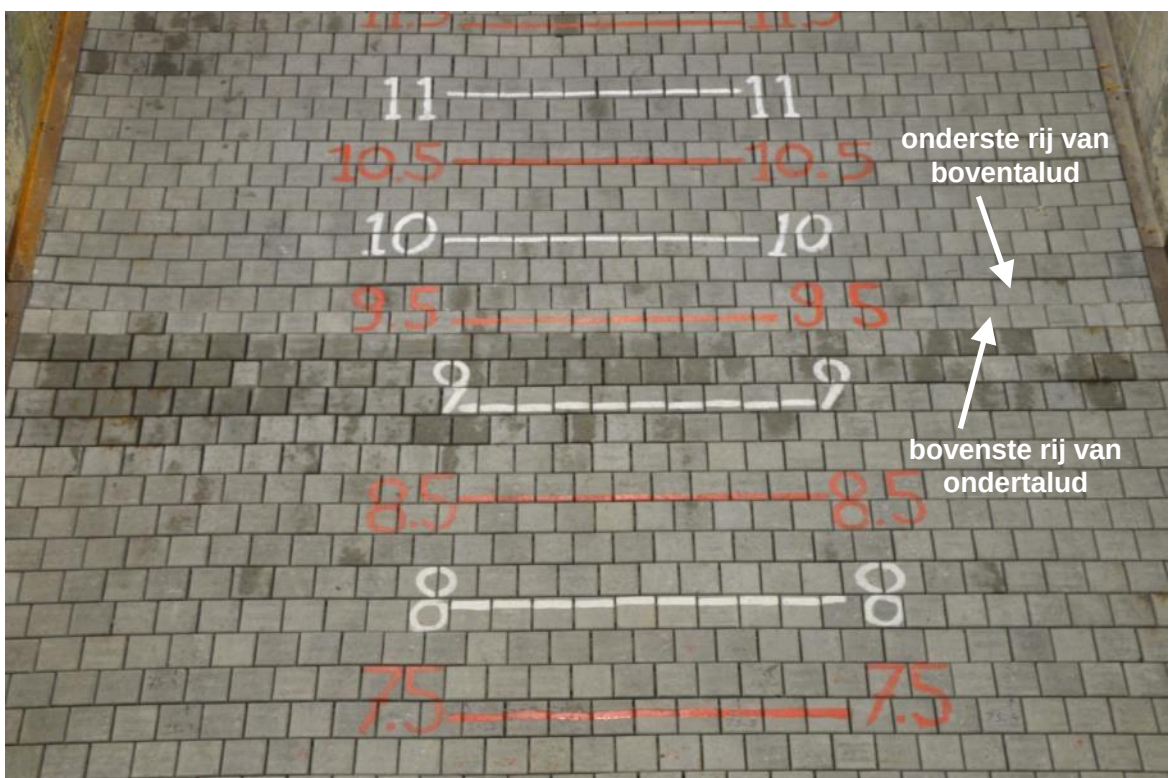
Figuur C.9 Afwerking modelrand, meetcabinezijde (voor Serie 6)



Figuur C.10 Afwerking modelrand, halzijde met stalen proefiel (voor Serie 8)



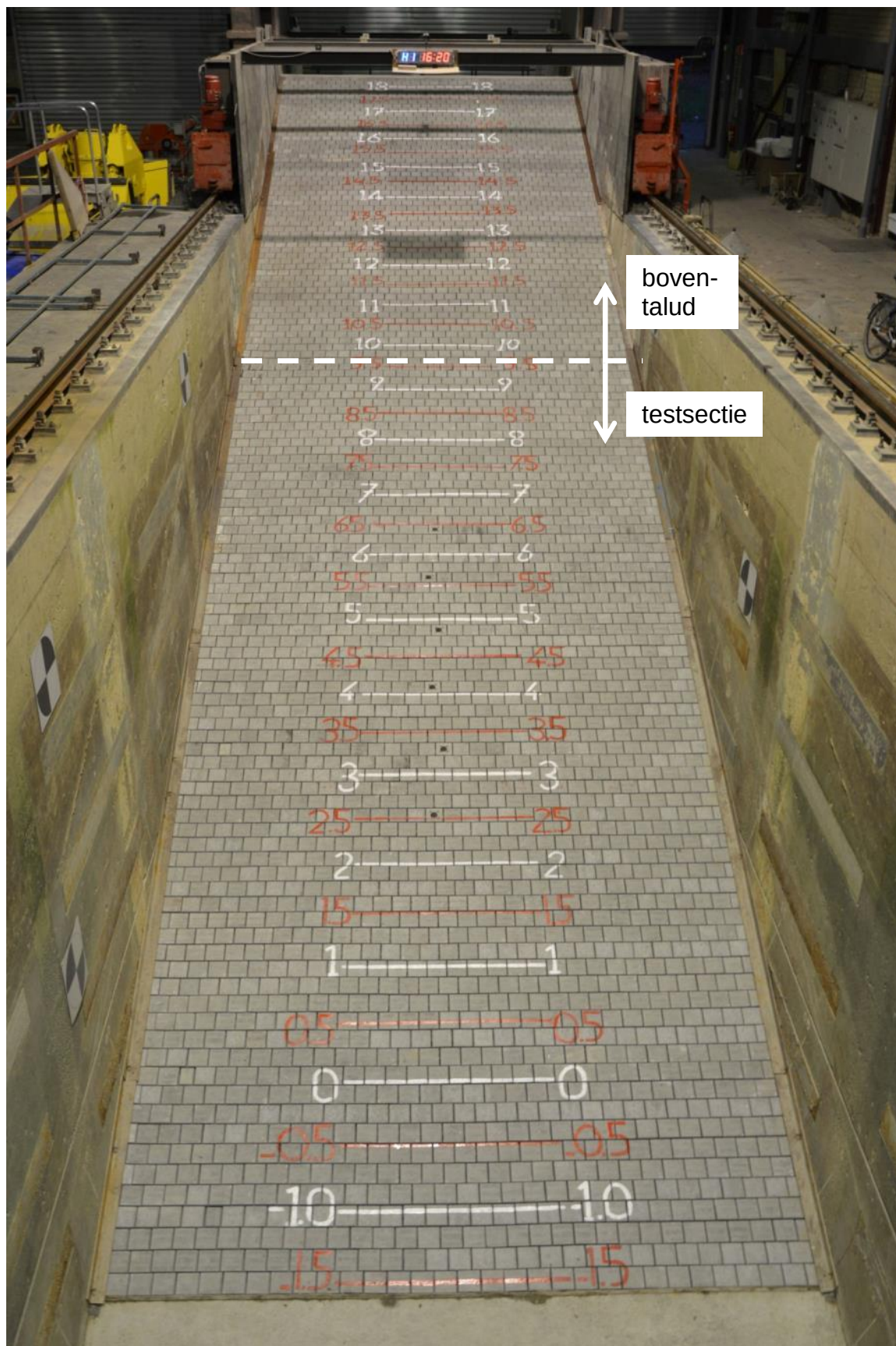
Figuur C.11 Inzetten van de bovenste twee rijen van de testsectie (voor Serie 7)



Figuur C.12 Afsluiting bovenkant van de steenzetting (voor Serie 8)

C.2 Serie 6

Figuur C.13	De beginsituatie van de steenzetting voorafgaand aan de Serie 6 (voor proef V24)	C-10
Figuur C.14	Het belastte taluddeel na proef V24	C-11
Figuur C.15	Het belastte taluddeel na proef V25	C-11
Figuur C.16	Het belastte taluddeel na proef V26	C-12
Figuur C.17	Brekende golf tijdens proef V27	C-12
Figuur C.18	Het belaste taluddeel na proef V27	C-13
Figuur C.19	Het belaste taluddeel van boven na proef V27	C-13
Figuur C.20	Het belaste taluddeel na proef V28	C-14
Figuur C.21	Het belaste taluddeel van boven na proef V28	C-14
Figuur C.22	Brekende golf tijdens proef V29	C-15
Figuur C.23	Het belaste taluddeel na proef V29	C-15
Figuur C.24	Opmeten van het niveau van de filterlaag ten opzichte van de toplaag in de open spleet (na proef V29)	C-16



Figuur C.13 De beginsituatie van de steenzetting voorafgaand aan de Serie 6 (voor proef V24)



Figuur C.14 Het belastte taluddeel na proef V24



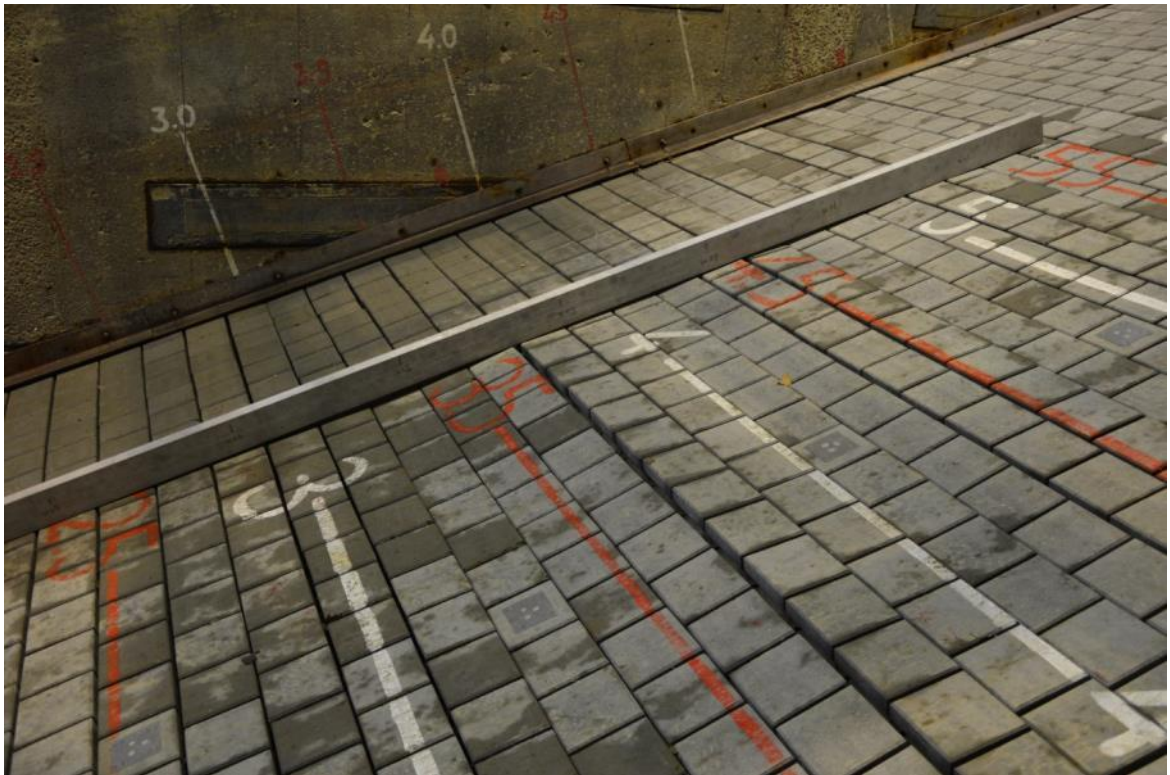
Figuur C.15 Het belastte taluddeel na proef V25



Figuur C.16 Het belastte taluddeel na proef V26



Figuur C.17 Brekende golf tijdens proef V27



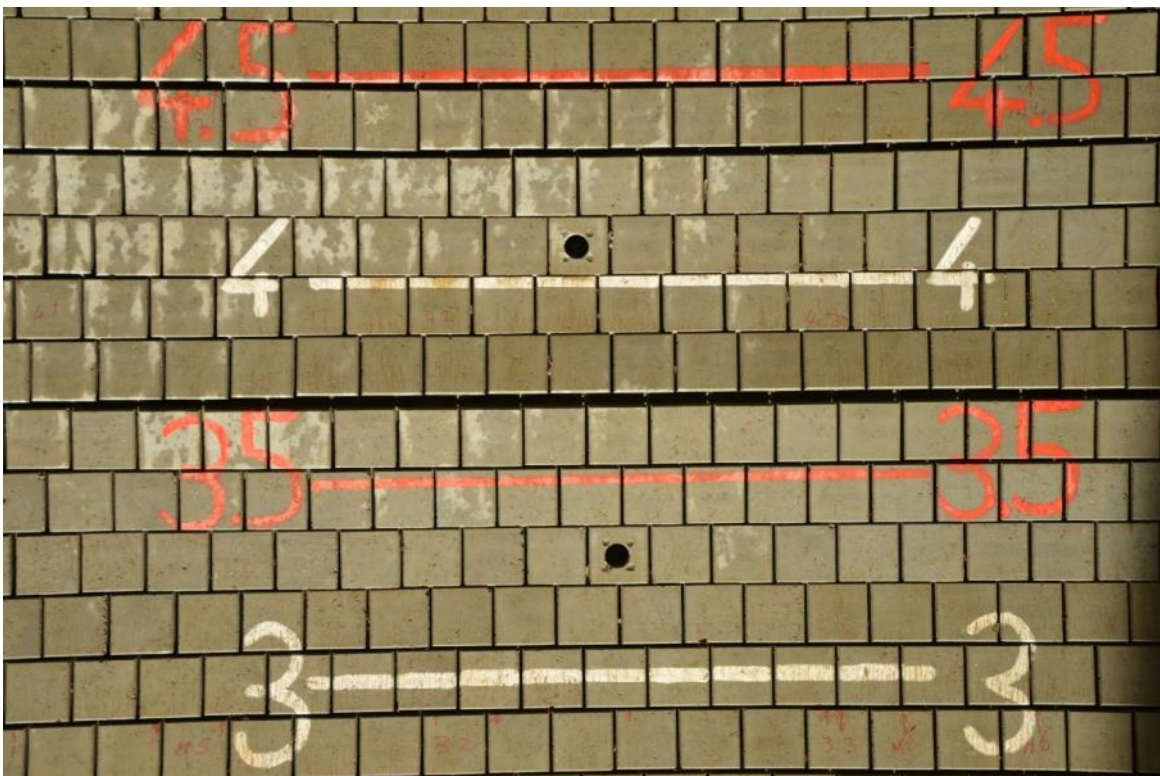
Figuur C.18 Het belaste taluddeel na proef V27



Figuur C.19 Het belaste taluddeel van boven na proef V27



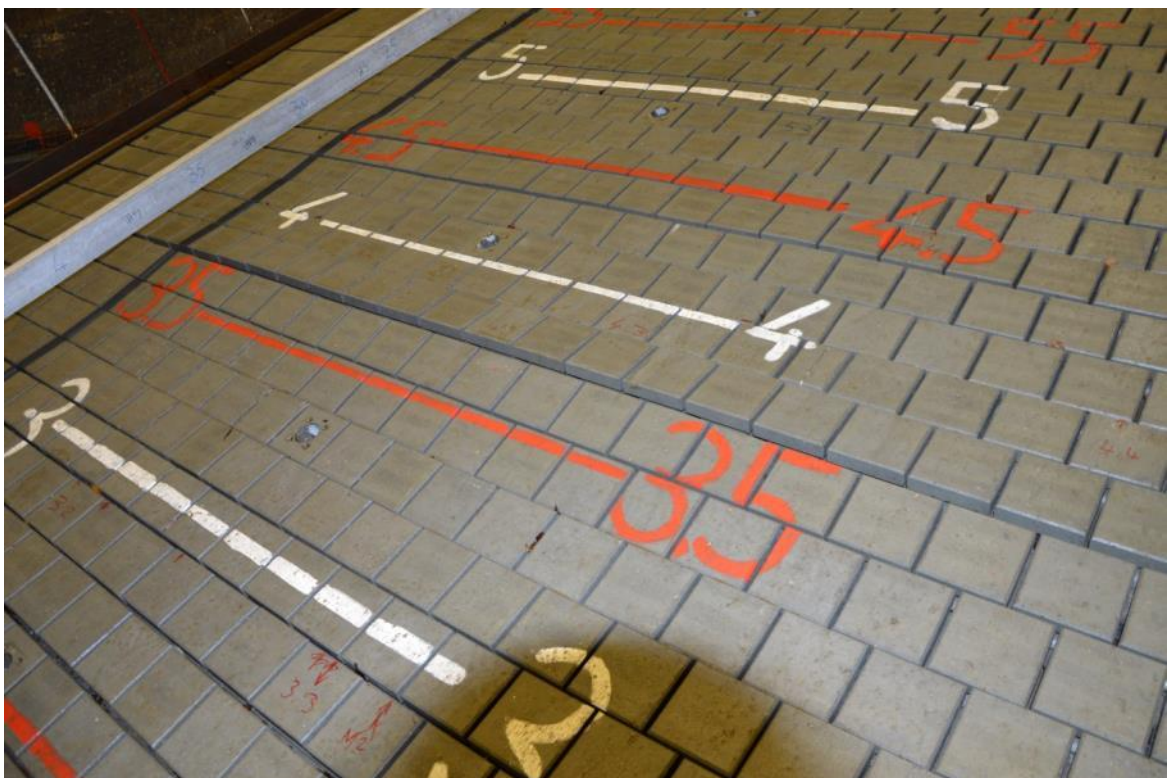
Figuur C.20 Het belaste taluddeel na proef V28



Figuur C.21 Het belaste taluddeel van boven na proef V28



Figuur C.22 Brekende golf tijdens proef V29



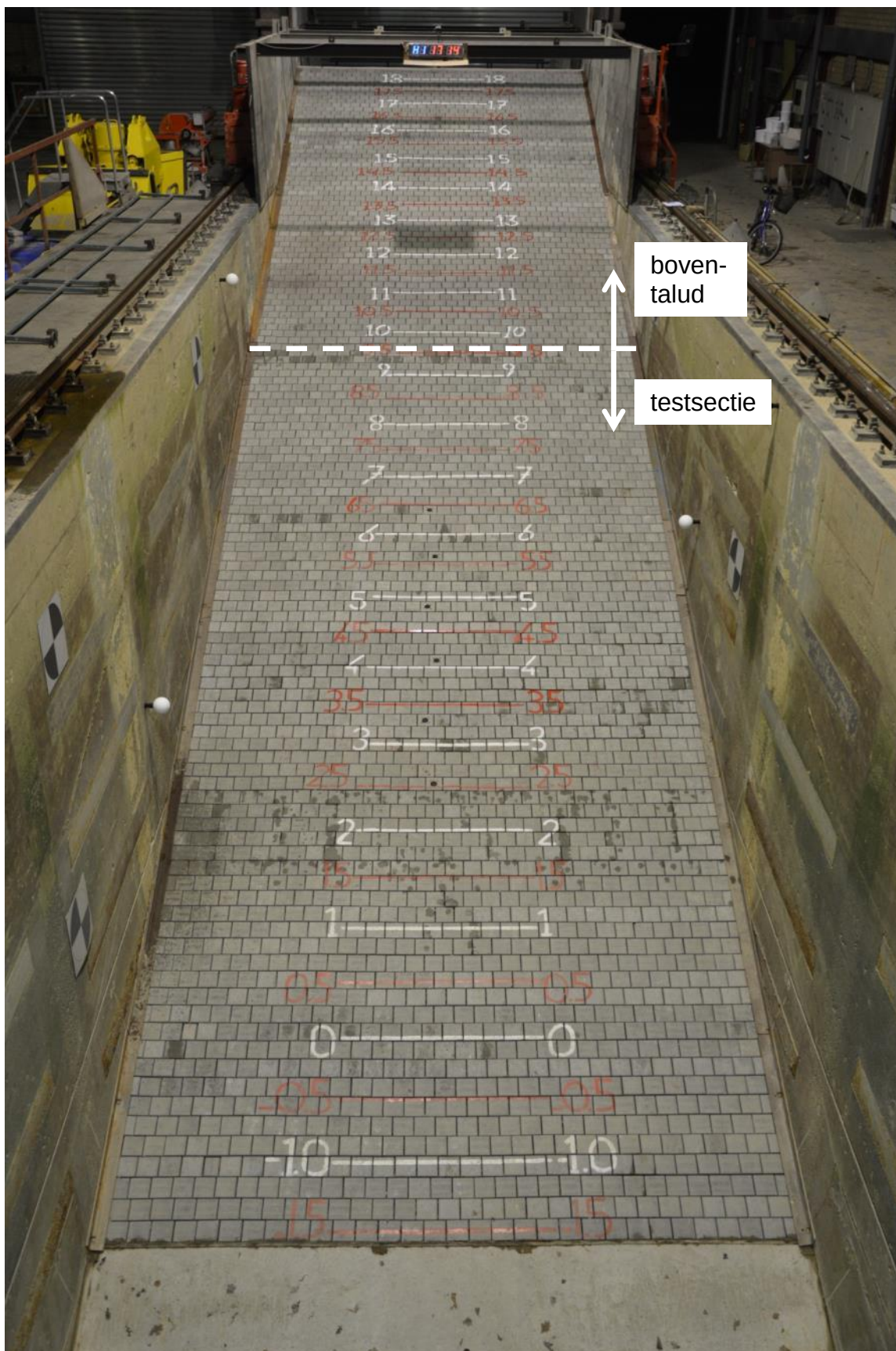
Figuur C.23 Het belaste taluddeel na proef V29



Figuur C.24 Opmeten van het niveau van de filterlaag ten opzichte van de toplaag in de open spleet (na proef V29)

C.3 Serie 7

Figuur C.25	De beginsituatie van de steenzetting voorafgaand aan de Serie 7 (voor proef V30)	C-18
Figuur C.26	Het belastte taluddeel na proef V30	C-19
Figuur C.27	Het belastte taluddeel na proef V31	C-19
Figuur C.28	Brekende golf tijdens proef V32	C-20
Figuur C.29	Het belastte taluddeel van boven na proef V32	C-20
Figuur C.30	Brekende golf tijdens proef V33	C-21
Figuur C.31	Het belaste taluddeel na proef V33	C-21
Figuur C.32	Inkomende golven tijdens proef V34	C-22
Figuur C.33	Vervorming van het talud na proef V34	C-22
Figuur C.34	Schade na proef V35	C-23



Figuur C.25 De beginsituatie van de steenzetting voorafgaand aan de Serie 7 (voor proef V30)



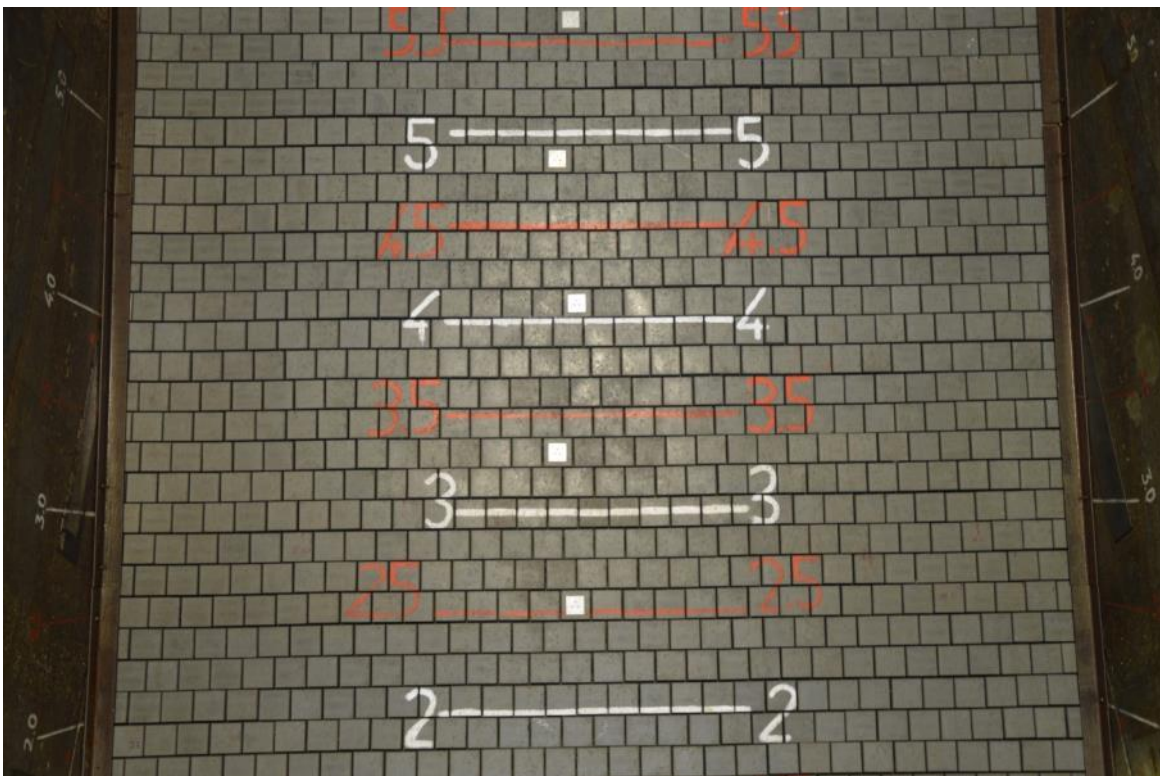
Figuur C.26 Het belastte taluddeel na proef V30



Figuur C.27 Het belastte taluddeel na proef V31



Figuur C.28 Brekende golf tijdens proef V32



Figuur C.29 Het belaste taluddeel van boven na proef V32



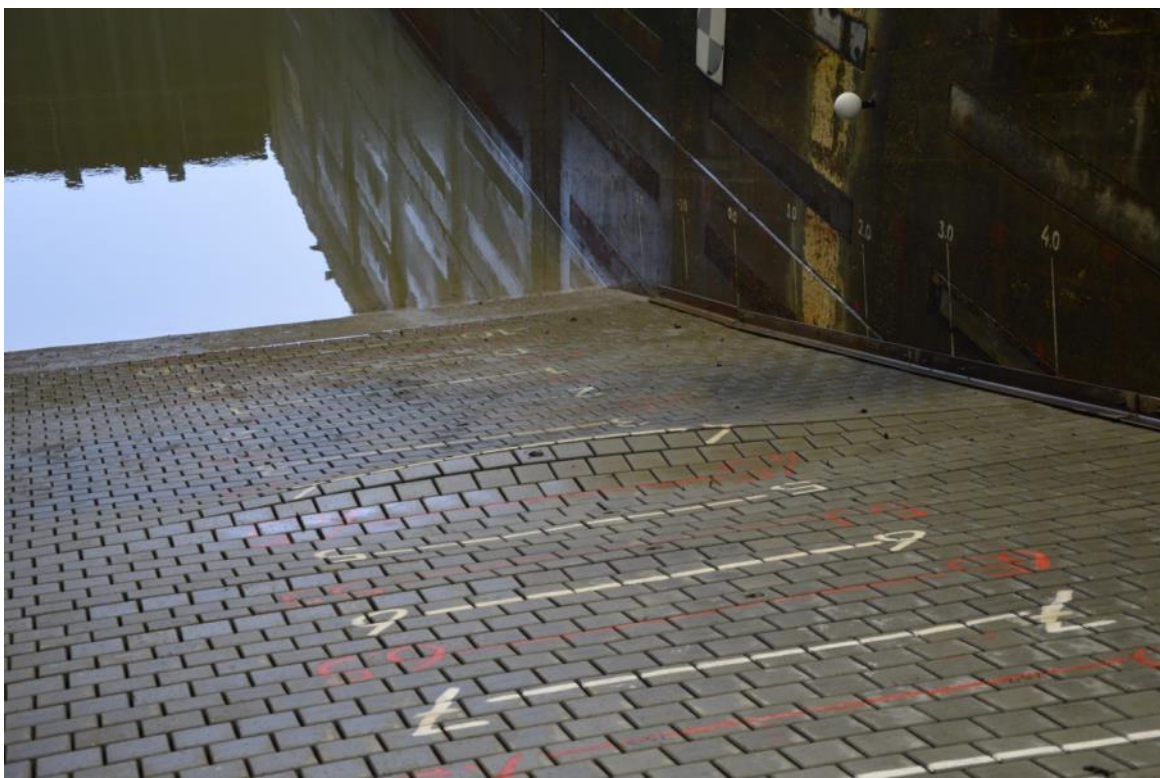
Figuur C.30 Brekende golf tijdens proef V33



Figuur C.31 Het belaste taluddeel na proef V33



Figuur C.32 Inkomende golven tijdens proef V34



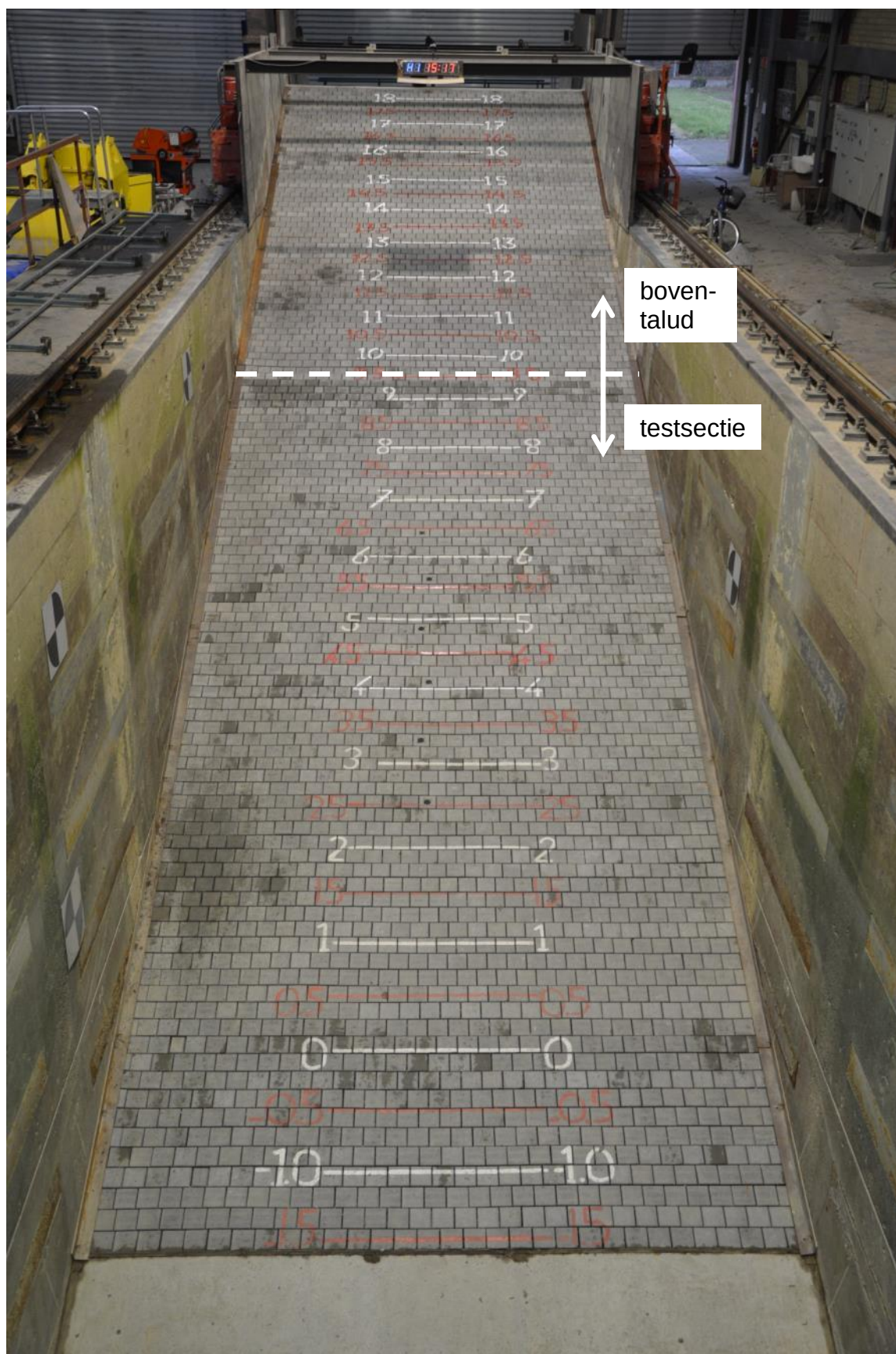
Figuur C.33 Vervorming van het talud na proef V34



Figuur C.34 Schade na proef V35

C.4 Serie 8

Figuur C.35	De beginsituatie van de steenzetting voorafgaand aan de Serie 8 (voor proef V36)	C-26
Figuur C.36	Brekende golf tijdens proef V37	C-27
Figuur C.37	Vervorming na proef V37	C-27
Figuur C.38	Vervorming na proef V39	C-28
Figuur C.39	Vervorming na proef V40	C-28



Figuur C.35 De beginsituatie van de steenzetting voorafgaand aan de Serie 8 (voor proef V36)



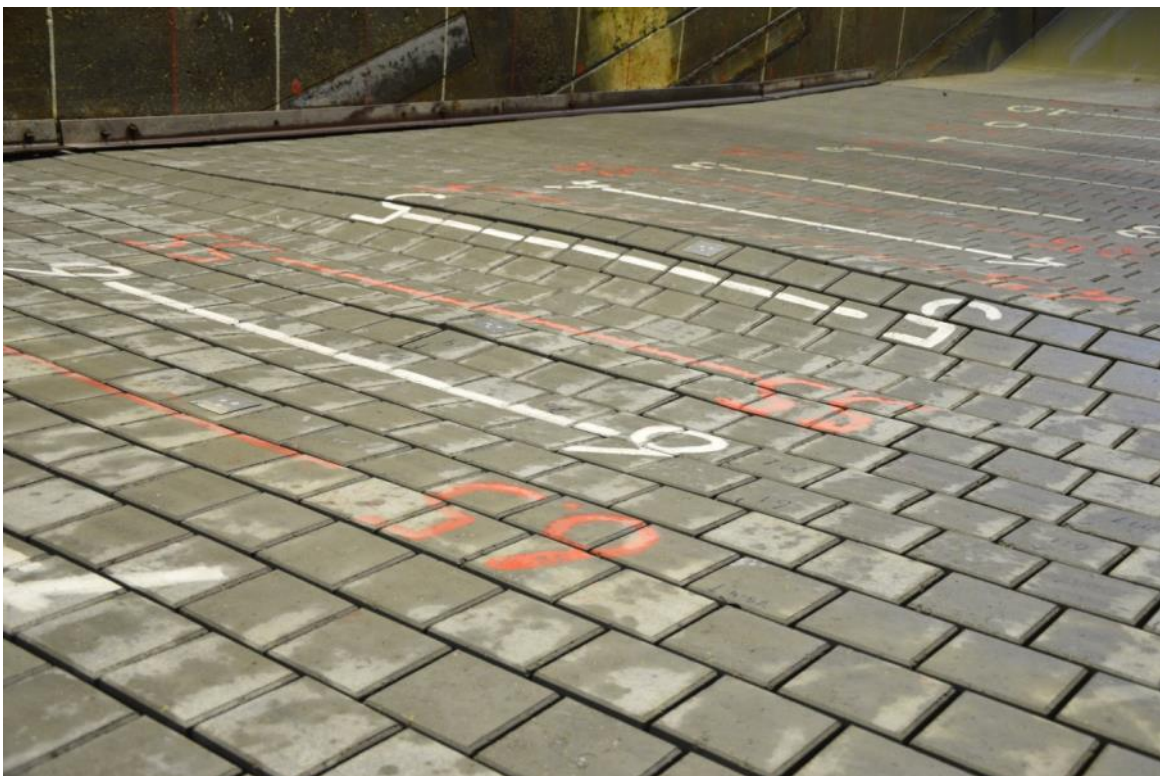
Figuur C.36 Brekende golf tijdens proef V37



Figuur C.37 Vervorming na proef V37



Figuur C.38 Vervorming na proef V39



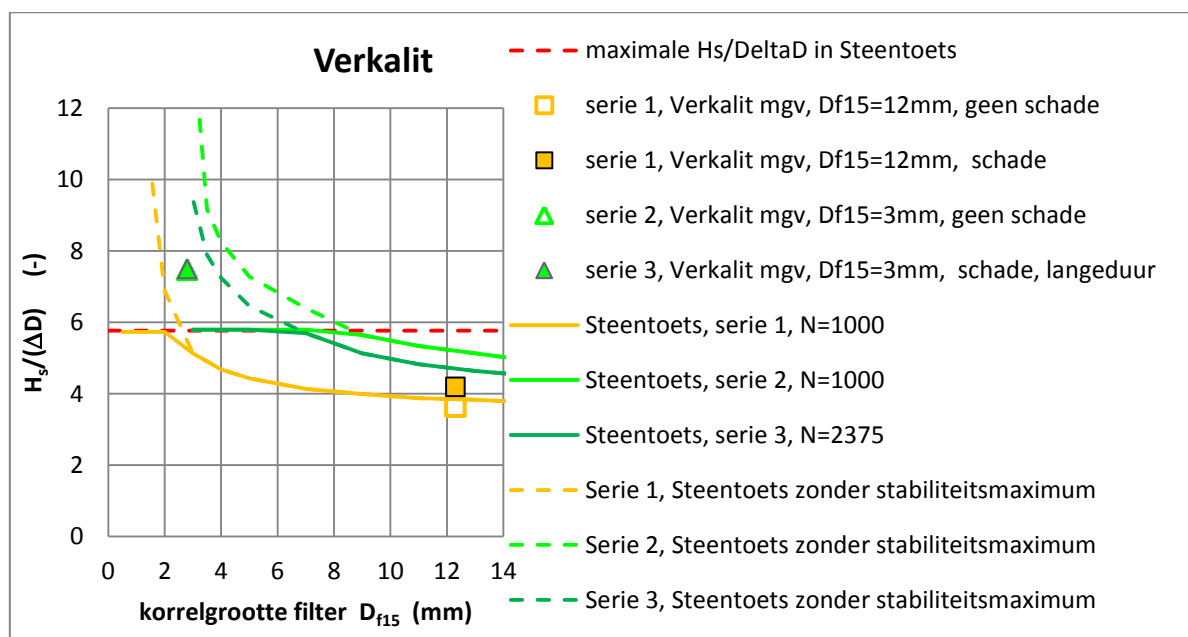
Figuur C.39 Vervorming na proef V40

D Aanpassing Steentoets

D.1 Inleiding

De stabiliteit van steenzettingen wordt in Steentoets berekend op basis van de lekentheorie. Deze theorie stelt ons in staat om het stijghoogteverschil over de toplaag van de steenzetting te berekenen. Deze theorie heeft echter zijn beperkingen. Bij een open steenzetting op een fijn filter, zoals Verkalit®, lopen we tegen deze beperkingen aan.

Een consequentie van de beperkingen is te zien in Figuur D.1, waarin de toelaatbare $H_s/(\Delta D)$ als functie van de korrelgrootte in het filter is gegeven. Bij het kleiner worden van de D_{f15} wordt de stabiliteit geleidelijk groter (logisch, want de lekengte wordt kleiner), om bij $D_{f15} = 2$ à 5 mm snel naar oneindig te schieten (groene en oranje stippellijn). Dat is onrealistisch en daarom zijn er begrenzings in Steentoets aangebracht ten aanzien van de korrelgrootte van het filter, de minimale lekengte en de maximale $H_s/(\Delta D)$ op de grens van stabiel en instabiel (de rode stippellijn). De huidige begrenzings in Steentoets zijn nader toegelicht in bijlage E.



Figuur D.1 Gemeten en berekende $H_s/(\Delta D)$ bij begin van bezwijken van Verkalit®

Door de begrenzings die aangebracht zijn in Steentoets2014 is de stabiliteit van Verkalit® op een fijn filter volgens Steentoets niet afhankelijk van de eigenschappen van het filter. Dat is ongewenst, omdat de stabiliteitsfactor uit het Deltagootonderzoek dan slechts toepasbaar verklaard kan worden op een filter met één specifieke waarde van de D_{f15} , namelijk de waarde die toegepast is in het Deltagootonderzoek. Een veel grotere korrelgrootte (bijvoorbeeld 6 mm in Figuur D.1 met de donkergroene lijn) geeft volgens Steentoets2014 geen verandering van de stabiliteit, terwijl in werkelijkheid de stabiliteit waarschijnlijk wel kleiner is. Het toepassen van de stabiliteitsfactor, die afgeleid is bij $D_{f15} = 3$ mm, op een filter met $D_{f15} = 6$ mm zal dan een overschatting van de stabiliteit opleveren.

Het beperken van de toepasbaarheid van de stabiliteitsfactor op één korrelgrootte kan te gemakkelijk in de praktijk tot fouten gaan leiden.

Om dit probleem op te lossen is Steentoets aangepast zodat het beter in staat is om de stabiliteit van open steenzettingen op een fijn filter te berekenen. Zodra de leklengtetheorie onrealistische resultaten gaat geven, wordt overgestapt op een empirische relatie voor de stabiliteit die gebaseerd is op enkele Deltagootproeven.

In de volgende paragraaf wordt eerst de grens van de toepasbaarheid van leklengtetheorie geïnterpreteerd, zodat de empirische relatie optimaal aangesloten kan worden om een discontinuïteit bij de overgang van de leklengtetheorie naar de empirische relatie te voorkomen. Daarna wordt aandacht besteed aan het juiste verloop van de empirische relatie als functie van de korrelgrootte van het filter.

D.2 Grens voor de toepasbaarheid van Steentoets2014

Steentoets is alleen toepasbaar vanaf een bepaalde korrelgrootte van het filter en daarom zijn er diverse begrenzingsaangebracht (zie bijlage E). Als de korrelgrootte te klein is, dreigt Steentoets zonder begrenzingsaangebracht de stabiliteit te overschatten. Bij erg kleine korrelgrootte wordt de stabiliteit volgens Steentoets zonder begrenzingsaangebracht zelfs bijna oneindig.

Om vast te stellen waar deze grens ligt, is onderzocht bij welke korrelgrootte van het filter de stabiliteit volgens Steentoets sterk begint toe te nemen. Daartoe zijn 15 cases met Steentoets doorgerekend met steenzettingen zoals Verkalit®, maar ook met wat afwijkende eigenschappen, zie Tabel D.1. In alle gevallen is gerekend zonder klemming.

Case	s_{op} (-)	$\tan\alpha$ (-)	D (m)	Ω (%)	b (m)	$D_{f15, \text{grens}}$ (mm)	Λ_{grens} (m)	Λ_{grens}/D (-)
1	0,02	0,33	0,15	6,5	0,07	3	0,092	0,61
2	0,02	0,33	0,15	6,5	0,10	3	0,110	0,73
3	0,04	0,33	0,15	6,5	0,10	2,7	0,104	0,69
4	0,04	0,33	0,40	6,5	0,10	6	0,210	0,53
5	0,03	0,33	0,40	6,5	0,10	5	0,199	0,50
6	0,03	0,33	0,25	6,5	0,05	6	0,131	0,52
7	0,02	0,33	0,25	6,5	0,05	6	0,131	0,52
8	0,02	0,33	0,15	4,0	0,07	3	0,102	0,68
9	0,02	0,33	0,30	4,0	0,07	5	0,178	0,59
10	0,04	0,33	0,30	4,0	0,07	6	0,184	0,61
11	0,04	0,25	0,30	4,0	0,07	6	0,184	0,61
12	0,04	0,25	0,30	4,0	0,05	8,5	0,167	0,56
13	0,02	0,25	0,30	4,0	0,05	5	0,150	0,50
14	0,02	0,25	0,15	4,0	0,05	3,5	0,091	0,61
15	0,02	0,25	0,15	6,5	0,10	2,5	0,100	0,67

Tabel D.1 Eigenschappen van de doorgerekende cases en de resultaten van de analyse

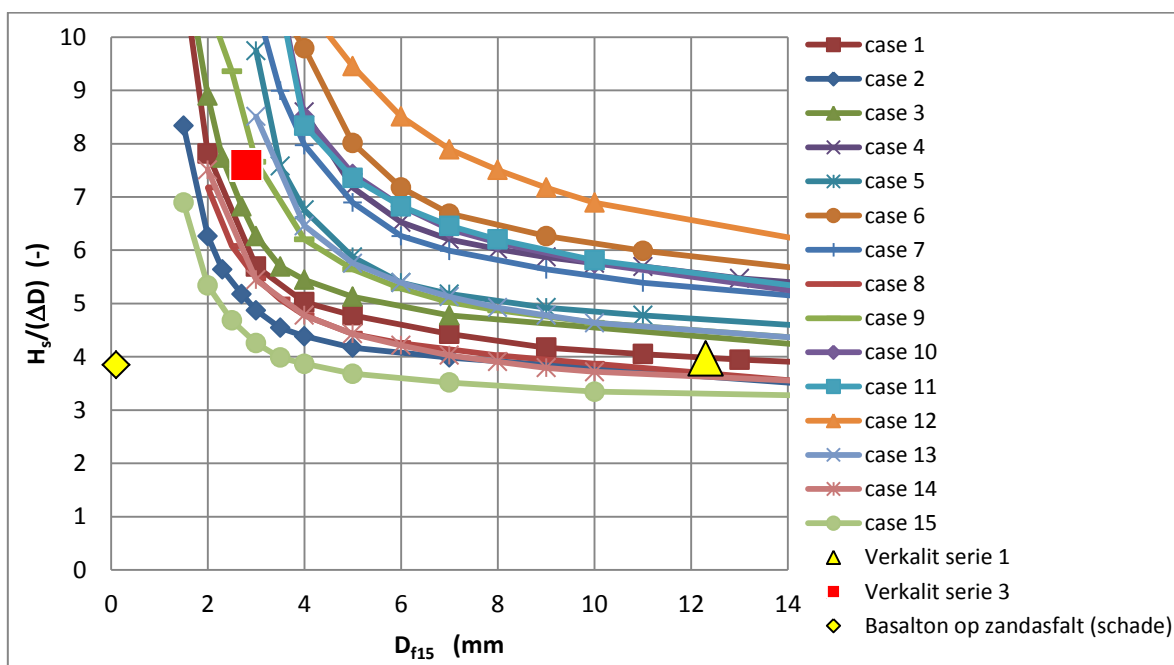
Bij elk van deze cases is de $H_s/(\Delta D)$ op de grens van bezwijken met een bijzondere versie van Steentoets berekend. In die versie is er geen beperking ten aanzien van de korrelgrootte van het filter en leklengte aanwezig en is ook de stabiliteit niet naar boven begrensd. De resultaten zijn als functie van de korrelgrootte (D_{f15}) gegeven in Figuur D.2.

In deze figuren is duidelijk te zien dat onder een bepaalde korrelgrootte de stabiliteit snel toeneemt bij verder afnemende korrelgrootte. Zodra de stabiliteit volgens Steentoets te snel

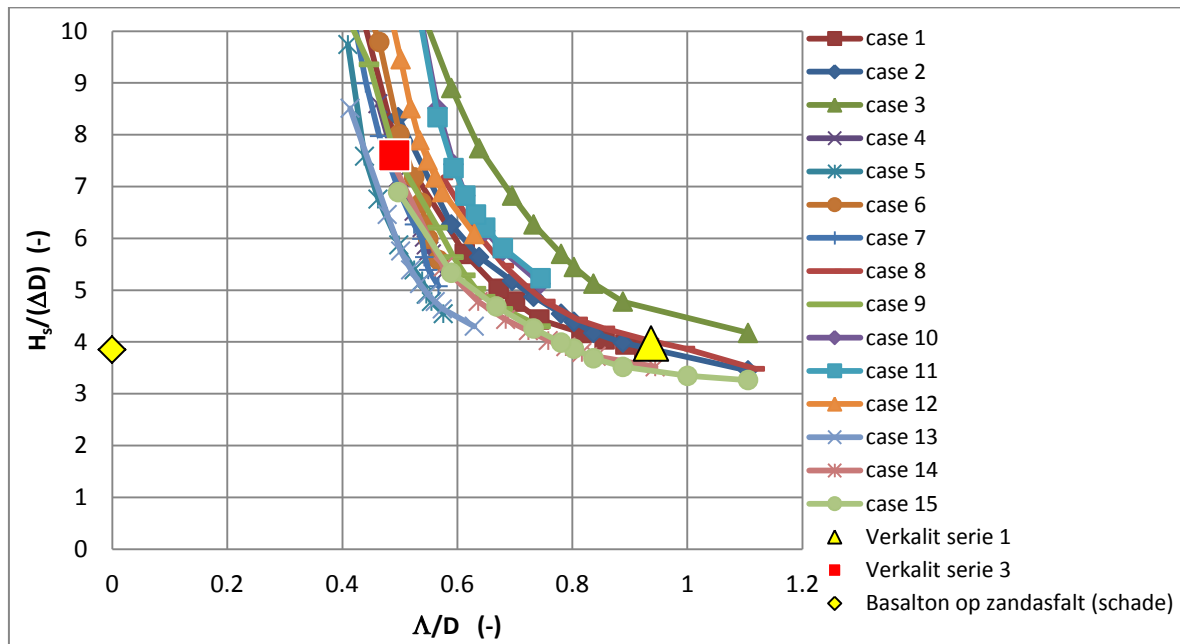
toeneemt, gaan we ervan uit dat de leklingtetheorie, die ten grondslag ligt aan Steentoets, niet meer nauwkeurig is of niet geldig is. Een indruk van de korrelgrootte vanaf waar de stabiliteit volgens Steentoets nog wel goed lijkt te zijn, is weergegeven in Tabel D.1. Afhankelijk van de geometrie van de steenzetting varieert dit tussen 2,5 mm en 8,5 mm. Dit is niet meer dan een indruk, omdat er geen scherp criterium beschikbaar is.

In de tabel is ook de leklingte gegeven bij de grens van de toepasbaarheid van Steentoets. Als deze leklingte dimensieloos gemaakt wordt met de toplaagdikte, blijkt de variatie ervan vrij beperkt te zijn. Deze dimensieloze leklingte op de grens, Λ_{grens}/D , is in de laatste kolom van Tabel D.1 gegeven. Deze dimensieloze leklingte lijkt dus geschikt te zijn om te gebruiken als grens tot waar Steentoets met de leklingtetheorie bruikbaar is. In Figuur D.3 is de stabiliteit als functie van Λ/D gegeven. In deze figuur valt op dat de lijnen nu veel dichter bij elkaar liggen.

Zodra Steentoets met de leklingtetheorie niet meer geldig is, moet er overgestapt worden naar iets anders. Omdat er geen andere theorie voorhanden is, wordt er voor gekozen om een empirische relatie te gebruiken. Voor deze empirische relatie zijn enkele proefresultaten uit de Deltagoot beschikbaar, namelijk met Verkalit® en met Basalton op zandasfalt. Dat wordt verder uitgewerkt in het volgende hoofdstuk. Voor de empirische relatie wordt in de buurt van de grens van de toepasbaarheid van de leklingtetheorie gebruikgemaakt van de Λ/D , omdat daarmee een zo goed mogelijke aansluiting van het stabiliteitsverloop wordt verkregen. Deze aansluiting moet zodanig zijn dat er geen discontinuïteit ontstaat bij de overstap van de leklingtetheorie naar de empirische relatie.



Figuur D.2 Stabiliteit volgens Steentoets (zonder grenzen ten aanzien van de korrelgrootte of stabiliteit) als functie van de korrelgrootte van het filter voor de 15 cases en ter oriëntatie enkele meetpunten uit de Deltagoot (Verkalit®: halverwege het meetpunt met bezwijken en zonder bezwijken)



Figuur D.3 Stabiliteit volgens Steentoets (zonder grenzen ten aanzien van de korrelgrootte of stabiliteit) als functie van de dimensieloze leklengte voor de 15 cases en ter oriëntatie enkele meetpunten uit de Deltagoot (Verkalit®: halverwege het meetpunt met bezwijken en zonder bezwijken)

D.3 Aanpassing Steentoets

Steentoets kan op allerlei manieren aangepast worden om te bereiken dat de berekende stabiliteit bij kleine korrelgrootte niet te groot wordt. In de huidige Steentoets2014 is dit gerealiseerd met drie criteria, zoals te zien is in bijlage E.

Deze 3 begrenzingsen worden voor Verkalit® vervangen door een andere. De formule voor de nieuwe begrenzing is gebaseerd op de beschikbare metingen in de Deltagoot:

- Deltagootonderzoek met Verkalit® mgv (Kaste, 2015)
- Basalton op zandasfalt (Klein Breteler, 2000)

Eind negentiger jaren is Basalton op zandasfalt beproefd in de Deltagoot, zonder granulair filter tussen de Basalton en het zandasfalt. De proeven zijn uitgevoerd met een talud van 1:3,5 en een berm op de waterlijn. In dit verband wordt het zandasfalt geschematiseerd tot een zeer fijn filter met korrelgrootte van bijna nul. Er is toen begin van schade geconstateerd bij $H_s/(\Delta D) = 3,85$ met $\xi_{op} = 1,33$.

De aanpassing van Steentoets heeft een zuiver empirisch karakter. Het is echter wel belangrijk dat het verloop van de stabiliteit als functie van de leklengte logisch is en goed aansluit op de range waarbinnen de leklengtetheorie wel toepasbaar is. Door gebruik te maken van de dimensieloze leklengte kan goed aangesloten worden op de resultaten van Steentoets bij grotere korrelgroottes.

De stabiliteit is tot op heden in Steentoets2014 op de volgende wijze begrensd (zie ook bijlage E):

$$\left\{ \frac{H_s}{\Delta D} \right\}_{\max} = 7 \left(\min(\xi_{op}; 2) \right)^{-1/3} + \max \left(0, 5 \cdot \left(\min(\xi_{op}; 5) - 2 \right); 0 \right) \frac{f_{duur}}{f_{\beta}} \quad (D.1)$$

Met:

H_s	= significante golfhoogte bij de teen van de dijk (m)
Δ	= $(\rho_z - \rho)/\rho$ = relatieve soortelijke massa van de zetstenen (-)
D	= toplaagdikte (m)
ξ_{op}	= $\tan\alpha/\sqrt{s_{op}}$ = brekerparameter (-)
s_{op}	= $H_s/(gT_p^2/(2\pi))$ = golfsteilheid (-)
α	= taludhelling ($^\circ$)
ρ_z	= soortelijke massa van de zetstenen (kg/m^3)
ρ	= soortelijke massa van water (kg/m^3)
f_{duur}	= invloedsfactor voor de belastingduur (-)
f_β	= invloedsfactor voor scheve golfaanval (-)

De beschikbare metingen in de Deltagoot met Verkalit[®] mgv en Basalton op zandasfalt zijn zodanig dat de stabiliteit bij $\Delta/D \approx 0,45$ (meetpunten met Verkalit[®] mgv) 30% hoger ligt dan volgens formule (D.1). Bij een zeer kleine korrelgrootte in het filter (meetpunt van Basalton op zandasfalt) ligt de stabiliteit juist 40% lager. De Basalton op zandasfalt wordt daarbij verondersteld vergelijkbaar te zijn met een steenzetting op een zeer fijn filter.

Om het stabiliteitsverloop hierop aan te sluiten, is formule (D.1) aangevuld met een term als functie van de dimensieloze lek lengte. Daarmee kan de begrenzing wat hoger gelegd worden in de buurt van de meetpunten met Verkalit[®] en wat lager gelegd worden bij extreem kleine waarden van Δ/D . De begrenzing van de stabiliteit wordt aangevuld met de factor $C_{fijnfilter}$ en wordt daardoor:

$$\left\{ \frac{H_s}{\Delta D} \right\}_{\max} = \left(7 \left(\min(\xi_{op}; 2) \right)^{-1/3} + \max \left(0,5 \cdot \left(\min(\xi_{op}; 5) - 2 \right); 0 \right) \right) \frac{f_{duur}}{f_\beta} C_{fijnfilter} \quad (D.2)$$

$$C_{fijnfilter} = 2,1 \cdot \left(\frac{\Lambda}{D} - 0,23 \right) \cdot e^{-32 \cdot (\Lambda/D - 0,16)^4} + 1 \quad (D.3)$$

Met:

Λ	= $\sqrt{(bDk/k')} =$ lek lengte (m)
$C_{fijnfilter}$	= invloedsfactor in verband met kleine korrelgrootte van het filter (-)
b	= dikte van de filterlaag (m)
k	= doorlatendheid van het filter (m/s)
k'	= doorlatendheid van de toplaag (m/s)

De formule voor $C_{fijnfilter}$ is weergegeven in Figuur D.4. Deze formule is zo gekozen om een vloeiend verloop te krijgen van de stabiliteit. Er zijn twee meetpunten waar het verloop aan geijkt is, namelijk Verkalit[®] mgv bij $\Delta/D \approx 0,45$ en Basalton op zandasfalt. Bij de eerstgenoemde moet de stabiliteit ongeveer 30% omhoog en bij de laatstgenoemde ongeveer 40% omlaag. Dit wordt bereikt met deze functie terwijl het verloop vloeiend is, zie Figuur D.4.

Deze extra factor $C_{fijnfilter}$ in de formule voor de begrenzing van de stabiliteit geeft een uitstekende aansluiting op de stabiliteitsberekeningen voor steenzettingen met filter met normale korrelgrootte (rechter deel van Figuur D.4).

Helaas blijkt echter Λ/D niet voldoende klein te worden als de korrelgrootte van het filter naar nul gaat. De lek lengte geeft bij zo'n kleine korrelgrootte geen goede weergave van de eigenschappen van de steenzetting en is voor Basalton op zandasfalt onbepaald. Daarom is het nodig gebleken om ook de D_{f15} in de formule voor $C_{fijnfilter}$ op te nemen. Dat is met name nodig om de juiste resultaten te krijgen in de range van $0 < \Delta/D < 0,3$ (linker deel van Figuur D.4).

Daarom is de volgende formules voor $C_{fijnfilter}$ toegevoegd:

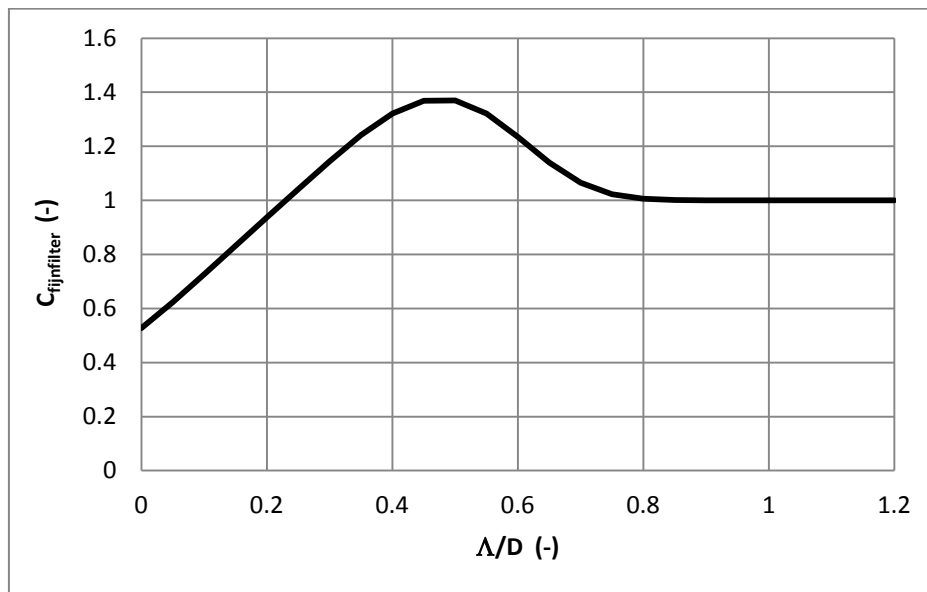
$$L_D = \frac{\Lambda}{D} \cdot \max\left(0; \min(0,6 + \log(1000D_{f15}); 1)\right) \quad (D.4)$$

$$C_{fijnfilter} = 2.1 \cdot (L_D - 0.23) \cdot e^{-32(L_D - 0.16)^4} + 1 \quad (D.5)$$

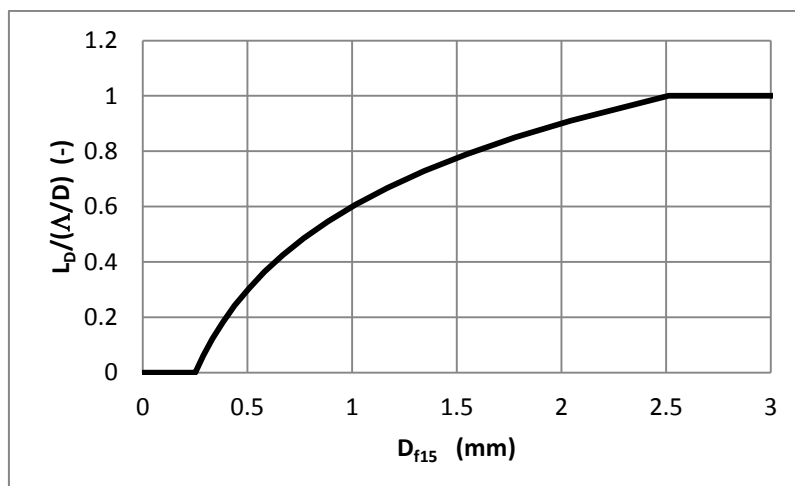
Met:

D_{f15} = karakteristieke korrelgrootte van het filter (m)

L_D = dimensieloos een factor (-)



Figuur D.4 Extra factor in verband met een fijn filter voor de begrenzing van de stabiliteit (maximale waarde van $H_s/(\Delta D)$)

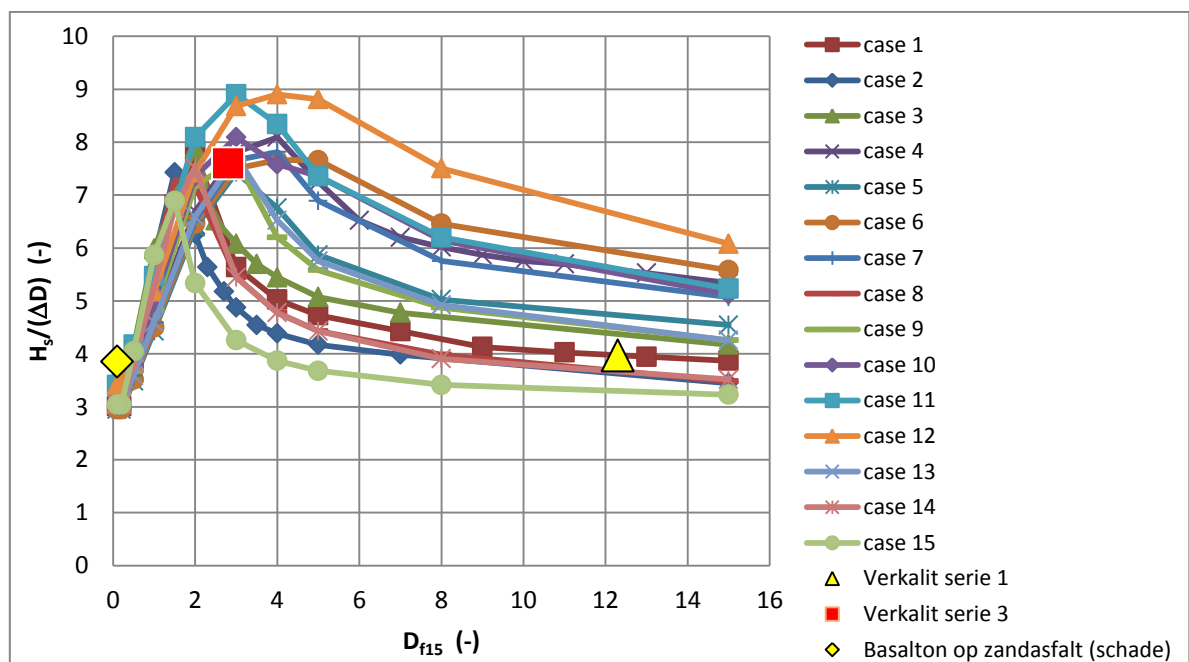


Figuur D.5 Invloedsfactor als functie van de korrelgrootte van het filter

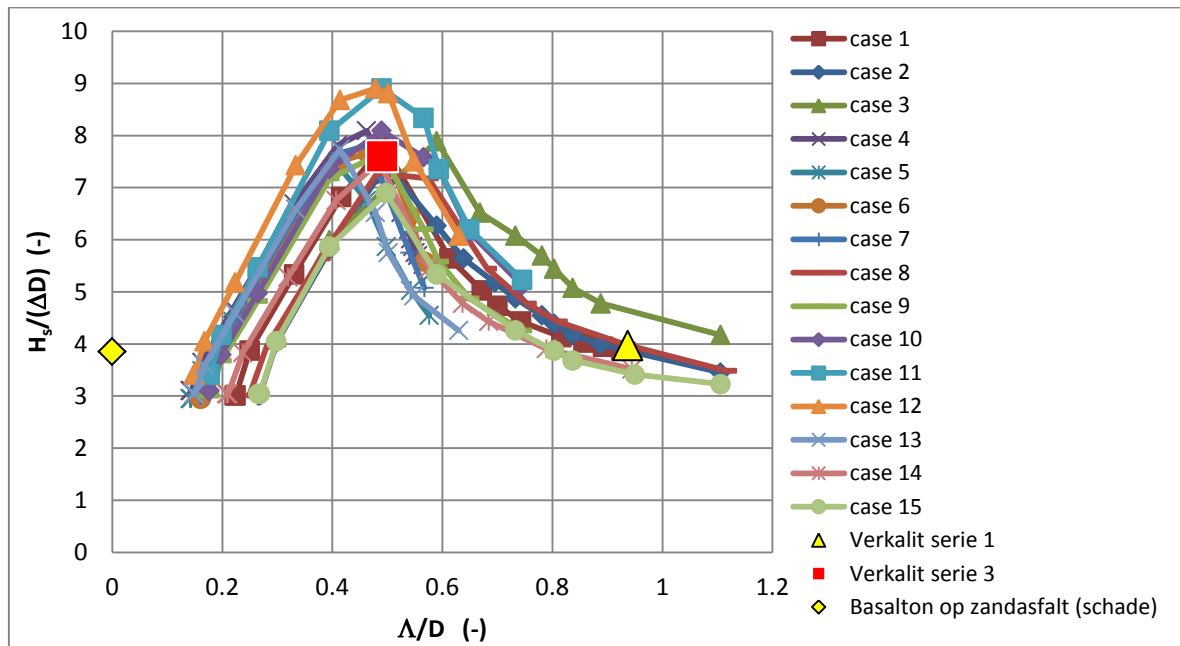
De formule voor L_D is weergegeven in Figuur D.5. Met deze aanvulling is het doel bereikt: er is nog steeds een goede aansluiting op de normale steenzettingen (leklengtetheorie), er is ten opzichte van de huidige Steentoets2014 een 30% hogere stabiliteit voor Verkalit® en er is een 40% lagere stabiliteit bij een extreem kleine korrelgroottes (Basalton op zandafalt).

De formules (D.2), (D.4) en (D.5) zijn verwerkt in een speciale versie van Steentoets: Steentoets-V. De resultaten van de berekeningen voor de 15 cases met deze versie zijn gegeven in Figuur D.6 en Figuur D.7. Inmiddels zijn Steentoets2014 en Steentoets-V samengevoegd in Steentoets2015.

Door deze figuren te vergelijken met Figuur D.2 en Figuur D.3 valt duidelijk op dat in het rechter deel van de grafiek er vrijwel geen verandering is (normale korrelgrootte van het filter), maar dat in het linker deel de stabiliteit niet meer naar oneindig gaat. In het linker deel, waar de fijne en zeer fijne filters te vinden zijn, sluiten de stabiliteitslijnen aan op het meetpunt met Basalton op zandafalt. Aan de linkerzijde in Figuur D.7 stoppen de lijnen bij $\Delta/D \approx 0,2$ omdat bij een hele kleine korrelgrootte van het filter de leklengte niet meer afhankelijk is van de korrelgrootte en in feite dus de eigenschappen van de steenzetting niet meer goed weergeeft. Door de extra term als functie van D_{f15} op te nemen wordt toch de juiste stabiliteit berekend, zoals te zien is in Figuur D.6.



Figuur D.6 Stabiliteit volgens Steentoets-V, waarin formule (D.2), (D.4) en (D.5) zijn toegevoegd, als functie van de korrelgrootte voor de 15 cases en ter oriëntatie enkele meetpunten uit de Deltagoot (Verkalit®: halverwege het meetpunt met bezwijken en zonder bezwijken)



Figuur D.7 Stabiliteit volgens Steentoets, waarin formule (D.2), (D.4) en (D.5) zijn toegevoegd, als functie van de dimensieloze leklengte voor de 15 cases en ter oriëntatie enkele meetpunten uit de Deltagoot (Verkalit®: halverwege het meetpunt met bezwijken en zonder bezwijken)

D.4 Vergelijking nieuwe Steentoets-V met Deltagootmetingen met Verkalit®

In de Deltagoot zijn in het kader van het project "Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken" vier proevenseries uitgevoerd met 'Verkalit® mgv' (Kaste, 2015) en drie proevenserie met 'Verkalit® GOR'. Bij serie 1 was het filter normaal (korrelgrootte $D_{f15} = 12,3$ mm en laagdikte van 7 cm) en bij de andere series was de korrelgrootte van het filter klein: $D_{f15} = 2,7$ à $2,9$ mm en laagdikte van $b = 4,9$ à $5,1$ cm. Het open oppervlak van Verkalit® is 6,5%. De zetting is niet ingewassen, want het is een interlock-systeem.

Het uitgevoerde proevenprogramma en de resulterende waarde van $H_s/(\Delta D)$ waarbij begin van bezwijken optrad (halverwege het meetpunt waarbij nog geen bezwijken optrad (cat. a of b) en het meetpunt met schade van de categorie c of d) is samengevat in Tabel D.2.

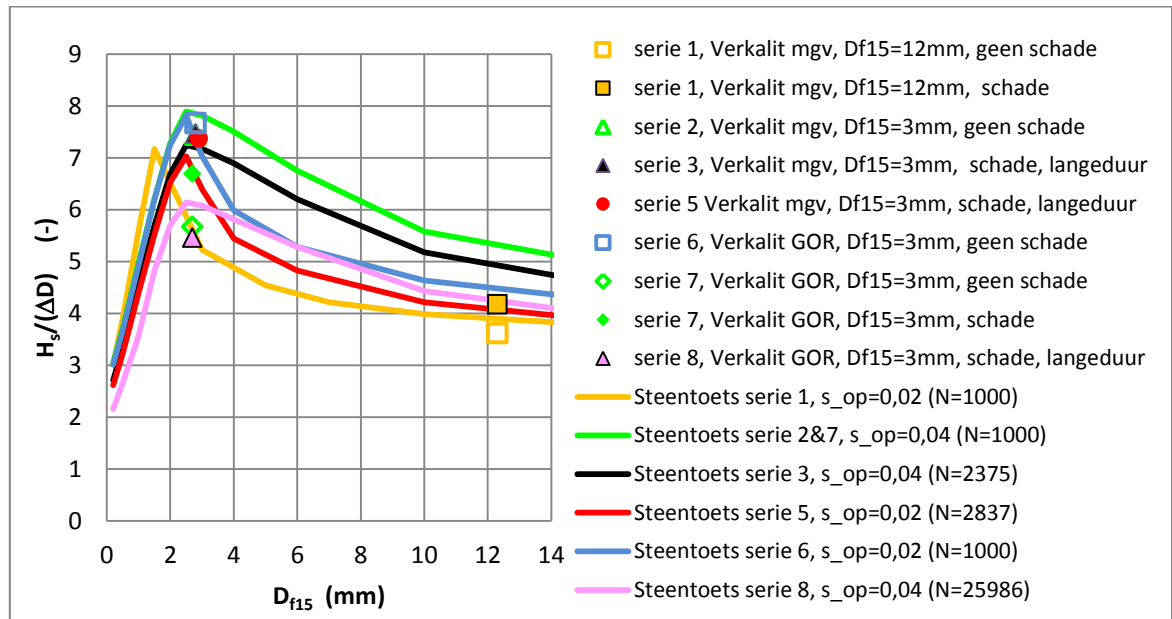
type	serie	proef	D_{f15} (mm)	b (m)	D (m)	S_{om}	N langeduur	$H_s/\Delta D$ bij s/gs
Verkalit® mgv	1	P01+P02	12,3	0,070	0,152	0,024		3,91
Verkalit® mgv	2	P09+fictief	2,8	0,049	0,152	0,042		8,03
Verkalit® mgv	3	P9+P10	2,8	0,049	0,152	0,042	2375	7,50
Verkalit® mgv	5	P22+P23	2,9	0,049	0,152	0,024	2837	7,40
Verkalit® GOR	6	P29+fictief	2,8	0,050	0,151	0,024		8,24
Verkalit® GOR	7	V33+V34	2,7	0,051	0,151	0,044		6,18
Verkalit® GOR	8	V37-V40	2,7	0,050	0,151	0,045	25986	5,46

Tabel D.2 Proevenprogramma Verkalit® (D_{f15} = korrelgrootte filter; b = filterlaagdikte; $S_{om} = H_s/(1,56T_{m-1,0}^2)$; $H_s/\Delta D$ bij s/gs = stabiliteit op de grens van wel/niet bezwijken).

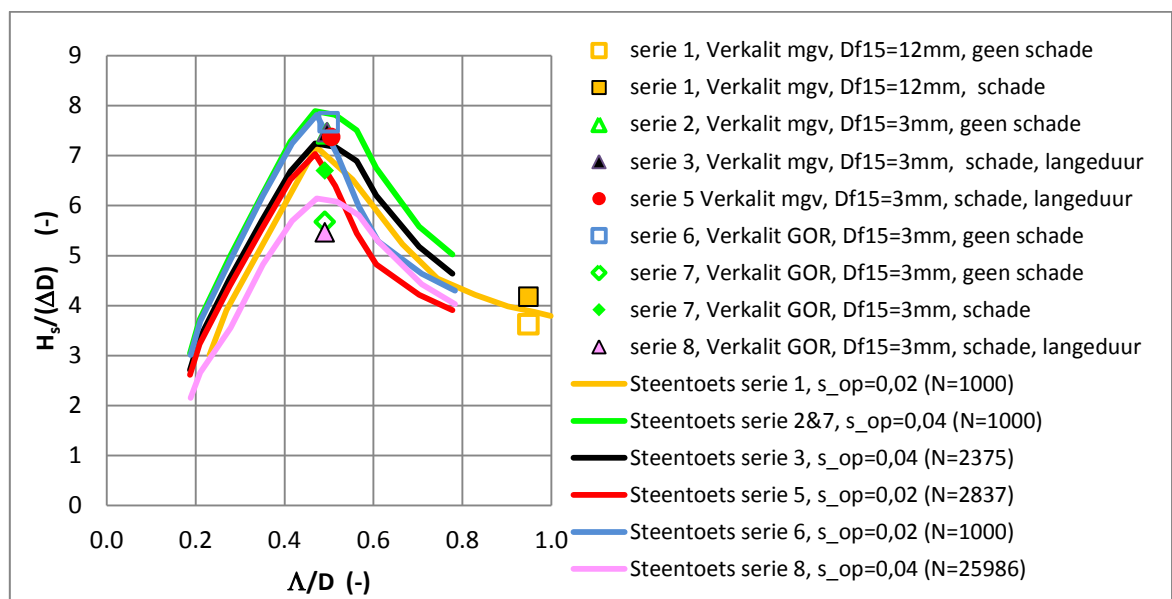
De resultaten van de belangrijkste proeven (hoogste golfcondities waarbij de steenzetting niet bezweek en laagste golfcondities waarbij bezwijken wel optrad) zijn Figuur D.8 en Figuur D.9

gegeven, samen met de rekenresultaten van de aangepaste Steentoets (met formule (D.2), (D.4) en (D.5)). Voor Veralit® moet er gerekend worden met Steentoets-V zonder klemming.

In de figuren zijn de proefresultaten waarbij nog geen bezwijken optrad met open symbolen weergegeven en die met bezwijken met dichte symbolen. Steeds horen de meetpunten en lijnen met dezelfde kleur bij elkaar.



Figuur D.8 Gemeten stabiliteit van Veralit® in de Deltagoot en rekenresultaten met Steentoets-V als functie van de korrelgrootte van het filter (met $f_b = 0,68$)



Figuur D.9 Gemeten stabiliteit van Veralit® in de Deltagoot en rekenresultaten met Steentoets-V als functie van de dimensieloze lek lengte (met $f_b = 0,68$)

Het valt op dat voor Veralit® mgv alle punten met bezwijken boven de Steentoets-lijnen liggen. Voor Veralit® GOR geldt dat alleen voor serie 6. De Steentoetsberekeningen met

Verkalit® GOR zijn uitgevoerd alsof er geen kanalen aanwezig zijn (dus gerekend met Δ van het toegepaste beton en D gelijk aan de totale hoogte van de blokken). In de praktijk wordt aanbevolen om op deze manier te rekenen, zoals dat ook gebruikelijk is bij het ontwerpen en toetsen van Hillblocks. In werkelijkheid zorgen de kanalen (en andere kleinere vormverschillen) ervoor dat de toplaag 13% lichter is, wat een verklaring kan zijn voor de wat lagere stabiliteit tijdens de proeven.

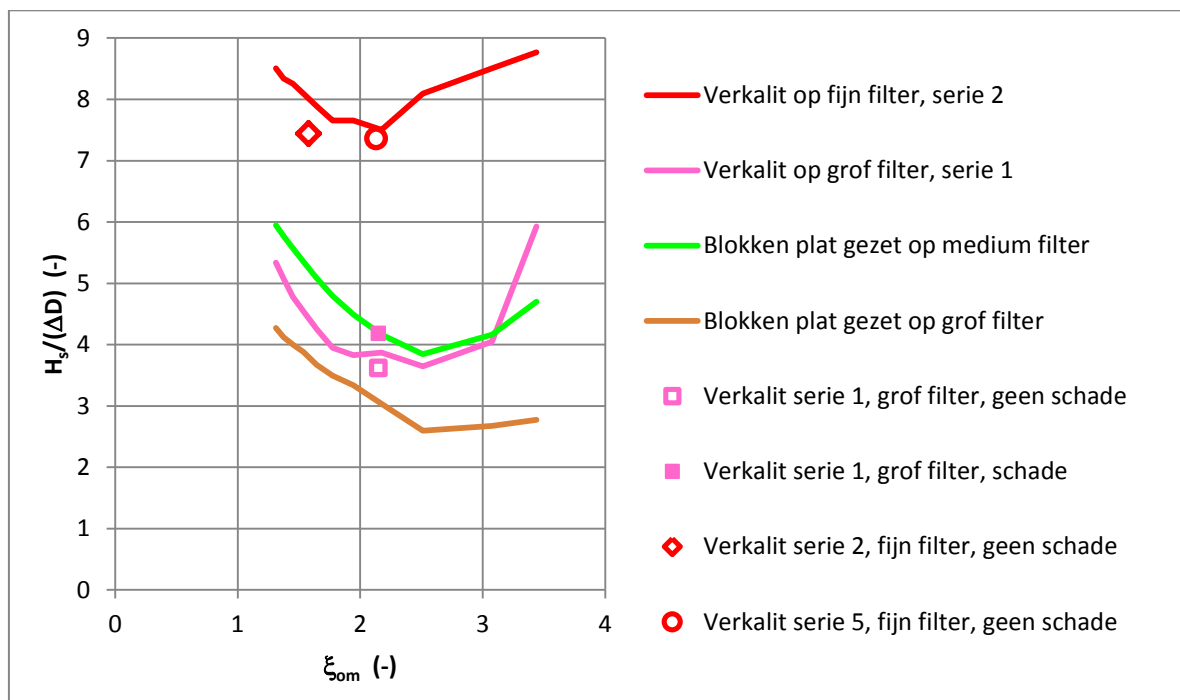
In Figuur D.10 is de stabiliteit van Verkalit® gegeven volgens de hier aangepaste Steentoets-V (met stabiliteitsfactor gelijk aan 1) in een grafiek met ξ_{om} op de horizontale as, samen met enkele meetpunten uit de Deltagoot. Er is gerekend met Verkalit® op Deltagootschaal en met het in de Deltagoot toegepaste filter.

Ter vergelijking zijn hier ook lijnen ingetekend voor plat gezette rechthoekige blokken (van 50x50x30 cm³) die berekend zijn met de normale Steentoets2014 (v14.1.2.1). Er is een spleetbreedte van 2 mm aangenomen.

In deze berekeningen is gewerkt met de volgende filterlagen:

- Fijn filter: $D_{f15} = 2,8$ mm en laagdikte $b = 4,9$ cm (zoals Verkalit® serie 2 in de Deltagoot)
- Medium filter: $D_{f15} = 6$ mm en laagdikte $b = 5$ cm
- Grof filter: $D_{f15} = 12,3$ mm en laagdikte $b = 7$ cm (zoals Verkalit® serie 1 in de Deltagoot)

De steenzetting met rechthoekige blokken heeft een lagere stabiliteit dan Verkalit® omdat het open oppervlak kleiner is en dus de leklengte groter is.

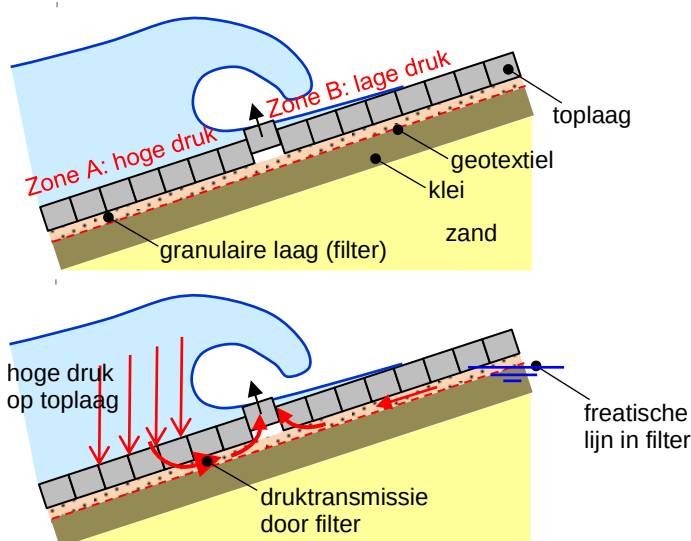


Figuur D.10 Stabiliteit volgens de normale Steentoets voor plat gezette blokken en blokken op hun kant en volgens de hier aangepaste Steentoets-V voor Verkalit® ($f_b = 0,5$)

E Begrenzungen in Steentoets2014

E.1 Leklengtetheorie

Brekende golven op een talusbekleding van gezette steen geven een zware belasting, vooral net onder de waterlijn. Op het moment waarop de golf zich maximaal heeft teruggetrokken (golfneerloop) is er sprake van een muur van water op het talud, zie Figuur E.1, met in zone A een hoge druk op het talud en in zone B een lage druk.

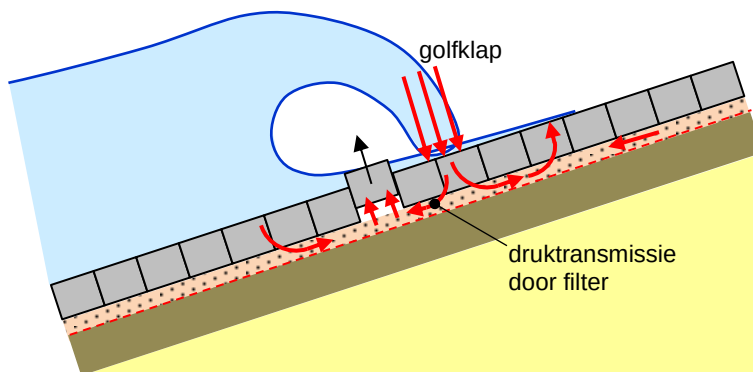


Figuur E.1 Golfneerloop leidt tot drukverschil over toplaag

De hoge druk op het talud wordt doorgegeven aan de granulaire laag (filter) onder de toplaag en komt ook onder de toplaag in zone A. Tegelijkertijd is er sprake van een verhoogde freatische lijn in het filter vanwaar water door het filter naar beneden en naar buiten stroomt. Waar zone A op zone B aansluiten, ontstaat er daardoor een opwaarts drukverschil over de toplaag die de neiging heeft om zetstenen uit de bekleding te drukken. Deze situatie houdt in elke golf ca. 0,2 à 0,7 s aan en dat kan voldoende zijn om de zetstenen stukje bij beetje uit de toplaag te drukken, of ineens helemaal tijdens een grote golf.

Dit mechanisme is maatgevend voor steenzettingen met een relatief kleine doorlatendheid van de toplaag en grote doorlatendheid van het filter, zoals rechthoekige betonblokken met smalle spleten. Moderne steenzettingen hebben een zodanig grote doorlatendheid dat het moment van de golfklap maatgevend wordt. Dat is getekend in Figuur E.2.

De golfklap geeft een kortdurende (ca. 0,1 à 0,3 s) zeer hoge druk op het talud. Deze hoge druk is slechts in een smalle strook op het talud aanwezig en wordt via het filter doorgegeven aan de zones ernaast, waar een opwaarts drukverschil ontstaat. Daar kunnen zetstenen uit de bekleding gedrukt worden. Het principe van deze belasting is verder hetzelfde als die tijdens de golfneerloop.



Figuur E.2 Druktransmissie vanaf golflap door het filter, leidend tot een opwaarts stijghoogteverschil

De mate waarin bovenstaande processen leiden tot een drukverschil over de toplaag is afhankelijk van de lek lengte van de steenzetting. De lek lengte is onder andere afhankelijk van de verhouding van de doorlatendheid van het filter en de toplaag. Als het filter relatief doorlatend is en de toplaag is relatief ondoorlatend, dan is de lek lengte groot. Een grote lek lengte is ongunstig voor de steenzetting, want dan wordt bij dezelfde golfcondities het drukverschil over de toplaag groot.

Een goed ontworpen steenzetting heeft een lage doorlatendheid van het filter, waardoor de druktransmissie wordt verminderd, en een hoge doorlatendheid van de toplaag. Dat laatste zorgt ervoor dat de verhoogde druk onder de toplaag gemakkelijk weg kan vloeien.

De lek lengte, die bepalend is voor de grootte van de stijghoogteverschillen, is als volgt gedefinieerd:

$$\Lambda = \sqrt{\frac{Dbk}{k'}} \quad (E.1)$$

Met:

- Λ = lek lengte van de steenzetting (m)
- D = dikte van de gezette stenen (m)
- b = dikte van de filterlaag (m)
- k = gelineariseerde doorlatendheid van het filter (m/s)
- k' = gelineariseerde doorlatendheid van de gezette stenen (m/s)

E.2 Begrenzing bij kleine lek lengte

De lek lengtetheorie is niet geldig als de lek lengte te klein wordt. Volgens Steentoets zou de stabiliteit dan naar oneindig gaan, terwijl dat niet realistisch is.

Om te voorkomen dat een onrealistische stabiliteit wordt berekend bij bijvoorbeeld een heel kleine korrelgrootte van het filter, zijn er enkele begrenzings in Steentoets2014 aangebracht. Deze zijn:

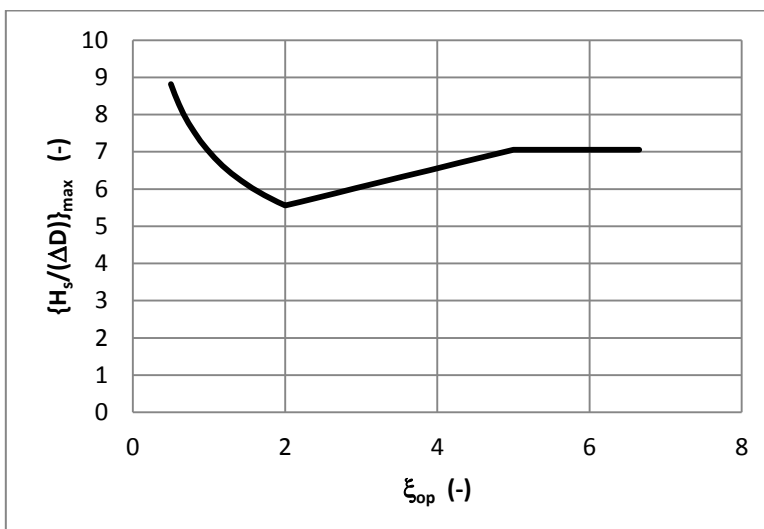
- als de korrelgrootte van het filter $D_{f15} < 3$ mm, dan wordt er gerekend met $D_{f15} = 3$ mm.
- als de lek lengte $\Lambda < D/2$, dan wordt er gerekend met $\Lambda = D/2$ (bij Verkalit[®] lopen we tegen deze grens als $D_{f15} < 2,8$ mm).
- de berekende $H_s/(\Delta D)$ op de grens van stabiel en instabiel is maximaal als volgt (beperking van de berekende stabiliteit):

$$\left\{ \frac{H_s}{\Delta D} \right\}_{\max} = \left(7 \left(\min(\xi_{op}; 2) \right)^{-1/3} + \max \left(0, 5 \cdot \left(\min(\xi_{op}; 5) - 2 \right); 0 \right) \right) \frac{f_{duur}}{f_{\beta}} \quad (E.2)$$

Met:

- H_s = significante golfhoogte bij de teen van de dijk (m)
 Δ = $(\rho_z - \rho)/\rho$ = relatieve soortelijke massa van de zetstenen (-)
 D = toplaagdikte (m)
 ξ_{op} = $\tan \alpha / \sqrt{s_{op}}$ = brekerparameter (-)
 s_{op} = $H_s / (g T_p^2 / (2\pi))$ = golfsteilheid (-)
 α = taludhelling ($^\circ$)
 ρ_z = soortelijke massa van de zetstenen (kg/m^3)
 ρ = soortelijke massa van water (kg/m^3)
 f_{duur} = invloedsfactor voor de belastingduur (-)
 f_{β} = invloedsfactor voor scheve golfaanval (-)

Deze formule is weergegeven in Figuur E.3 voor $f_{duur} = f_{\beta} = 1$.



Figuur E.3 Begrenzing van de stabiliteit (maximale waarde van $H_s/(\Delta D)$) volgens Steentoets2014

Deze begrenzings zijn aangepast in de versie voor Verkaliit®: Steentoets-V. Inmiddels zijn Steentoets2014 en Steentoets-V samengevoegd in Steentoets2015.

F Procedure voor bepaling stabiliteitsfactor van Verkalit®

F.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.

In deze bijlage is de door Rijkswaterstaat vastgestelde 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.

Het bezwijkmechanisme van Verkalit® is anders dan bij een geklemde steenzetting met zuilen. Bij Verkalit® is er enerzijds sprake van een grote flexibiliteit, waardoor de blokken met weinig kracht ten opzichte van elkaar geroteerd kunnen worden. De interlock zorgt er anderzijds voor dat er een grote dwarskrachten in de steenzetting opgenomen kunnen worden. Het is vrijwel onmogelijk om afzonderlijke stenen uit de zetting te lichten.

Bij een steenzetting met geklemde zuilen maken de zijvlakken over een groot deel van de hoogte contact met elkaar. Bovendien is er sprake van inwassing die het contact tussen de zuilen verder verbetert. Dat maakt dat er ook een buigend moment in de steenzetting kan worden opgenomen. Als de golven door middel van de ontstane stijghoogteverschillen de bekleding willen oplichten, dan zijn het zowel dwarskrachten als buigende momenten die dit tegenwerken.

Met Steentoets moet er met Verkalit® gerekend worden zonder klemming, omdat bij Verkalit® er geen buigend moment kan worden opgenomen als gevolg van de grote flexibiliteit. Verder geldt dat Verkalit® wordt toegepast op een bijzonder fijn filter, terwijl het een vrij open steenzetting is, waardoor een aangepaste versie van Steentoets moet worden gebruikt: Steentoets-V. De in dit rapport bepaalde stabiliteitsfactor is alleen van toepassing in combinatie met Steentoets-V.

Inmiddels zijn Steentoets2014 en Steentoets-V samengevoegd in Steentoets2015.

Gezien deze verschillen is door Rijkswaterstaat besloten om voor Verkalit® een andere methode voor het bepalen van de stabiliteitsfactor te hanteren dan voor geklemde zuilen. Deze procedure is van toepassing op Verkalit® mgv en Verkalit® GOR.

F.2 Interpretatie van de proeven in de Deltagoot

Voor elk type steenzetting worden proeven uitgevoerd in minstens 3 series:

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

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

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

Omdat elk van deze series een waardevol proefresultaat oplevert, worden alle deze resultaten meegewogen bij het bepalen van de stabiliteitsfactor. Dit wordt gerealiseerd door het gemiddelde van de series te gebruiken en daarnaast rekening te houden met de spreiding van de 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 schadecategorieën):

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

F.3 Bepaling van stabiliteitsfactor

De stabiliteitsfactor is een correctiefactor op de benodigde toplaagdikte die voor Verkalit® met Steentoets-V berekend is. Voor het bepalen van de stabiliteitsfactor is door Rijkswaterstaat een procedure vastgesteld, die specifiek van toepassing is voor Verkalit®.

In deze procedure zijn per serie proeven de volgende waarden nodig:

$D_{\text{Steentoets}}$ = de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets-V bij de bezwijkgolffhoogte van de betreffende serie, waarbij gerekend wordt zonder klemming (m)

$D_{\text{in modelproeven}}$ = de toplaagdikte die toegepast is in de Deltagoot (m)

In de berekeningen met Steentoets-V worden de tijdens het Deltagootonderzoek geconstateerde bezwijkgolffhoogtes als uitgangspunt genomen. Voor elke proevenserie wordt met Steentoets-V (met stabiliteitsfactor = 1 en zonder klemming) de toplaagdikte berekend die volgens Steentoets-V bij de geconstateerde bezwijkgolffhoogte nog net voldoende is.

De Steentoetsberekening worden uitgevoerd met de waarden zoals gemeten in het model, dus op schaal. Er wordt gerekend met de gemeten gemiddelde soortelijke massa van het beton, de gemeten karakteristieke korrelgrootte D_{f15} van het filter (D_{f15} = korrelgrootte waarvoor geldt dat 15 gewichtsprocenten bestaat uit kleinere korrels), de gemeten dikte van de filterlaag bij aanleg, de gemeten golfcondities, de gemeten taludhelling, et cetera. Voor de dikte van de steenzetting wordt de hoogte van de zetstenen aangehouden.

Vervolgens wordt de stabiliteitsfactor voor elke serie afzonderlijk bepaald met de volgende formule:

$$f_{\text{stabiliteit}} = \frac{D_{\text{Steentoets}}}{\gamma \cdot D_{\text{in modelproeven}}} \quad (\text{F.1})$$

Met:

$f_{\text{stabiliteit}}$ = stabiliteitsfactor van een bepaald type steenzetting (-)

$D_{\text{in modelproeven}}$ = benodigde toplaagdikte volgens grootschalig experimenteel onderzoek (m)

$D_{\text{Steentoets}}$ = benodigde toplaagdikte volgens Steentoets-V met $f_{\text{stabiliteit}} = 1$ (m)

γ = veiligheidsfactor (-)

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

- Drie proevenseries: $\gamma = 1,1 + 1,89 \cdot \sigma$ (F.2)

- Vier proevenseries: $\gamma = 1,1 + 1,64 \cdot \sigma$ (F.3)

Met:

σ = standaardafwijking in de proefresultaten (-)

Het gemiddelde van de stabiliteitsfactoren van de afzonderlijke proevenseries is de stabiliteitsfactor die voor het beproefde steenzettingtype wordt aangehouden als eindresultaat.

Inmiddels zijn Steentoets2014 en Steentoets-V samengevoegd in Steentoets2015.