

Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken

Samenvattend rapport



Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken

Samenvattend rapport

M. Klein Breteler

1208618-006

Titel

Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat WVL Holcim Coastal BV Hillblock BV Altena Infra-materialen BV LBN Betonproducten BV / Berding Beton GmbH	1208618-006	1208618-006-HYE-0022	63

Trefwoorden

Steenzettingen, dijkbekleding, stabiliteitsfactor, golfoploop, golfoverslag

Samenvatting

In het kader van het “Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken” is door Deltares voor Rijkswaterstaat, drie noordelijke waterschappen (in Project Overstijgende Verkenning van HWBP: POV-Waddenzeedijken) en enkele marktpartijen onderzocht of zetstenen slimmer ingezet kunnen worden bij dijkversterkingen. Doordat de thans leverbare typen zetstenen verschillen in vorm, hebben ze ieder specifieke kwaliteiten. Ze zijn bijvoorbeeld extra stabiel of remmen de golfoploop goed. Dit onderzoek is uitgevoerd omdat er nog te weinig kennis was over hun unieke eigenschappen om de stenen optimaal te benutten en te vergelijken.

Het onderzoek richtte zich op twee eigenschappen van zetstenen: de stabiliteit bij hoge golven en de golfoploopremming (reductie golfoverslag). Deltares heeft deze kenmerken met behulp van proeven in de Scheldegoot en de Deltagoot onderzocht. De zetstenen zijn hiervoor op schaal getest.

In dit onderzoek is het volgende bepaald op basis van experimenteel onderzoek:

- de stabiliteitsfactor voor de volgende typen steenzettingen:
 - Basalton en Basalton+ van Holcim Coastal BV
 - Hillblock[®] en Testblokken van Hillblock BV
 - RONA[®] ton en RONA[®] Taille van Altena Infra-materialen BV
 - Veralit[®] mgv, Veralit[®] GOR en C-Star van LBN Betonproducten BV / Berding Beton GmbH
- de ruwheidscoëfficiënt ten aanzien van de golfoploopremmende werking van 3 typen steenzettingen:
 - Hillblock[®] van Hillblock BV
 - RONA[®] Taille van Altena Infra-materialen BV
 - Veralit[®] GOR van LBN Betonproducten BV / Berding Beton GmbH
- de ruwheidscoëfficiënt ten aanzien van de golfoverslagreducerende werking van steenzettingen die geplaatst zijn in een dambordpatroon of ribbenpatroon

De stabiliteitsfactor gaat in het kader van dit project opgenomen worden in het rekenmodel Steentoets, waarmee steenzettingen getoetst en ontworpen worden. De introductie van de stabiliteitsfactor daarin zorgt ervoor dat de specifieke stabiliteit van elk type steenzetting goed wordt weergegeven door het rekenmodel, rekening houdend met een veiligheidsmarge. Het zorgt ervoor dat de steenzettingen die een hoge stabiliteit hebben volgens de proeven in de Deltagoot met een kleinere dikte kunnen worden ontworpen dan de steenzettingen met een lage stabiliteit.

Titel

Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat WVL

Holcim Coastal BV

Hillblock BV

Altena Infra-materialen BV

LBN Betonproducten BV /

Berding Beton GmbH

Project

1208618-006

Kenmerk

1208618-006-HYE-0022

Pagina's

63

De ruwheidscoëfficiënten kunnen gebruikt worden voor het berekenen van de golfoverslag en golfoploop met de formules uit TAW (2002). Hiermee kan de kruinhoogte van dijken worden geoptimaliseerd.

Referenties

RWS opdracht voor het project "Vergelijkend Onderzoek Zetsteen", zaak 31087167, 29.11.2013.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	aug. 2015	M. Klein Breteler		R. 't Hart		K.J. Bos	
3	okt. 2015	M. Klein Breteler		R. 't Hart		M.R.A. van Gent	
5	mrt. 2016	M. Klein Breteler		R. 't Hart		M.R.A. van Gent	
6	juli 2016	M. Klein Breteler		R. 't Hart		M.R.A. van Gent	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
2 Stabiliteit van de steenzettingen bij golfaanval	5
2.1 Inleiding	5
2.2 Onderzochte typen steenzettingen	5
2.3 Modelopstelling in de Deltagoot	9
2.4 Proevenprogramma	11
2.5 Resultaten van het onderzoek	13
2.6 Relatie met OI-2014 en WTI-2017	15
3 Golfoverslagreducerende werking van steenzettingen in dambord- of ribbenpatroon	19
3.1 Modelopstelling in de Scheldegoet	19
3.2 Proevenprogramma	21
3.3 Resultaten	22
4 Golfoploopreducerende steenzettingen	25
4.1 Inleiding	25
4.2 Modelopstelling en proevenprogramma	25
4.3 Resultaten	28
5 Conclusies	31
6 Referenties	35

Bijlage(n)

A Procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor voor geklemde steenzettingen zonder interlocking	A-1
A.1 Inleiding	A-1
A.2 Interpretatie van de proeven	A-1
A.3 Bepaling stabiliteitsfactor	A-3
B Procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor voor flexibele steenzettingen met interlocking	B-1
B.1 Inleiding	B-1
B.2 Interpretatie van de proeven in de Deltagoot	B-1
B.3 Bepaling van stabiliteitsfactor	B-3
C Aanpassing Steentoets voor open steenzettingen op een fijn filter	C-1
C.1 Inleiding	C-1
C.2 Grens voor de toepasbaarheid van Steentoets2014	C-2
C.3 Aanpassing Steentoets	C-4
C.4 Vergelijking nieuwe Steentoets-V met Deltagootmetingen met Verkalit®	C-8
D Uitgevoerde proeven in de Deltagoot	D-1

E Begrenzungen in Steentoets2014	E-1
E.1 Leklengtetheorie	E-1
E.2 Begrenzing bij kleine leklengte	E-2

E-1
E-1
E-2

Symbolenlijst

A_{nok}	= het gemiddelde aanstroomoppervlak van de uit het talud stekende nokken per meter dijk, zie Figuur 3.5 (m)
b	= dikte van de filterlaag (m)
c_{kanaal}	= constante, afhankelijk van type steenzetting (-)
$C_{\text{fijnfilter}}$	= invloedsfactor in verband met kleine korrelgrootte van het filter (-)
d_{kanaal}	= volume van de kanalen per m^2 taludoppervlak (m)
d_{ruw}	= diepte onder de stilwaterlijn vanaf waar de ruwheid meetelt (m)
d_{tong}	= dikte van de golfplooptong ter hoogte van z boven SWL (m)
D	= toplaagdikte (m)
D_{i15}	= korrelgrootte van het inwasmateriaal waarvan 15 gewichtsprocenten kleiner is (mm)
D_{f15}	= korrelgrootte van het filter waarvan 15 gewichtsprocenten kleiner is (mm)
$D_{\text{ST eigen gewicht}}$	= de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets, als gerekend wordt met alleen het eigen gewicht (als blok zonder klemming en met gereduceerde soortelijke massa als er kanalen zijn, met $f_{\text{stabiliteit}} = 1$), bij een golfhoogte gelijk aan die toegepast is in de Deltagoot (het gemiddelde tussen wel bezwijken en nog geen bezwijken) (m)
$D_{\text{Steentoets}}$	= de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets (als gerekend wordt met klemming, etc., met $f_{\text{stabiliteit}} = 1$) bij een golfhoogte gelijk aan die toegepast is in de Deltagoot (m)
$D_{\text{in modelproeven}}$	= de toplaagdikte (zuilhoogte) die toegepast is in de Deltagoot (m)
f_{duur}	= invloedsfactor voor de belastingduur (-)
f_{β}	= invloedsfactor voor scheve golfaanval (-)
f_{stab}	= stabiliteitsfactor (de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets moet gedeeld worden door deze stabiliteitsfactor om rekening te houden met de specifieke stabiliteit van het betreffende type steenzetting) (-)
$f_{\text{stabiliteit}}$	= stabiliteitsfactor van een bepaald type steenzetting (-)
g	= versnelling als gevolg van de zwaartekracht (m/s^2)
h	= waterdiepte (m)
h_k	= kruinhoogte ten opzichte van de stilwaterlijn (m)
H_{m0}	= significante golfhoogte berekend uit het spectrum ($\approx H_s$) (m)
H_s	= significante golfhoogte berekend uit het spectrum ($\approx H_{m0}$) (m)
k	= doorlatendheid van het filter (m/s)
k'	= doorlatendheid van de toplaag (m/s)
L_D	= dimensieloze factor (-)
N	= aantal golven tijdens de proef (-)
q	= gemiddelde golfoverslagdebiet per meter dijk ($\text{m}^3/\text{m/s}$)
S_{om}	= $H_{m0}/(gT_{m-1,0}^2/(2\pi))$ = golfsteilheid op basis van $T_{m-1,0}$ (-)
S_{op}	= $H_{m0}/(gT_p^2/(2\pi))$ = golfsteilheid (-)
$T_{m-1,0}$	= spectrale golfperiode (-)
T_p	= golfperiode bij de piek van het spectrum (s)
$Z_{2\%}$	= golfploophoogte ten opzichte van de stilwaterlijn die door 2% van de golven wordt overschreden (ter indicatie: $Z_{2\%} \approx 1,5H_s$ à $3H_s$) (m)
z	= niveau boven de stilwaterlijn (m)
Z	= hoogte ten opzichte van de gootbodem
α	= taludhelling ($^\circ$)
δ_{ruw}	= ruwheidsdichtheid: het gemiddelde aanstroomoppervlak van de uit het talud stekende nokken per m^2 ophoopzone tot de kruin, maar niet hoger dan de golfploophoogte $Z_{2\%}$ (-)
Δ	= $(\rho_z - \rho)/\rho$ = relatieve soortelijke massa van de zetstenen (-)
γ	= veiligheidsfactor (-)

γ_b	= invloedsfactor voor de eventuele berm
γ_f	= ruwheidscoëfficiënt die toegepast kan worden in golfoploop- en golfoverslag-formules (-)
γ	= veiligheidsfactor (-)
Λ	= $\sqrt{(bDk/k')}$ = leklengte van de steenzetting (m)
ξ_{om}	= $\tan\alpha/\sqrt{s_{om}}$ = breker parameter op basis van $T_{m-1,0}$ (-)
ξ_{op}	= $\tan\alpha/\sqrt{s_{op}}$ = brekerparameter (-)
ρ_z	= soortelijke massa van de zetstenen (kg/m^3)
ρ	= soortelijke massa van water (kg/m^3)
σ	= standaardafwijking in de proefresultaten
Ω	= Relatief open oppervlak tussen en in de zetstenen conform NEN7024 (-)

1 Inleiding

In het kader van het “Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken” is door Deltares voor Rijkswaterstaat, drie noordelijke waterschappen (in Project Overstijgende Verkenning van HWBP: POV-Waddenzeedijken) en enkele marktpartijen onderzocht of zetstenen slimmer ingezet kunnen worden bij dijkversterkingen. Doordat de thans leverbare typen zetstenen verschillen in vorm, hebben ze ieder specifieke kwaliteiten. Ze zijn bijvoorbeeld extra stabiel of remmen de golfoploop goed. Dit onderzoek is uitgevoerd omdat er nog te weinig kennis was over hun unieke eigenschappen om de stenen optimaal te benutten en te vergelijken.

Het onderzoek richtte zich op twee eigenschappen van zetstenen: de stabiliteit bij hoge golven en de golfoploopremming (reductie golfoverslag). Deltares heeft deze kenmerken met behulp van proeven in de Scheldegoot en de Deltagoot onderzocht. De zetstenen zijn hiervoor op schaal getest.

De volgende partijen hebben naast Deltares in het onderzoek geparticipeerd:

- Overheidspartijen:
 - Rijkswaterstaat WVL (penvoerder namens overheidspartijen)
 - Waterschap Hunze en Aa's (als deelnemer van POV-Waddenzeedijken)
 - Wetterskip Fryslân (als deelnemer van POV-Waddenzeedijken)
 - Waterschap Noorderzijlvest (als deelnemer van POV-Waddenzeedijken)
 - Projectbureau Zeeweringen
 - Project Afsluitdijk
 - Corporate Innovatie Programma van RWS
- Marktpartijen:
 - Holcim Coastal BV
 - Hillblock BV
 - Altena Infra-materialen BV
 - LBN Betonproducten BV / Berding Beton GmbH



Figuur 1.1 Stabiliteitsproeven met RONA[®]ton in de Deltagoot in de Noordoostpolder

Het doel van het onderzoek is:

- het vaststellen van een stabiliteitsfactor voor elk van de onderzochte steenzettingen:
 - Basalton en Basalton+ van Holcim Coastal BV
 - Hillblock® en Testblokken van Hillblock BV
 - RONA® ton en RONA® Taille van Altena Infra-materialen BV
 - Verkalit® mgv, Verkalit® GOR en C-Star van LBN Betonproducten BV / Berding Beton GmbH
- het bepalen van de ruwheidscoëfficiënt ten aanzien van de golfoploopremmende werking van 3 typen steenzettingen:
 - Hillblock® van Hillblock BV
 - RONA® Taille van Altena Infra-materialen BV
 - Verkalit® GOR van LBN Betonproducten BV / Berding Beton GmbH
- het bepalen van de ruwheidscoëfficiënt ten aanzien van de golfoverslagreducerende werking van steenzettingen die geplaatst zijn in een dambordpatroon of ribbenpatroon

De stabiliteitsfactor gaat opgenomen worden in het rekenmodel Steentoets, waarmee steenzettingen getoetst en ontworpen worden. De introductie van de stabiliteitsfactor daarin zorgt ervoor dat de specifieke stabiliteit van elk type steenzetting goed wordt weergegeven door het rekenmodel, rekening houdend met een veiligheidsmarge. Het zorgt ervoor dat de steenzettingen die een hoge stabiliteit hebben volgens de proeven in de Deltagoot met een kleinere dikte kunnen worden ontworpen dan de steenzettingen met een lage stabiliteit.

Voor het dimensioneren van de kruinhoogte van een dijk wordt gebruikgemaakt van golfoploop- en golfoverslagformules (TAW 2002). Deze formules bevatten een ruwheidscoëfficiënt waarmee de ruwheid van het taludoppervlak wordt verdisconteerd. Hoe groter de ruwheid, hoe kleiner de ruwheidscoëfficiënt, en hoe kleiner de golfoploop en golfoverslag bij een bepaalde kruinhoogte.

De ruwheid van het talud kan worden beïnvloed door de vormgeving van de zetstenen of door de zetstenen van bijvoorbeeld 40 cm hoogte af te wisselen met die van 20 cm. Met dit laatste kan een dambordpatroon of een ribbenpatroon worden verkregen (zie Figuur 1.2), dat de golfoploop en golfoverslag aanzienlijk kan reduceren.



Figuur 1.2 Dambordpatroon van Basalton op Hondsbossche Zeewering (links) en patroon van Hydroblocks bij Breskens (rechts)

Het onderzoek in de Scheldegoet is uitgevoerd in de periode van november tot december 2013 en het onderzoek in de Deltagoot is uitgevoerd in de periode van december 2013 tot en met juli 2015. Het is uitgevoerd onder leiding van ir M. Klein Breteler van Deltares.

In dit rapport zijn de aanpak van het onderzoek en de belangrijkste resultaten samengevat. Alle maten, die in dit rapport worden genoemd, zijn de waarden in het schaalmodel, tenzij expliciet vermeld is dat het met de schaalfactor is omgerekend naar de werkelijkheid.

2 Stabiliteit van de steenzettingen bij golfaanval

2.1 Inleiding

Voor het ontwerpen en toetsen van steenzettingen wordt gebruikgemaakt van Steentoets. In Steentoets wordt onderscheid gemaakt tussen geklemde steenzettingen en niet geklemde steenzettingen en er wordt rekening gehouden met de specifieke doorlatendheid van elk type steenzetting. De specifieke sterkte van de verschillende typen steenzettingen is er echter niet in opgenomen. Tot nu toe werden alle moderne steenzettingen dezelfde sterkte toebedeeld.

Om de sterkte van elk type steenzetting goed tot uiting te laten komen in de rekenresultaten van Steentoets, is besloten om een stabiliteitsfactor in het rekenmodel op te nemen. Deze factor is in het huidige onderzoek voor elk type met behulp van grootschalig modelonderzoek bepaald.

Deze stabiliteitsfactor is afhankelijk van de prestaties van de steenzetting bij zware golfaanval in een grootschalige onderzoeksfaciliteit, ten opzichte van de verwachtingen op grond van berekeningen met Steentoets (met stabiliteitsfactor = 1). Naarmate de steenzetting beter presteert ten opzichte van Steentoets, krijgt hij een hogere stabiliteitsfactor toebedeeld. Die stabiliteitsfactor wordt vervolgens gebruikt om het resultaat van Steentoets te kalibreren 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.

Het doel van het huidige onderzoek naar de stabiliteit van steenzettingen is het vaststellen van deze stabiliteitsfactor. Hiervoor is een groot aantal van de moderne typen steenzettingen beproefd in de Deltagoot van Deltares in de periode van december 2013 tot juli 2015.

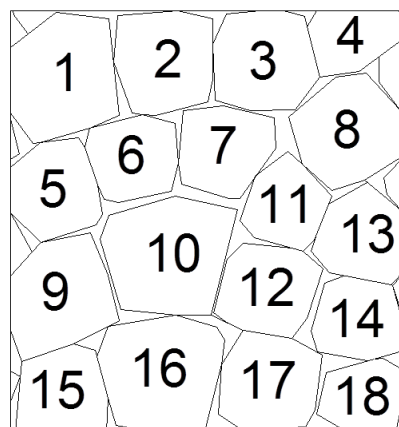
2.2 Onderzochte typen steenzettingen

Er zijn 8 typen steenzettingen van 4 marktpartijen onderzocht in de Deltagoot van Deltares ten behoeve van het vaststellen van de stabiliteitsfactor. Daarnaast zijn nog twee types, namelijk Hillblock® type Basisblock en Hillblock® type Slimblock, uit een eerder onderzoek in de Deltagoot bij de bepaling van de stabiliteitsfactoren meegenomen.

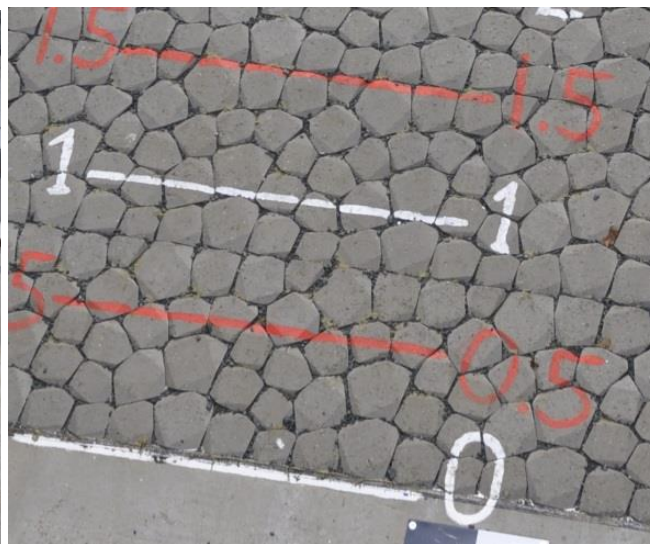
De 11 typen steenzettingen zijn gegeven in Figuur 2.1 t/m Figuur 2.9. Nadere details over het onderzoek zijn te vinden in de volgende rapporten:

- Stabiliteit van Basalton 30 STS steenzetting bij golfaanval; Deltares rapport 1208618-007, 25 maart 2016
- Stabiliteit van Basalton 30 STS+ steenzetting bij golfaanval; Deltares rapport 1208618-008, 22 maart 2016
- Stabiliteit van taludbekleding met Hillblock® bij golfaanval; Deltares rapport 1202901-000, januari 2012
- Stabiliteit van steenzetting met Testblokken bij golfaanval; Deltares rapport 1208618-009, 22 maart 2016
- Stabiliteit van RONA® ton steenzetting bij golfaanval; Deltares rapport 1208618-011, 22 maart 2016

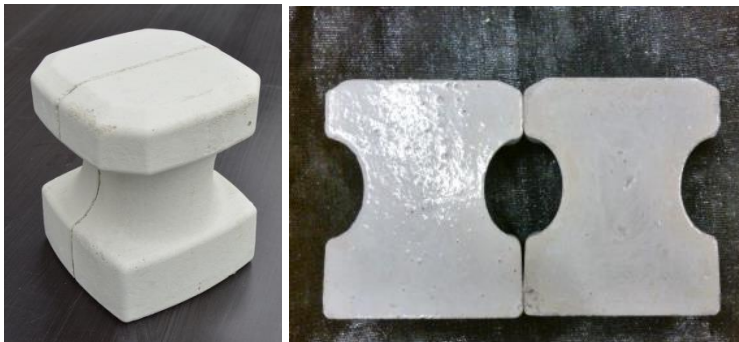
- Stabiliteit van RONA® Taille steenzetting bij golfaanval; Deltares rapport 1208618-017, 22 maart 2016
- Stabiliteit van Veralit® mgv steenzetting bij golfaanval; Deltares rapport 1208618-010, 22 maart 2016
- Stabiliteit van Veralit® GOR steenzetting bij golfaanval; Deltares rapport 1208618-010, 22 maart 2016
- Stabiliteit van C-Star steenzetting bij golfaanval; Deltares rapport 1208618-016, 22 maart 2016



Figuur 2.1 Basalton 30 STS van Holcim Coastal BV



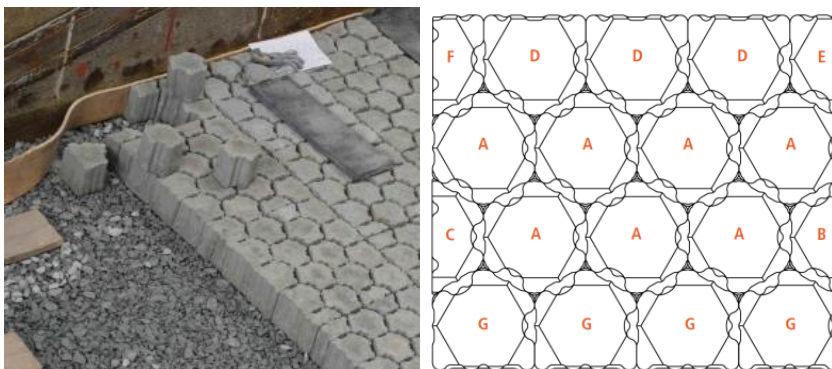
Figuur 2.2 Basalton+ 30 STS van Holcim Coastal BV (links: klem voor mechanisch zetten in de Deltagoot)



Figuur 2.3 Testblokken van Hillblock BV



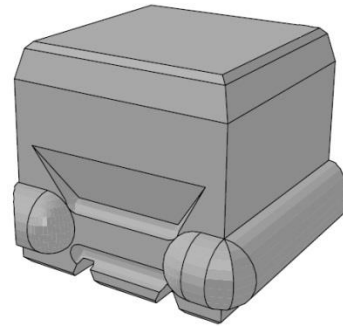
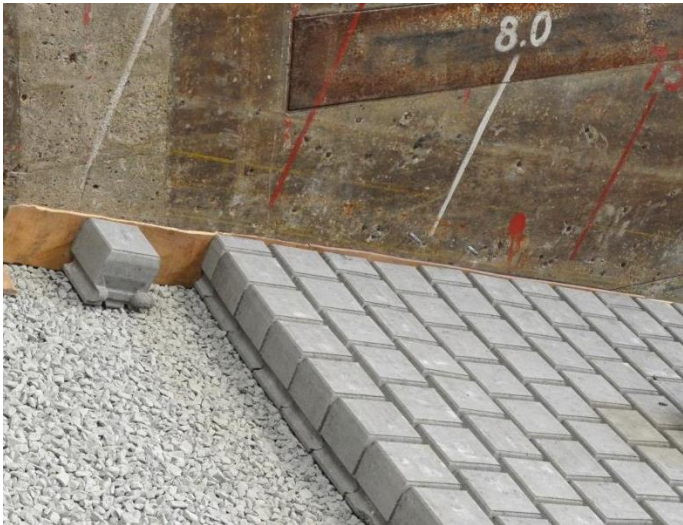
Figuur 2.4 Hillblock® van het type Basisblock en type Slimblock (2011)



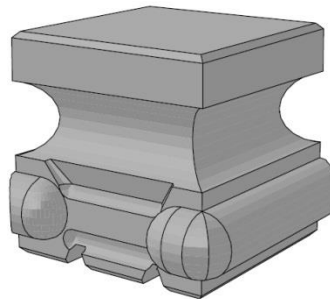
Figuur 2.5 RONA®ton van Altena Infra-materialen BV



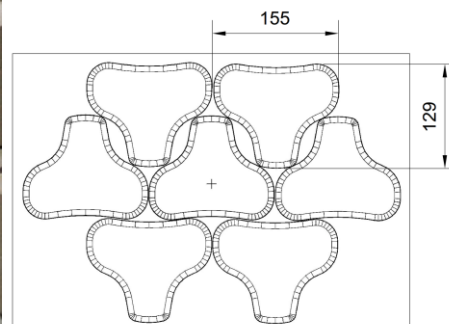
Figuur 2.6 RONA®Taille van Altena Infra-materialen BV



Figuur 2.7 Verkalit® mgv van LBN Betonproducten BV / Berding Beton GmbH



Figuur 2.8 Verkalit® GOR van LBN Betonproducten BV / Berding Beton GmbH



Figuur 2.9 C-Star van LBN Betonproducten BV / Berding Beton GmbH

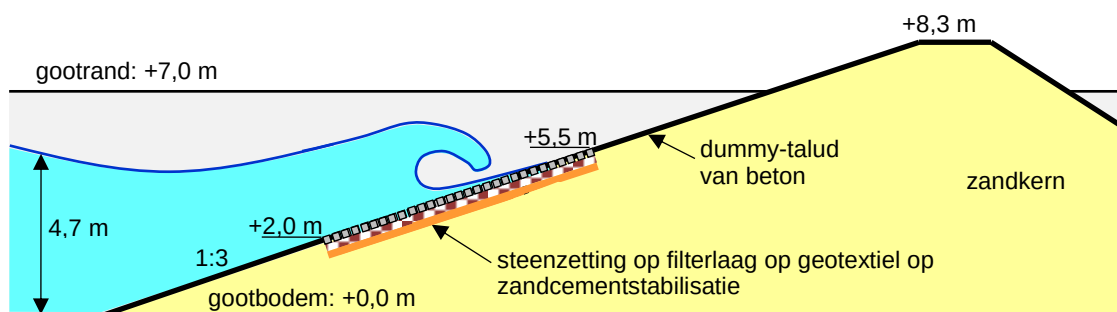
De meeste steenzettingen zijn getest op schaal 1:2. Dat betekent dat de afmetingen van de zetstenen in alle drie de richtingen met een factor 2 zijn verkleind met behoud van vorm. Alleen Basalton+ is met een andere schaal beproefd, namelijk 1:1,6. In beide gevallen is goed voldaan aan de schaalregels en is de schaal zodanig dat er geen schaaleffecten te verwachten zijn (Bezuijen, Burger en Klein Breteler, 1990).

2.3 Modelopstelling in de Deltagoot

Het onderzoek is gestart in de oude Deltagoot van Deltares in de Noordoostpolder. In de Deltagoot is een dijk opgebouwd met een hoogte van 8,3 m ten opzichte van de gootbodem met een talud van 1:3. Het onderste deel van het talud tot een niveau van +2,0 m ten opzichte van de gootbodem is een dummy-talud met een betonlaag. Tussen +2,0 m en +5,5 m is de te beproeven steenzetting aangebracht.

Daarboven was in de meeste gevallen een dummy talud van beton aanwezig, maar bij sommige bekledingen was hier een golfploopremmende steenzetting aangebracht. Ter plaatse van de overgang op +5,5 m is ervoor gezorgd dat de steenzetting in de oploophoeft geen normaalkracht evenwijdig aan het talud uitoefent op de steenzetting onder +5,5 m. Het verschil in bekleding op het bovenbeloop had daardoor een verwaarloosbare invloed op de stabiliteit van de bekleding onder de waterlijn.

Een tekening van de modelopstelling is gegeven in Figuur 2.10.



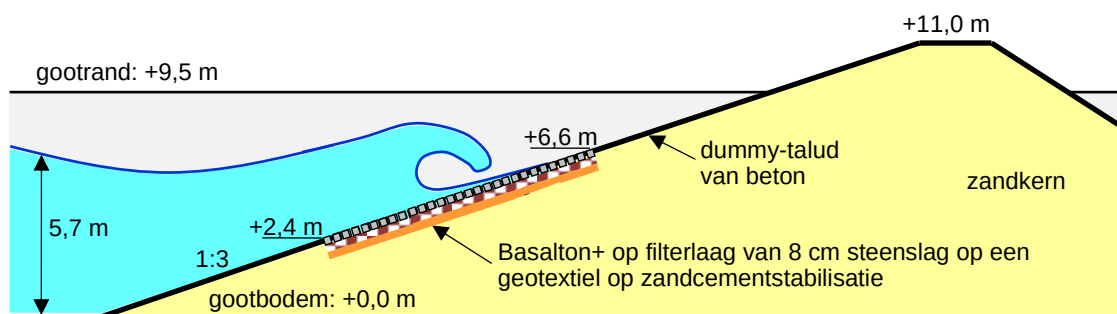
Figuur 2.10 Schematische doorsnede van de dijk in de Deltagoot in de Noordoostpolder

De te beproeven zetstenen waren gezet op een dunne uitvullaag (filterlaag) van steenslag met daaronder een geotextiel. Onder het geotextiel was een laag zandcementstabilisatie aangebracht. Dit laatste is een goede weergave van de kleilaag die normaal in werkelijkheid wordt toegepast.

De waterdiepte tijdens de stabiliteitsproeven was in de Deltagoot in de Noordoostpolder steeds 4,7 m. Alleen de ingolfproeven zijn bij een iets lagere waterstand uitgevoerd.

De laatste steenzetting (Basalton+) is beproefd in de nieuwe Deltagoot in Delft. Omdat deze golfgoot dieper is en grotere golven kan genereren, is de modelopstelling ca. 20% groter gemaakt. De te beproeven steenzetting was daardoor geplaatst tussen +2,4 m en +6,6 m ten opzichte van de gootbodem, zie Figuur 2.11.

De proeven zijn hier uitgevoerd met een waterdiepte van 5,6 à 6,0 m.



Figuur 2.11 Schematische doorsnede van de dijk in de Deltagoot in Delft

Een overzicht van de eigenschappen van de steenzettingen, zoals ze beproefd zijn in de Deltagoot, is gegeven in Tabel 2.1. In deze tabel zijn soms drie waarden genoemd. In dat geval waren er verschillen tussen proevenserie 1, 2 en 3 en zijn de waarden in die volgorde vermeld.

Zetstenen				Inwasmateriaal		Filterlaag	
Type	Hoogte (mm)	Dichtheid (kg/m ³)	Ω (%)	D _{i15} (mm)	Type	Dikte (mm)	D _{f15} (mm)
Basalton 30 STS	150	2293	9,7	5,5-8,5-8,5	ng-bs-bs	95-69-71	14-7-11
Basalton+ 30 STS	179	2297	9,4	5,8	ng	79-79-78	11,3-11,3-12,4
Testblok	150	2390	8,4	4,4	ng	73	11,5
Hillblock® Basis	200	2372	8,4	5	ng	70	12
Hillblock® Slim	200	2372	8,4	5	ng	70	12
RONA® ton	145	2112	10	10,4	ng	75-75-74	10,9-10,9-11,1
RONA® Taille	150-151 151	2265-2239 2239	7,9	8,6	ng	73-70-70	10,7-11,6-10,6
Verkaliit® mgv	152	2355	6,5	-	-	70-49-49-49*	12,3-2,8-2,8-2,9*
Verkaliit® GOR	151	2342	6,5	-	-	50-51-50	2,8-2,7-2,7
C-Star	175	2346	10,3	8	ng	73	11

Tabel 2.1 Overzicht van de eigenschappen van de steenzettingen (maten zoals in de Deltagoot; als 3 waarden zijn vermeld, dan betreft dat respectievelijk serie 1, 2 en 3) (ks = kalksteen; ng = Noors graniet; bs = basaltsplit)(*=serie 5)

In deze tabel zijn de volgende symbolen gebruikt:

Ω = Relatief open oppervlak tussen en in de zetstenen conform NEN7024 (-)

D₁₅ = korrelgrootte van het inwasmateriaal waarvan 15 gewichtsprocenten kleiner is (mm)

D_{f15} = korrelgrootte van het filter waarvan 15 gewichtsprocenten kleiner is (mm)

Met de hoogte van de zetstenen wordt, conform NEN7024, de afstand bedoeld van het grondvlak (contactvlak met het filter) tot het bovenvlak (oppervlak van de steenzetting).

Na het aanbrengen van het inwasmateriaal is de steenzetting getrild met een trilplaat (behalve Hillblock® en Verkalit®). De ontstane ruimte (door het zetten/zakken van het inwasmateriaal) is weer opgevuld met nieuw inwasmateriaal. Vervolgens is ook een ingolfproef uitgevoerd (korte proef met vrij kleine golven). Deze bijzondere wijze van werken, die afwijkt van de werkwijze in de praktijk, is uitgevoerd omdat de steenzetting volledig nieuw is en in de Deltagoot gelijk zwaar belast wordt door golven. In werkelijkheid ligt het inwasmateriaal na een paar jaar veel vaster en daarom hebben we extra ons best gedaan om een

situatie te creëren zoals op een echte dijk na enkele jaren. Daar zal het inwasmateriaal in de loop der tijd door temperatuurvariaties en weer & wind steeds vaster in de bekleding komen te zitten. Dit proces is in onderling overleg gesimuleerd door met een trilplaat over de bekleding te gaan om alles goed vast te trillen en een ingolfproef uit te voeren met kleine golven. De intentie was dus om een situatie te creëren zoals over een paar jaar op een echte dijk, en niet om een recept vast te leggen zoals in werkelijkheid het inwasmateriaal aangebracht moet worden.



Figuur 2.12 Golfaanval op Basalton+ in de Deltagoot in Delft

2.4 Proevenprogramma

Om de stabiliteit van de steenzettingen vast te stellen zijn voor elk type tenminste drie series proeven uitgevoerd. De eerste twee series bestonden uit korteduurproeven van ongeveer 1000 golven en de derde was een langeduurproef (enkele uren, met een maximum van 25 uur):

- Serie 1: Bij een kleine golfsteilheid (relatief lange golven met $s_{op} \approx 0,02$) is stap voor stap de golfhoogte verhoogd totdat bezwijken optrad, of totdat de maximale capaciteit van de Deltagoot was bereikt.
- Serie 2: Bij een grote golfsteilheid (relatief korte golven met $s_{op} \approx 0,04$) is stap voor stap de golfhoogte verhoogd totdat bezwijken optrad, of totdat de maximale capaciteit van de Deltagoot was bereikt.
- Serie 3: met een constante golfhoogte, die wat lager was dan de golfhoogte waarbij in serie 2 bezwijken optrad, is met een grote golfsteilheid ($s_{op} \approx 0,04$) net zolang gegolfd totdat er bezwijken optrad of de maximale proefduur was verstreken.

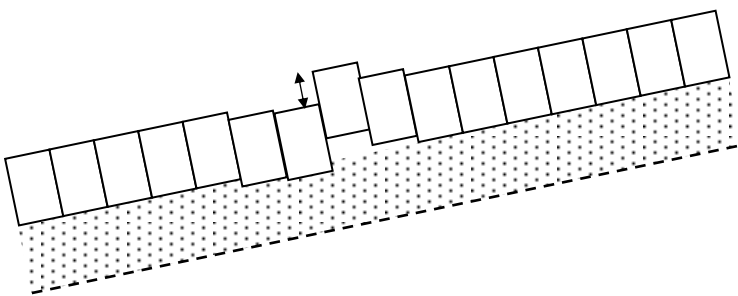
Voorafgaand aan deze proevenseries is steeds een ingolfproef uitgevoerd met vrij kleine golfhoogte en iets lagere waterstand dan tijdens de stabiliteitsproeven in de drie series. Deze proef was bedoeld om de steenzetting de gelegenheid te geven wat vaster geklemd te raken, zoals dat naar verwachting ook in de werkelijkheid gebeurt.

Na elke korteduurproef is de waterstand verlaagd om de steenzetting te inspecteren. Er is daarbij gelet op het ontstaan van vervormingen, het uitspoelen van het inwasmateriaal en het eventueel ontbreken van zetstenen die door de golven uit het talud zijn gelicht. Vervolgens is in overleg met leverancier de steenzetting weer opnieuw ingewassen met steenslag, om ervoor te zorgen dat elke korteduurproef zo min mogelijk is beïnvloed door de reeds uitgevoerde korteduurproeven.

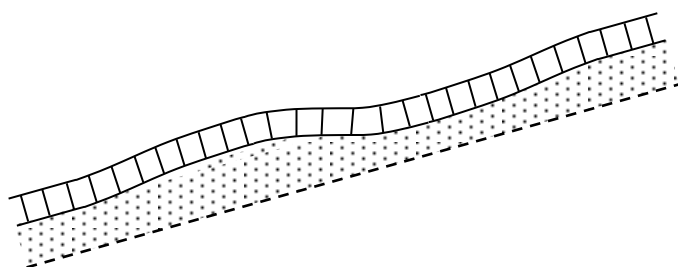
Bij de langeduurproeven is niet tussentijds ingewassen.

De geconstateerde schade wordt ingedeeld in de volgende vier categorieën (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 2.13), of de amplitude van de vervorming (S-vormig taludoppervlak, zie Figuur 2.14) 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.



Figuur 2.13 verplaatsing van zetsteen ten opzichte van naastliggende zetsteen



Figuur 2.14 Vervorming tot S-profiel

De steenzetting heet bezwaken te zijn als schade van de categorie c of d is opgetreden. In dat geval is de proevenserie beëindigd en is het vervormde/beschadigde deel van de steenzetting verwijderd en opnieuw ingebouwd voor de volgende serie.

Alle uitgevoerde proeven zijn vermeld in bijlage D.

2.5 Resultaten van het onderzoek

Het onderzoek heeft voor de onderzochte steenzettingen de golfhoogte opgeleverd waarbij nog net geen bezwijken optreedt (schadecategorie a of b) en de golfhoogte waarbij dit net wel optreedt (schadecategorie c of d). Tevens is vastgesteld hoe lang de steenzetting standhoudt bij een constante golfhoogte. Dit heeft per type steenzetting tenminste drie meetpunten opgeleverd van de bezwijkgolfhoogte. De bezwijkgolfhoogte is bij de korteduurproeven gelijk aan het gemiddelde van de hoogste golfhoogte waarbij geen bezwijken optreedt en de laagste waarbij dat wel gebeurt. Bij de langeduurproef geldt de totale duur tot bezwijken als resultaat.

Type zetsteen	$H_{m0}/(\Delta D)$ bezwijken*	Stabiliteits- factor
Basalton (Holcim Coastal BV)	5,38	0,98
Basalton+ (Holcim Coastal BV)	8,22	1,18
Testblokken (Hillblock BV)	3,99	0,85
Hillblock® type Basisblock (Hillblock BV)	**	1,19
Hillblock® type Slimblock (Hillblock BV)	**	1,19
RONA® ton (Altena Infra-materialen BV)	9,02	1,19
RONA® Taille (Altena Infra-materialen BV)	4,49	0,89
Verkalit® mgv (LBN Betonproducten BV / Berding Beton GmbH)	7,69	0,89
Verkalit® GOR (LBN Betonproducten BV / Berding Beton GmbH)	7,21	0,70
C-Star (LBN Betonproducten BV / Berding Beton GmbH)	7,08	1,17

Tabel 2.2 Gemeten waarde van $H_{m0}/(\Delta D)$ bij bezwijken en de afgeleide stabiliteitsfactoren (* het gemiddelde van de waarden bij bezwijken tijdens de korteduurproeven conform de wijze van interpreteren van bijlage A.2;

**= niet bezwaken bij grootst mogelijke golven)

Op basis van deze drie meetpunten is de stabiliteitsfactor afgeleid volgens een door Rijkswaterstaat vastgestelde procedure. De procedure is voor geklemde steenzettingen zonder interlocking gegeven in bijlage A en voor flexibele steenzettingen met interlocking (Verkalit®) in bijlage B.

De stabiliteitsfactor gaat in de nabije toekomst hard ingeprogrammeerd worden in Steentoets, op een wijze die niet zichtbaar is voor de normale gebruiker. Zodra dit gerealiseerd is, kan Steentoets de soortspecifieke stabiliteit van elk van de onderzochte steenzettingen uitrekenen ten behoeve van het ontwerpen of toetsen van steenzettingen.

De afgeleide stabiliteitsfactoren zijn gegeven in Tabel 2.2.

De stabiliteitsfactor is bruikbaar in combinatie met een specifieke versie van Steentoets. Voor de geklemde steenzettingen is dat Steentoets2014 versie 14.1.2.1 en voor Verkalit[®] is dat Steentoets-V (zie bijlage C). Inmiddels zijn Steentoets2014 en Steentoets-V samengevoegd in Steentoets2015.

Voor het gebruik van de stabiliteitsfactor in de periode dat die nog niet is opgenomen in Steentoets, wordt verwezen naar de volgende paragraaf.

Verkalit[®] kan met een veel fijner filter dan de andere steenzettingen toegepast worden. Daardoor was het nodig om het toepassingsgebied van Steentoets uit te breiden, zoals nader is toegelicht in bijlage C. Deze wijziging in Steentoets in combinatie met de toepassing van een veel fijner filter onder Verkalit[®] maakt het moeilijker om de stabiliteitsfactoren van de geklemde steenzettingen te vergelijken met die van Verkalit[®].

Type zetsteen	Benodigde toplaagdikte (m)	
	Dijk 1	Dijk 2
Basalton (Holcim Coastal BV)	0,27	0,38
Basalton+ (Holcim Coastal BV)	0,23	0,32
Testblokken (Hillblock BV)	0,33	0,44
Hillblock [®] type Basisblock (Hillblock BV)	0,24	0,32
Hillblock [®] type Slimblock (Hillblock BV)	0,24	0,32
RONA [®] ton (Altena Infra-materialen BV)	0,22	0,32
RONA [®] Taille (Altena Infra-materialen BV)	0,30	0,42
Verkalit [®] mgv (LBN Betonproducten BV / Berding Beton GmbH)	0,24	0,31
Verkalit [®] GOR (LBN Betonproducten BV / Berding Beton GmbH)	0,30	0,39
C-Star (LBN Betonproducten BV / Berding Beton GmbH)	0,23	0,32

Tabel 2.3 Benodigde toplaagdikte op voorbeelddijk

Om de onderlinge vergelijking mogelijk te maken zijn twee voorbeeldsteenzettingen doorgerekend met alle typen steenzettingen. Het eerste voorbeeld is een steenzetting met soortelijke massa van 2350 kg/m^3 op een dijk met talud van 1:4 en golven van $H_{m0} = 1,7 \text{ m}$ bij een golfsteilheid van 4%. Bij alle geklemde steenzettingen is een filter van 8 cm dikte en korrelgrootte van $D_{f15} = 18 \text{ mm}$ gehanteerd. Het inwasmateriaal is bij deze steenzettingen hetzelfde gekozen als in de Deltagootproeven, maar dan omgerekend naar ware grootte. Bij Verkalit[®] is een filter van 5 cm dik en korrelgrootte van $D_{f15} = 4 \text{ mm}$ gekozen. Bij het tweede voorbeeld is de golfhoogte $H_{m0} = 2,1 \text{ m}$, de golfsteilheid van 2% en de taludhelling 1:3. De benodigde toplaagdikte voor deze twee voorbeelddijken is gegeven in Tabel 2.3.

Hoewel de proeven zijn uitgevoerd met zetstenen die op ware grootte een hoogte hebben van 30 à 35 cm is de afgeleide stabiliteitsfactor toepasbaar in een brede range van zuil- en blokhoogtes, namelijk van 15 cm tot 60 cm hoog (zie NEN7024). Deltagootproeven uit het verleden hebben laten zien dat een verandering van de zuilhoogte bij gelijkblijvend grondoppervlak tot op zekere hoogte niet leidt tot een significant afwijkende stabiliteit ten opzichte van de trend volgens Steentoets (Klein Breteler 2014). Daarom wordt er van uitgegaan dat de resultaten in de genoemde range toepasbaar zijn. Er geldt echter als voorwaarde dat de vorm van de zetstenen niet wezenlijk mag worden aangepast bij het wijzigen van de hoogte van de zetsteen.

Het toepassingsgebied strekt zich daardoor, afhankelijk van de omstandigheden, uit tot een significante golfhoogte van maximaal ca. 4,5 m.



Figuur 2.15 Golfaanval op Verkalit® GOR in de Deltagoot in de Noordoostpolder

De stabiliteit van sommige type steenzettingen waren volgens de Deltagootproeven hoger dan voorheen berekend werd met Steentoets, waarvoor nu een aanpassing in Steentoets is aangebracht. Deze hoge stabiliteit betekent dat het een hightech systeem is, dat zijn stabiliteit onder andere ontleent aan een optimale samenwerking tussen de betonnen elementen en het inwasmateriaal, of door de interlocking. Om deze hoge stabiliteit ook in de praktijk te kunnen bereiken, is het essentieel dat ook in de praktijk ervoor gezorgd wordt dat deze optimale samenwerking gerealiseerd wordt. Dat vereist gedetailleerde instructies voor de aannemer en nauwgezet toezicht tijdens de aanleg van deze steenzettingen. Daarnaast moet bij beheer & onderhoud erop gelet worden dat bij de typen die bestaan uit ingewassen zetstenen het inwasmateriaal altijd in voldoende mate aanwezig is.

2.6 Relatie met OI-2014 en WTI-2017

Er is momenteel veel aan het veranderen op het gebied van het toetsen en ontwerpen van waterkeringen. Dat heeft ook z'n weerslag op steenzettingen.

Leidend in deze veranderingen is de omschakeling van het toetsen op het weerstaan van een normwaterstand met bijbehorende golven (overschrijdingskansbenadering) naar het toetsen op een vastgestelde maximale dijkdoorbraakkans (overstromingskansbenadering). Het voornemen is om deze omschakeling in 2017 te voltooien en vanaf dan de waterkeringen te toetsen volgens de nieuwe systematiek.

Dat betekent overigens niet dat er een faalkans van de steenzetting gaat worden berekend, want er is gekozen voor een semi-probabilistische rekenmethode voor steenzettingen. Er wordt een geschikte veiligheidsfactor toegepast in de rekenmethode, zodat het resultaat aansluit op de toelaatbare dijkdoorbraakkans.

Uiteraard moet ook de ontwerpsystematiek op vergelijkbare wijze aangepast worden, zodat de ontworpen waterkeringen niet voortijdig worden afgekeurd zodra de nieuwe toetsmethodiek van kracht wordt. Anticiperend op de veranderingen bij het toetsen is in 2014 een voorlopige wijziging doorgevoerd in de ontwerpmethodiek. Voor alle projecten die gefinancierd worden door het Hoogwaterbeschermingsprogramma geldt nu dat het Ontwerp-instrumentarium 2014 (OI-2014) moet worden gehanteerd (en de na 2014 geïntroduceerde wijzigingen). In het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) voeren de waterschappen en het ministerie van Infrastructuur en Milieu (Rijkswaterstaat) maatregelen uit om de primaire waterkeringen aan de wettelijke veiligheidsnorm te laten voldoen. Het HWBP is onderdeel van het nationale Deltaprogramma.



Figuur 2.16 Golfbelasting op Ronaton in de Deltagoot in de Noordoostpolder

Voor steenzettingen is vastgesteld dat de veiligheidsfactor in het ontwerp moet worden verhoogd naar 1,2. Dat betekent dat in Steentoets2014 versie 14.1.2.1 in het werkblad 'Algemeen' in cel E50 (veiligheidsfactor toplaag) de waarde 1,2 moet worden ingevuld (in plaats van 1,1). In Steentoets2015 is dit cel E60.

Om in de toetsing te kunnen voldoen aan de gestelde eisen ten aanzien van de overstromingskansnorm loopt er momenteel een onderzoeksprogramma: WTI-2017 (zie website van Helpdeskwater). Daarin worden voor steenzettingen kalibratieberekeningen uitgevoerd. Dat zijn probabilistische berekeningen waarmee voor een groot aantal voorbeelddijken berekend wordt wat de veiligheidsfactor voor steenzettingen zou moeten zijn om uit te komen op de maximaal toelaatbare overstromingskans. Dit project omvat niet alleen de berekeningen, maar omvat het hele traject van de ontwikkeling van de methodiek tot en met het maken van de toetssoftware (met werknaam: Ringtoets). Omdat dit project enige jaren in beslag neemt, kunnen de resultaten van het huidige project daarin nog niet gebruikt worden.

en zal de gedetailleerde toetsing aanvankelijk nog gebaseerd worden op Steentoets2014 en de kennis anno 2014.

Pas als in een later stadium de kalibratieberekeningen opnieuw zijn uitgevoerd met de kennis uit het huidige onderzoek, kan dit ook in de gedetailleerde toetsing toegepast worden. Dan zal de soortspecifieke stabiliteit van de steenzettingen, zoals die nu gemeten is in het Deltagootonderzoek, opgenomen kunnen worden in de toetsing.

Vooruitlopend daarop kunnen de onderzoeksresultaten al wel vanaf 2017 in een 'Toets op maat' gebruikt worden, die uitgevoerd wordt als een bepaalde steenzetting in de toetsing afgekeurd dreigt te worden.

3 Golfoverslagreducerende werking van steenzettingen in dambord- of ribbenpatroon

De golfoverslagreducerende werking van steenzettingen, die in een speciaal patroon zijn gezet, is onderzocht met kleinschalig modelonderzoek in de Scheldegoot van Deltares in de periode van 4 november 2013 tot 17 december 2013. Het gaat hierbij om het effect van het gebruik van hoge en lage zetstenen in een bepaald patroon, namelijk als een dambord of als ribbels (zie Figuur 1.2). De pakketten van de steenzetting (van meestal circa 1 m²) worden dan bijvoorbeeld om en om 20 cm en 40 cm hoog.



Figuur 3.1 Voorbeeld van een bijzonder patroon ten behoeve van de golfoverslagreductie (Zoutelande, Zeeland)

Er zijn talloze mogelijkheden om de in hoogte verschillende pakketten in de steenzetting te verwerken, zoals te zien is in Figuur 1.2 en Figuur 3.1. Het onderzoek is zo opgezet dat er een generiek toepasbare formule kon worden opgesteld.

Alle details van het onderzoek zijn te vinden in Capel (2015). Onderstaand is een samenvatting gegeven.

3.1 Modelopstelling in de Scheldegoot

Het onderzoek is uitgevoerd in de Scheldegoot van Deltares. Dit is een kleinschalige modelfaciliteit met diepte van 1,2 m en de mogelijkheid om golven op te wekken met een significante golfhoogte tot circa 0,25 m.

Er zijn op kleine schaal diverse configuraties van steenzettingen in dambord- en ribbenpatroon beproefd. De meeste proeven zijn uitgevoerd met een taludhelling van 1:3, maar er is ook een aantal proeven met een talud van 1:4 uitgevoerd teneinde de invloed van de taludhelling te meten.

Het patroon van hoge en lage sets van de steenzetting is geschematiseerd met betonnen kubussen van $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$. Elke kubus vertegenwoordigt een set zetstenen van circa $1,1 \times 1,1 \text{ m}^2$, zie Figuur 3.2. Dit maakt dat dit onderzoek is uitgevoerd op een geometrische schaal van 1:22.

Dat in werkelijkheid elke vierkante meter bestaat uit afzonderlijke zetstenen, terwijl dat hier is geschematiseerd met een dicht betonblokje, heeft een verwaarloosbare invloed op de proefresultaten.



Figuur 3.2: Schematisering van steenzetting in dambordpatroon met kubussen van $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$

Om te voorkomen dat het water tussen de rijen in bleef staan is een kleine porositeit aangebracht door alle rijen kubussen een kleine onderlinge afstand van 1 mm te geven door middel van afstandhouders.

Figuur 3.3 geeft een indruk van de modelopstelling met dambordpatroon. Dit patroon is op een deel van het talud aangebracht, namelijk in dit geval alleen boven de waterlijn. De rest van het talud bestaat uit dezelfde kubussen, maar dan vlak gezet. Het hoogteverschil in het dambord of ribbenpatroon was tijdens de meeste proeven 1,1 cm (24 cm op ware grootte bij een schaal van 1:22).

Achter de kruin is een bak geplaatst om de hoeveelheid golfoverslag op te vangen.



Figuur 3.3 Modelopstelling in Scheldegoot met dambordpatroon

Er zijn 14 verschillende configuraties van dambord- en ribbenpatronen getest:

- Dambordpatroon:
 - Gehele oploopzone
 - Bovenste tweederde deel van de oploopzone
 - Halve oploopzone en grootste deel golfklapzone (5 rijen onder de waterlijn)
 - Variatie in het aantal rijen met dambordpatroon tussen de waterlijn en de kruin: 17, 11, 9, 6 en 4 rijen
 - Overlappende vakjes (rijen zijn iets ten opzichte van elkaar verschoven, zoals ook te zien is in Figuur 1.2 en Figuur 3.2): 20% en 40% overlappende vlakjes.
- Ribbenpatroon:
 - Gehele oploopzone
 - Deel oploopzone en deel golfklapzone (drie ribben onder de waterlijn en drie erboven)
 - Variatie in het aantal rijen met ribbenpatroon: 6, 5 en 3 ribben
 - Variatie in de nokhoogte: 1,1 cm en 1,6 cm
 - Schaalproef met twee maal zo grote ribben
- Referentietalud zonder dambord- of ribbenpatroon



Figuur 3.4 Ribbenpatroon (foto en tekening van bovenaanzicht waarin de ribben rood zijn gekleurd)

In het ribbenpatroon is er af en toe een onderbreking aangebracht in de ribben, om te zorgen dat het water tijdens de golfneerloop vlot tussen de ribben weg kan lopen (zie Figuur 3.4).

3.2 Proevenprogramma

Het proevenprogramma is zo opgezet dat er bij elke combinatie van waterstand, golfhoogte en golfperiode een proef beschikbaar is met een glad houten talud en een proef met dezelfde golfcondities met een bepaald dambord- of ribbenpatroon. Op deze wijze zijn er proefparen verkregen waarmee precies vastgesteld kan worden wat het effect is van het patroon. Bovendien zijn er proeven uitgevoerd met een glad talud van de vierkante betonblokjes (zonder dambord- of ribbenpatroon).

Het basisproevenprogramma bestond uit 24 proeven op een houten talud met helling van 1:3. Deze proeven zijn uitgevoerd met een kruinhoogte ten opzichte van de waterstand van respectievelijk 30, 20, 16, 11 en 8 cm en een range aan golfsteilheden: $0,018 < s_{om} < 0,050$, met $s_{om} = H_{m0}/(gT_{m-1,0}^2/(2\pi))$. De golfoverslag, omgerekend naar de werkelijkheid (schaal 1:22), had bij deze proeven een waarde tussen 0,4 l/s/m en 39 l/s/m. Bij een talud van 1:4 is

deze basisset uitgebreid met een drietal proeven met extreem veel golfoverslag tot maximaal 237 l/s/m, omgerekend naar de werkelijkheid.

Bij elk van de proevenseries met een bepaalde geometrie van het dambord of de ribben is een selectie gemaakt uit deze 24 proeven (of zijn alle proeven uitgevoerd). Zo is een proevenprogramma met 162 proeven uitgevoerd. Elke proef bestond uit ca. 1000 golven.

De meeste proeven zijn uitgevoerd met een Jonswap spectrum. Daarnaast zijn 34 proeven uitgevoerd met een dubbeltoppig spectrum.

3.3 Resultaten

Het onderzoek heeft onder andere geresulteerd in het inzicht dat de ruwheid van het talud vooral een belangrijke invloed heeft op de golfoverslag als het overslagdebiet niet al te groot is. Naarmate de kruin lager wordt en het overslagdebiet groter, zal de lengte van het ruwe talud relatief korter zijn en steeds vaker een golf met een dikke waterlaag over de kruin gaan. Zo'n dikke waterlaag wordt veel minder geremd door de ruwheid van het taludoppervlak dan een dunne waterlaag.

Dit effect is op basis van de proefresultaten gekwantificeerd en is opgenomen in de formule waarmee de ruwheid kan worden bepaald. In die formule is ook de invloed meegenomen van de hoeveelheid opstaande nokjes waartegen de golfoploop opbotst (aanstroomoppervlak van de ruwheid). Daarvoor is de ruwheidsdichtheid δ_{ruw} geïntroduceerd: het gemiddelde aanstroomoppervlak van de uit het talud stekende nokken per vierkante meter taludoppervlak in de zone vanaf net onder de stilwaterlijn tot de kruin- of het oploophniveau. De formules voor de ruwheid van het talud zijn:

$$\gamma_f = 1 + 0,585 \cdot \sqrt{0,075 - s_{om}} \cdot \sqrt{\delta_{ruw}} \cdot \ln \left(\frac{q}{\sqrt{g} \cdot H_{m0}^3} \right) \quad (3.1)$$

$$\delta_{ruw} = \frac{A_{nok} \cdot \sin \alpha}{\min(h_k; z_{2\%})} \quad (3.2)$$

Met:

H_{m0} = significante golfhoogte berekend uit het spectrum ($\approx H_s$) (m)

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

γ_f = ruwheidscoëfficiënt die toegepast kan worden in golfoploop- en golfoverslag-formules (-)

δ_{ruw} = ruwheidsdichtheid: het gemiddelde aanstroomoppervlak van de uit het talud stekende nokken per m² oploophzone tot de kruin, maar niet hoger dan de golfoploophoogte $z_{2\%}$ (-)

A_{nok} = het gemiddelde aanstroomoppervlak van de uit het talud stekende nokken per meter dijk, zie Figuur 3.5 (m)

h_k = kruinhoogte ten opzichte van de stilwaterlijn (m)

$z_{2\%}$ = golfoploophoogte ten opzichte van de stilwaterlijn die door 2% van de golven wordt overschreden (ter indicatie: $z_{2\%} \approx 1,5H_s$ à $3H_s$) (m)

s_{om} = $H_{m0}/(gT_{m-1,0}^2/(2\pi))$ = golfsteilheid op basis van $T_{m-1,0}$ (-)

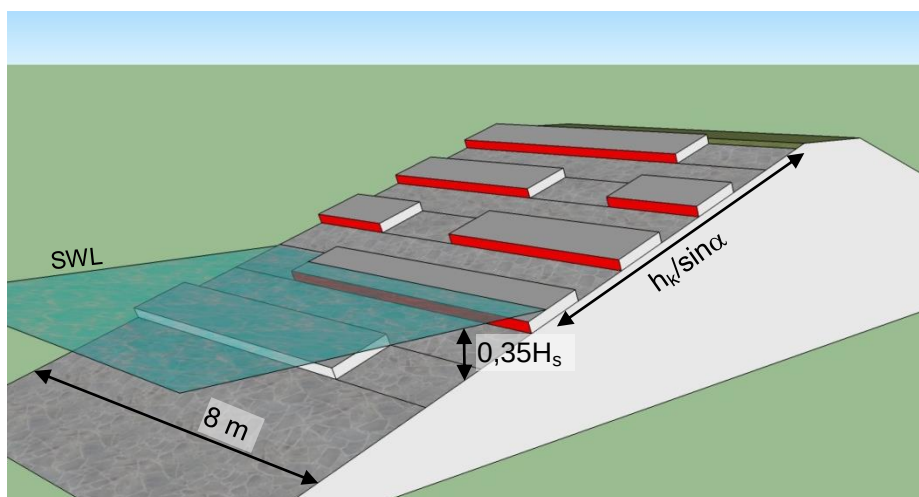
g = versnelling als gevolg van de zwaartekracht (m/s²)

α = taludhelling (°)

q = gemiddelde golfoverslagdebiet (m³/m/s)

In Figuur 3.6 en Figuur 3.7 is het verloop van de ruwheidscoëfficiënt gegeven als functie van het dimensieloze golfoverslagdebiet $q/\sqrt{(gH_{m0}^3)}$. Duidelijk is te zien dat wanneer het golfoverslagdebiet toeneemt, de ruwheidscoëfficiënt ook toeneemt waardoor de golfoverslag-reducerende werking vermindert.

Verder blijkt dat de ruwheidscoëfficiënt groter is bij een grotere golfsteilheid (bij korte golven minder golfoverslagreducerende werking).



Figuur 3.5 Kwantificering van gemiddelde aanstroomoppervlak van de uit het talud stekende nokken per meter dijk (de rode oppervlakken tellen mee en worden door de representatieve dijk lengte gedeeld om A_{nok} te verkrijgen)

In Figuur 3.5 is nader toegelicht hoe A_{nok} moet worden berekend. Daarvoor moet een representatief stukje dijk worden beschouwd, dat in dit voorbeeld 8 m lang is. Vervolgens worden alle aanstroomoppervlakken van de ruwheid opgeteld in de zone vanaf net onder de stilwaterlijn tot de kruin- of het oploophoogte (h_k of $z_{2\%}$). Dat oppervlak wordt gedeeld door de lengte van de beschouwde stukje dijk en de lengte van het taludoppervlak in de oploophoogte (tot maximaal de kruinhoogte, h_k , of oploophoogte, $z_{2\%}$). Dat levert de dimensieloze ruwheidscoëfficiënt δ_{ruw} .

Aanstroomoppervlakken die te diep onder water zitten, tellen niet mee. Doorgaans ligt deze grens bij ongeveer $0,35H_s$ à $0,4H_s$ onder water en kan berekend worden met de volgende formule:

$$\frac{d_{ruw}}{H_{m0}} = \min \left(0,35; 0,24 \cdot \xi_{om}^{1/3} \right) \quad (3.3)$$

Met:

d_{ruw} = diepte onder de stilwaterlijn vanaf waar de ruwheid meetelt (m)

$\xi_{om} = \tan \alpha / \sqrt{s_{om}} = \text{breker parameter op basis van } T_{m-1,0} \text{ (-)}$

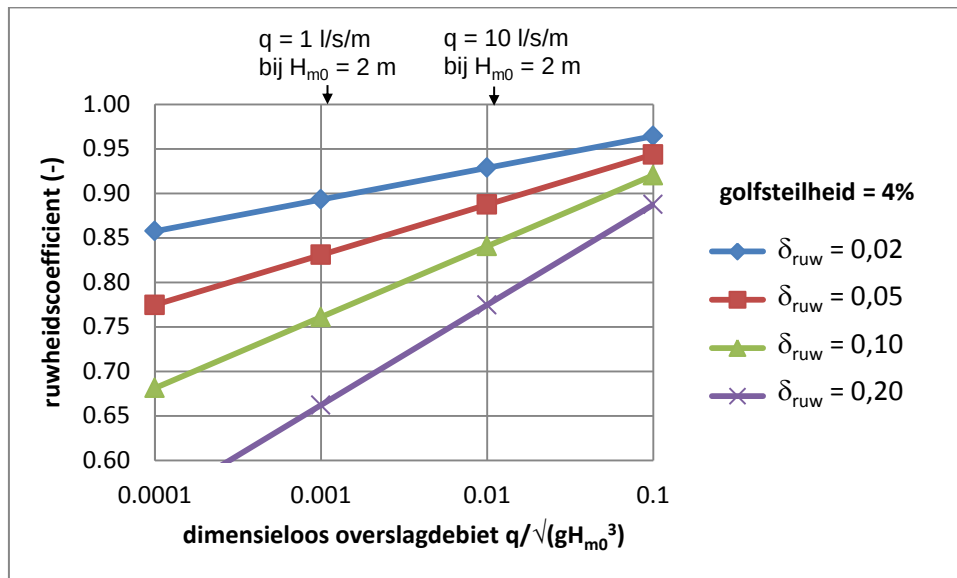
Ook aanstroomoppervlakken die hoger boven de waterlijn zitten dan $z_{2\%}$ (golfoploophoogte dat door 2% van golven wordt overschreden) tellen niet mee. In de buurt van dat golfoploophoogte is de waterlaagdikte in de golfoplooptong mogelijk dunner dan de nokhoogte. Dan telt het deel dat boven de golfoplooptong uitsteekt ook niet mee. De dikte van de golfoplooptong kan als volgt berekend worden:

$$d_{tong} = 0,216 \cdot (z_{2\%} - z) \quad (3.4)$$

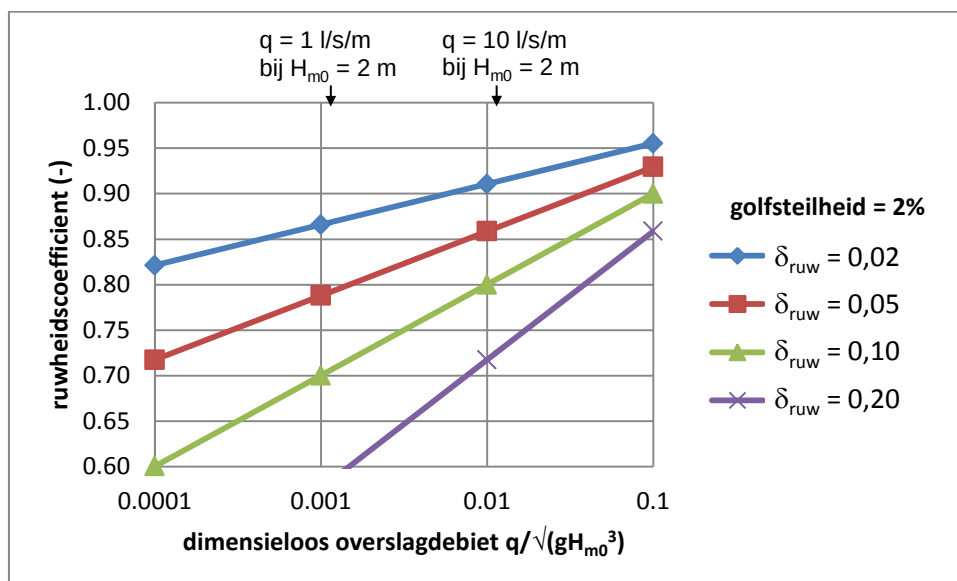
Met:

d_{tong} = dikte van de golfoplooptong ter hoogte van z boven SWL (m)

z = niveau boven de stilwaterlijn (m)



Figuur 3.6 Ruwheidcoëfficiënt als functie van dimensieloos overslagdebiet bij $s_{om} = 0,04$



Figuur 3.7 Ruwheidcoëfficiënt als functie van dimensieloos overslagdebiet bij $s_{om} = 0,02$

4 Golfloopreducerende steenzettingen

4.1 Inleiding

Een andere manier om de golfloop te reduceren is door een speciaal gevormde steenzetting toe te passen. In het huidige onderzoek is dit gekwantificeerd voor 4 typen steenzettingen:

- Hillblock® type Basisblock, zie Figuur 2.4 en Figuur 4.1
- Hillblock® type Slimblock, zie Figuur 2.4
- RONA®Taille, zie Figuur 2.6
- Verkalit® GOR, Figuur 2.8

Deze steenzettingen worden gekenmerkt door de holle ruimte in de toplaag (kanalen tussen de zetstenen). Daardoor kan een deel van het water in de golfplooptong verdwijnen in de steenzetting, hetgeen de golfploophoogte en de golfoverslag reduceert.



Figuur 4.1 Hillblock®

Dit onderzoek is gecombineerd met het grootschalige onderzoek naar de stabiliteit van steenzettingen in de Deltagoot. Daarvoor is de modelopstelling uitgebreid met de betreffende steenzetting in de golfloopzone tot aan de kruin van de dijk.

4.2 Modelopstelling en proevenprogramma

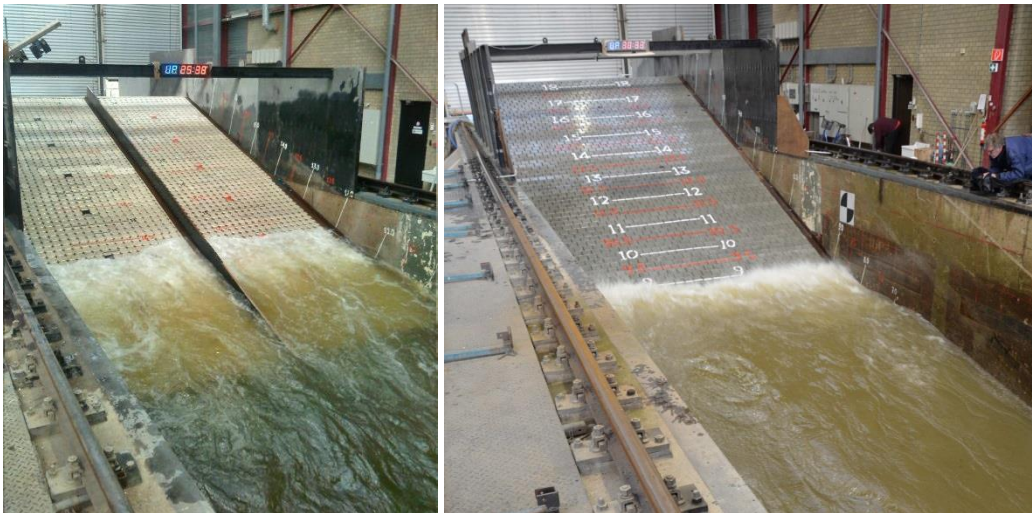
Ten behoeve van het meten van de golfloopreductie is ook de golfloopzone tot aan de kruin voorzien van de betreffende steenzetting.

Ten aanzien van de golfloop worden de Testblokken beschouwd als Hillblock®, omdat de verschillen tussen deze twee typen zetstenen voor wat betreft de golfloopreductie verwaarloosbaar klein zijn. De verschillen beïnvloeden vooral de stabiliteit.

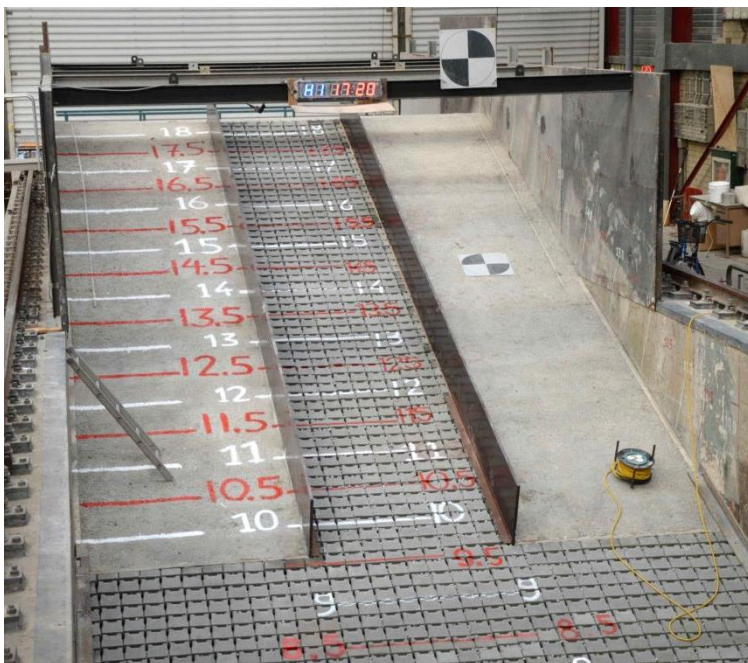
Zoals te zien is in Figuur 4.2 en Figuur 4.3 is de golfloopzone bij Hillblock® en Verkalit® GOR over de volle breedte voorzien van de betreffende steenzetting, terwijl voor RONA®Taille dit slechts een smalle strook is. Dit laatste heeft geen invloed op de kwaliteit van de golfloopmetingen. Verder is te zien dat bij Hillblock® de golfloopzone verdeeld is

in twee helften, met links Hillblock[®] van het type Basisblock en rechts Hillblock[®] type Slimblock.

In al deze gevallen was er een toplaag van gezette steen met dikte van 15 cm op een dunne uitvullaag van steenslag op een vrijwel ondoorlatende ondergrond. De taludhelling was steeds 1:3.

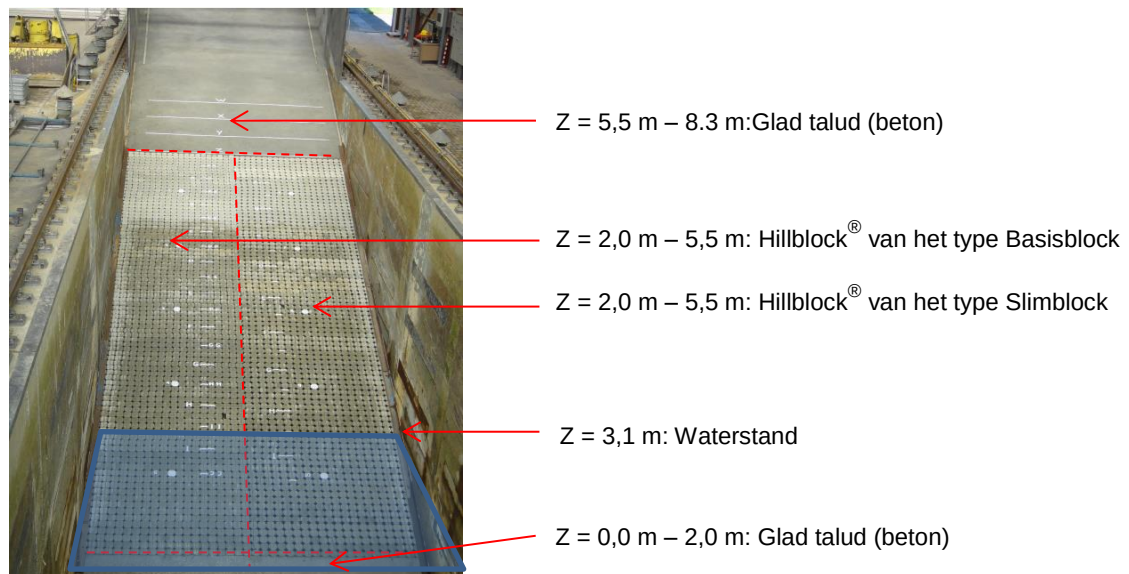


Figuur 4.2 Golfploopzone met Hillblock[®] (links, met links type Basisblock en rechts type Slimblock) en Verkalit[®] GOR (rechts)



Figuur 4.3 Golfploopzone met RONA[®]Taille in een smalle strook vanaf +5,5 m boven de gootbodem

Bij de analyse van de huidige golfploopprouwen op Hillblock[®] zijn ook de proefresultaten van eerder Deltagootonderzoek betrokken. In 2011 zijn proeven uitgevoerd met Hillblock[®] van 20 cm hoog (40 cm in werkelijkheid), zie Figuur 4.4, met links Hillblock[®] type Basisblock en rechts Hillblock[®] van het type Slimblock (Van Steeg 2012).



Figuur 4.4 Overzicht proefopstelling met Hillblock® van 20 cm uit 2011 (Z = hoogte ten opzichte van de gootbodem)

Bij de huidige proeven met Hillblock® (Testblokken) en Verkalit® GOR zijn er ook proeven uitgevoerd met deze steenzettingen in de oploophoeft van +5,50 m boven de gootbodem (vanaf SWL+0,02 m, SWL+0,10 m of SWL+0,80 m) en een gewone steenzetting eronder. Op deze manier kon de invloed bepaald worden van de soort steenzetting onder de waterlijn. Dit is relevant voor locaties in de praktijk waar al een steenzetting tot het toetspeil is aangebracht, maar er vanwege hoogtetekort overwogen wordt om de oploophoeft met een golfoploophremmende steenzetting te bekleden.

De geringe ruwheid onder de waterlijn en de grote ruwheid boven de waterlijn is in de analyse van de proeven samengesteld met de methode van TAW (2002).

Daarnaast zijn ook golfoploophmetingen uitgevoerd bij alle andere steenzettingen die niet golfoploophreducerend zijn. Die proeven zijn uitgevoerd met een glad betontalud in de oploophoeft van +5,5 m boven de gootbodem (vanaf SWL+0,8 m). Die proefresultaten gelden als referentie. De samengestelde ruwheid daarvan is zo goed mogelijk ingeschat aan de hand van de richtlijnen uit TAW (2002). Omdat het overgrote deel van de oploophoeft uit glad beton stond, is deze ruwheid gering (ruwheidsfactor van bijna 1).

Tijdens het onderzoek is gebleken dat de waterdiepte ook invloed heeft op de golfoplooph. Daarom zijn de referentieproeven uitgevoerd met diverse waterdieptes, zodat de invloed hiervan zo goed mogelijk kon worden meegenomen in de analyse.

De proeven zijn uitgevoerd met een zo breed mogelijk scala aan golfcondities. De maximale golfhoogte werd in sommige gevallen beperkt door de stabiliteit van de steenzetting onder de waterlijn. De golfsteilheid is gevarieerd in de range $0,01 < s_{om} < 0,05$. Vrijwel alle proeven zijn uitgevoerd met een Jonswap spectrum. Alleen enkele proeven met Basalton en Testblokken zijn ook uitgevoerd met Pierson Moskowitz spectrum.

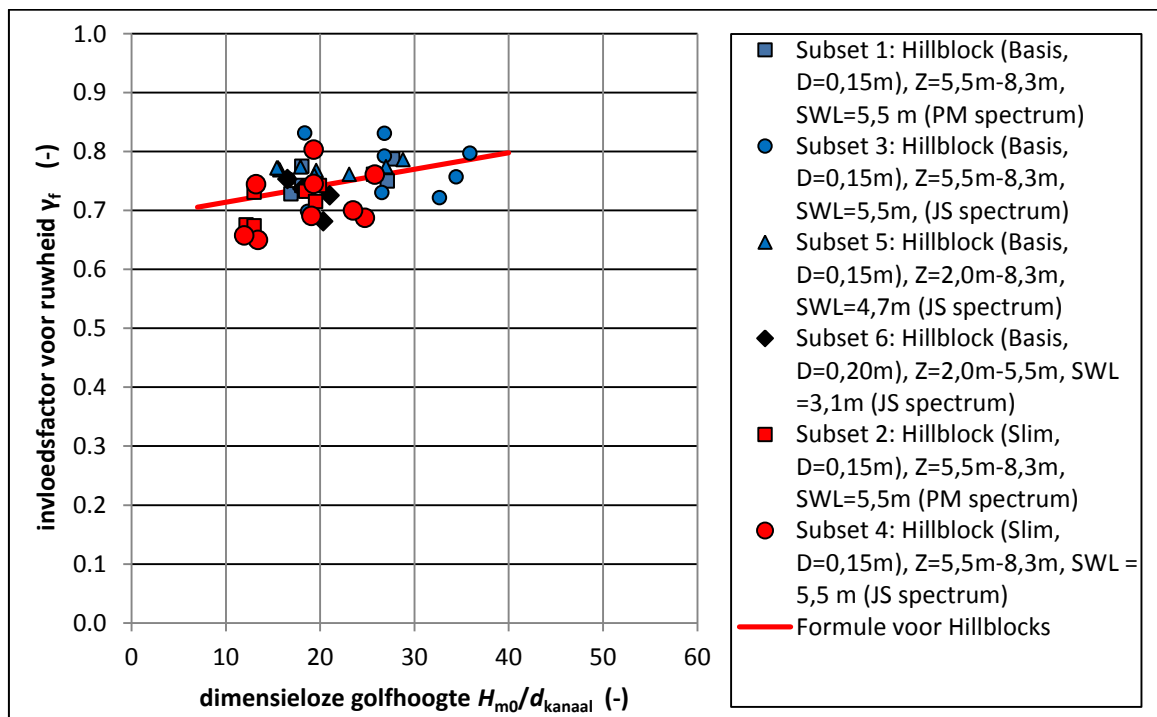
De proefduur was niet steeds even lang, omdat de proef soms ook een functie had in de het proevenprogramma voor de stabiliteit van de steenzetting. Meestal was de proefduur ongeveer 1000 golven, maar in sommige gevallen is reeds na 1 uur of bij het bezwijken van de steenzetting gestopt.

De golfploophoogte is visueel bepaald met behulp van de genummerde strepen op het talud. Bij elke golf is geturfd hoe hoog de oploop reikte. Tevens is de golfoploop op video vastgelegd, zodat het turven eventueel later herhaald kon worden.

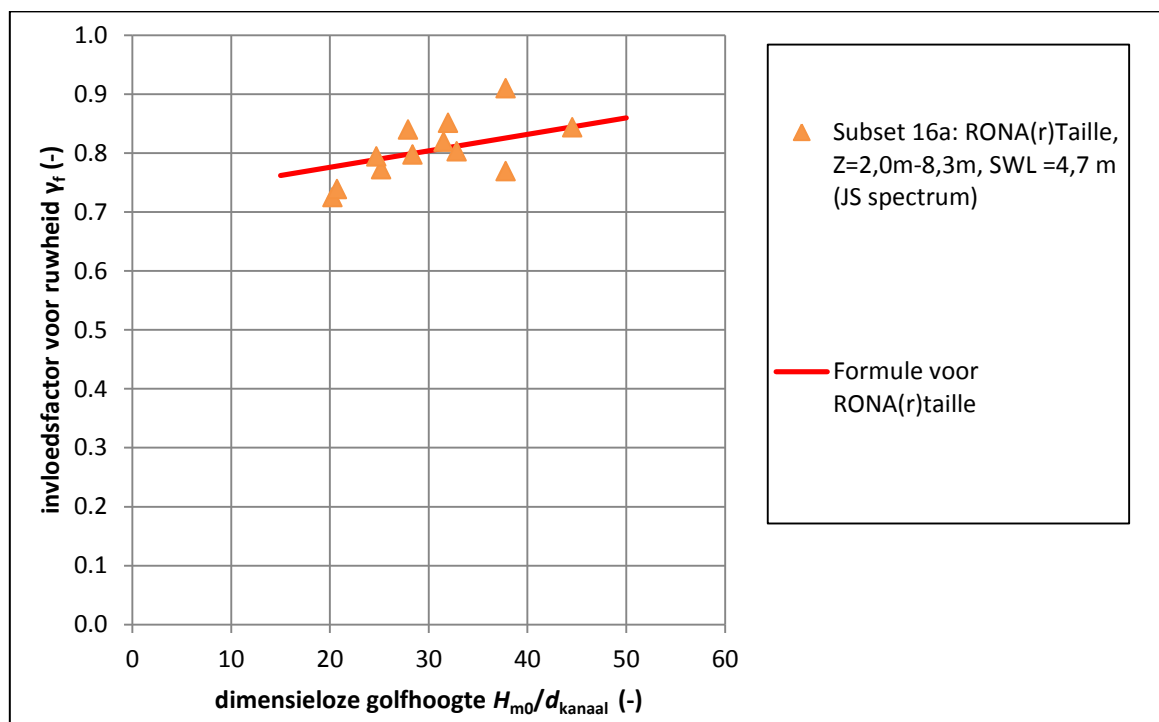
4.3 Resultaten

Bij de analyse van de resultaten van de golfplooppoeven zijn eerst de referentieproeven vergeleken met de formules uit TAW (2002). Het bleek dat de thans uitgevoerde proeven een iets hogere golfoploop gaven dan volgens die formules, afhankelijk van de waterdiepte. Met een kalibratiefactor zijn de formules aangepast ten behoeve van de huidige analyse. Dat leverde een formule op voor de golfoploop op een glad talud, die als referentie kon dienen voor de analyse.

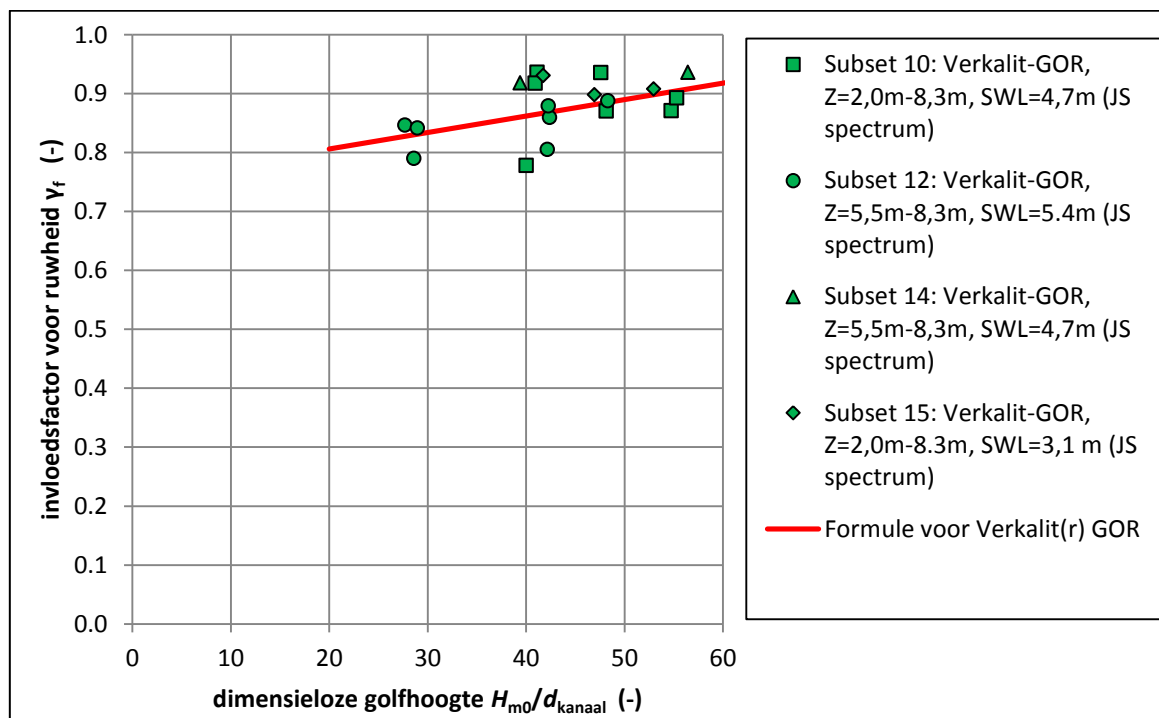
Vervolgens zijn de proeven met Hillblock[®], RONA[®] Taille en Verkalit[®] GOR vergeleken met deze referentieformule. Daarbij is gebleken dat de golfplooppeductie afneemt naarmate de golven groter worden. Kennelijk is de verhouding tussen de golfhoogte (die bepalend is voor de hoeveelheid water dat het talud oploopt) en het volume van de kanalen in de steenzetting van belang (bergend vermogen). Het zijn immers de kanalen in de steenzetting die verantwoordelijk geacht worden voor de golfplooppeductie (zowel de kanalen evenwijdig aan de dijkas als haaks daarop). Daarnaast zijn er waarschijnlijk nog meer aspecten van invloed, zoals de vorm van de kop van de zetstenen en de spleetbreedte.



Figuur 4.5 Resultaten van de analyse van de golfplooppoeven met Hillblock[®] (ruwheid bij gering overslagdebiet)



Figuur 4.6 Resultaten van de analyse van de golfploopproeven met RONA®Taille (ruwheid bij gering overslagdebiet)



Figuur 4.7 Resultaten van de analyse van de golfploopproeven met Verkalit® GOR (ruwheid bij gering overslagdebiet)

Het kanaalvolume per vierkante meter is voor de onderzochte steenzettingen (D = toplaagdikte; d_{kanaal} = kanaalvolume per m^2 taludoppervlak):

- Hillblock®, Basisblock, $D = 20$ cm: $d_{\text{kanaal}} = 0,045$ m
- Hillblock®, Slimblock, $D = 20$ cm: $d_{\text{kanaal}} = 0,058$ m
- Hillblock®, Basisblock, $D = 15$ cm: $d_{\text{kanaal}} = 0,034$ m
- Hillblock®, Slimblock, $D = 15$ cm: $d_{\text{kanaal}} = 0,048$ m
- RONA®Taille, $D = 15$ cm: $d_{\text{kanaal}} = 0,022$ m
- Verkalit® GOR, $D = 15$ cm: $d_{\text{kanaal}} = 0,021$ m

De resultaten van de analyse zijn gegeven in Figuur 4.5 t/m Figuur 4.7. Het blijkt dat de helling van de lijn door de meetpunten (afhankelijkheid van H_s/d_{kanaal}) steeds ongeveer dezelfde is, maar dat de ligging kennelijk beïnvloed wordt door de overige aspecten. De volgende formule sluit aan op de metingen (toepasbaar bij gering overslagdebiet):

$$\gamma_f = 0,0028 \frac{H_{m0}}{d_{\text{kanaal}}} + c_{\text{kanaal}} \quad \text{met als maximum } \gamma_f = 0,95 \quad (4.1)$$

Met:

- γ_f = ruwheidscoëfficiënt voor golfploop en golfoverslag (-)
- H_{m0} = significante golfhoogte aan de teen van het talud op basis van het spectrum (m)
- d_{kanaal} = volume van de kanalen per m^2 taludoppervlak (m)
- c_{kanaal} = constante, afhankelijk van type steenzetting (-)

De waarde van de constante in de formule (c_{kanaal}), die afhankelijk is van het type steenzetting met kanalen, is als volgt voor de drie onderzochte steenzettingen:

- Hillblock® (type Basisblock en type Slimblock): $c_{\text{kanaal}} = 0,69$
- RONA®Taille: $c_{\text{kanaal}} = 0,72$
- Verkalit® GOR: $c_{\text{kanaal}} = 0,75$

Als maximum is 0,95 aangehouden, omdat dit de waarde is die thans wordt aangehouden voor de wat gladdere steenzettingen. Het is echter denkbaar dat die waarde in de toekomst nog gaat veranderen.

Bovenstaande empirische formule is echter slechts afgeleid op basis van golfploopmetingen, terwijl in de praktijk de dijkhoogte doorgaans op basis van een golfoverslag criterium wordt gedimensioneerd. Als het overslagdebiet klein is, is de ruwheid Q voor golfploop en golfoverslag hetzelfde. Bij een grote overslagdebiet ontstaat er echter een verschil, zoals blijkt uit de onderzoeksresultaten van Capel (2015), zie paragraaf 3.3. Naarmate de golfoverslag over de kruin groter wordt, wordt het effect van de golfplooppremmende steenzetting minder. De taludlengte tussen de waterlijn en de kruin wordt bij het toenemen van het overslagdebiet immers steeds korter.

Daarom is er een afhankelijkheid van het golfoverslagdebiet (q), net als bij het dambord en de ribben:

$$\gamma_f = \min \left[0,0028 \frac{H_{m0}}{d_{\text{kanaal}}} + c_{\text{kanaal}} + \max \left(0,27 + 0,033 \cdot \ln \left(\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} \right); 0 \right); 0,95 \right] \quad (4.2)$$

Met:

- q = gemiddelde golfoverslagdebiet per meter dijk ($\text{m}^3/\text{m/s}$)

Deze formule is ook toepasbaar als het golfoverslagdebiet wat groter is. Het is toepasbaar zolang $\gamma_b \cdot \xi_{\text{som}} \leq 1,8$ (met γ_b = invloedsfactor voor de eventuele berm). Tussen $1,8 < \gamma_b \cdot \xi_{\text{som}} \leq 10$ gaat de ruwheidsfactor lineair naar 1.

5 Conclusies

In het kader van het “Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken” is door Deltares voor Rijkswaterstaat, drie noordelijke waterschappen (in Project Overstijgende Verkenning van HWBP: POV-Waddenzeedijken) en enkele marktpartijen onderzoek gedaan naar de volgende aspecten van steenzettingen:

- de stabiliteitsfactor voor elk van de onderzochte steenzettingen:
 - Basalton en Basalton+ van Holcim Coastal BV
 - Hillblock[®] (Basisblock en Slimblock) en Testblokken van Hillblock BV
 - RONA[®] ton en RONA[®] Taille van Altena Infra-materialen BV
 - Verkalit[®] mgv, Verkalit[®] GOR en C-Star van LBN Betonproducten BV / Berding Beton GmbH
- de ruwheidscoëfficiënt ten aanzien van de golfoploopremmende werking van 3 typen steenzettingen:
 - Hillblock[®] van Hillblock BV
 - RONA[®] Taille van Altena Infra-materialen BV
 - Verkalit[®] GOR van LBN Betonproducten BV / Berding Beton GmbH
- de ruwheidscoëfficiënt ten aanzien van de golfoverslagreducerende werking van steenzettingen die geplaatst zijn in een dambordpatroon of ribbenpatroon

De stabiliteit van Hillblock[®] (Basisblock en Slimblock) was in 2011 met Deltagootproeven vastgesteld en die resultaten zijn in het huidige onderzoek meegenomen omdat dat modelonderzoek voldeed aan de eis dat de zetstenen zowel in de hoogte, breedte als lengte correct op schaal moeten zijn weergegeven.

Stabiliteitsfactor

De stabiliteitsfactor gaat opgenomen worden in het rekenmodel Steentoets, waarmee steenzettingen getoetst en ontworpen worden. De introductie van de stabiliteitsfactor daarin zorgt ervoor dat de specifieke stabiliteit van elk type steenzetting goed wordt weergegeven door het rekenmodel, rekening houdend met een veiligheidsmarge. Het zorgt ervoor dat de steenzettingen die een hoge stabiliteit hebben volgens de proeven in de Deltagoot met een kleinere dikte kunnen worden ontworpen dan de steenzettingen met een lage stabiliteit.

De stabiliteitsfactoren die afgeleid zijn uit de Deltagootproeven zijn gegeven in Tabel 5.1.

Deze stabiliteitsfactoren zijn afgeleid op basis van Steentoets2014, versie 14.1.2.1, behalve die voor Verkalit[®]. Verkalit[®] kan met een veel fijner filter dan de andere steenzettingen toegepast worden. Daardoor was het nodig om het toepassingsgebied van Steentoets uit te breiden, zoals nader is toegelicht in bijlage C. De stabiliteitsfactor voor Verkalit[®] mgv en Verkalit[®] GOR is afgeleid op basis van de aangepaste versie van Steentoets met als werknaam: Steentoets-V. Inmiddels zijn Steentoets2014 en Steentoets-V samengevoegd in Steentoets2015.

Door de invoering van de stabiliteitsfactor zal de benodigde toplaagdikte van het ene type steenzetting anders zijn dan die van een ander type voor een concrete toepassing. Een indruk van de verschillen is voor twee voorbeelden te zien in Tabel 2.3.

Type zetsteen	Stabiliteitsfactor
Basalton (Holcim Coastal BV)	0,98
Basalton+ (Holcim Coastal BV)	1,18
Testblokken (Hillblock BV)	0,85
Hillblock [®] type Basisblock (Hillblock BV)	1,19
Hillblock [®] type Slimblock (Hillblock BV)	1,19
RONA [®] ton (Altena Infra-materialen BV)	1,19
RONA [®] Taille (Altena Infra-materialen BV)	0,89
Verkalit [®] mgv (LBN Betonproducten BV / Berding Beton GmbH)	0,89
Verkalit [®] GOR (LBN Betonproducten BV / Berding Beton GmbH)	0,70
C-Star (LBN Betonproducten BV / Berding Beton GmbH)	1,17

Tabel 5.1 Uit de proefresultaten afgeleide stabiliteitsfactoren

Hoewel de proeven zijn uitgevoerd met zetstenen die op ware grootte een hoogte hebben van 30 à 35 cm is de afgeleide stabiliteitsfactor toepasbaar in een brede range van zuil- en blokhoogtes, namelijk van 15 cm tot 60 cm hoog (zie NEN7024). Deltagootproeven uit het verleden hebben laten zien dat een verandering van de zuilhoogte bij gelijkblijvend grondoppervlak tot op zekere hoogte niet leidt tot een significant afwijkende stabiliteit ten opzichte van de trend volgens Steentoets (Klein Breteler 2014). Daarom wordt er van uitgegaan dat de resultaten in de genoemde range toepasbaar zijn. Er geldt echter als voorwaarde dat de vorm van de zetstenen niet wezenlijk mag worden aangepast bij het wijzigen van de hoogte van de zetsteen.

Het toepassingsgebied strekt zich daardoor, afhankelijk van de omstandigheden, uit tot een significante golfhoogte van maximaal ca. 4,5 m.

De stabiliteit van sommige type steenzettingen waren volgens de Deltagootproeven hoger dan voorheen berekend werd met Steentoets, waarvoor nu een aanpassing in Steentoets is aangebracht. Deze hoge stabiliteit betekent dat het een hightech systeem is, dat zijn stabiliteit onder andere ontleent aan een optimale samenwerking tussen de betonnen elementen en het inwasmateriaal, of door de interlocking. Om deze hoge stabiliteit ook in de praktijk te kunnen bereiken, is het essentieel dat ook in de praktijk ervoor gezorgd wordt dat deze optimale samenwerking gerealiseerd wordt. Dat vereist gedetailleerde instructies voor de aannemer en nauwgezet toezicht tijdens de aanleg van deze steenzettingen. Daarnaast moet bij beheer & onderhoud erop gelet worden dat bij de typen die bestaan uit ingewassen zetstenen het inwasmateriaal altijd in voldoende mate aanwezig is.

Golfoverslagreductie met dambordpatroon of ribbenpatroon

In de Scheldegoot van Deltares is op kleine schaal de golfoverslag reducerende werking van speciale patronen van steenzettingen onderzocht. Door de sets (van ongeveer 1 m²) van verschillende hoogte door elkaar te gebruiken, ontstaat een zeer ruw taludoppervlak (zie Figuur 1.2 en Figuur 3.1). De volgende formule is afgeleid uit de proefresultaten:

$$\gamma_f = 1 + 0,585 \cdot \sqrt{0,075 - s_{om}} \cdot \sqrt{\delta_{ruw}} \cdot \ln \left(\frac{q}{\sqrt{g} \cdot H_{m0}^3} \right) \quad (5.1)$$

$$\delta_{ruw} = \frac{A_{nok} \cdot \sin \alpha}{\min(h_k; z_{2\%})} \quad (5.2)$$

Met:

γ_f	= ruwheidscoëfficiënt die toegepast kan worden in golfloop- en golfverslag-formules (-)
δ_{ruw}	= ruwheidsdichtheid: het gemiddelde aanstroomoppervlak van de uit het talud stekende nokken per m ² oplooptong tot de kruin, maar niet hoger dan de golfloop-hoogte $z_{2\%}$ (-)
A_{nok}	= het gemiddelde aanstroomoppervlak van de uit het talud stekende nokken per meter dijk, zie Figuur 3.5 (m)
h_k	= kruinhoogte ten opzichte van de stilwaterlijn (m)
$z_{2\%}$	= golfloophoogte ten opzichte van de stilwaterlijn die door 2% van de golven wordt overschreden (m)
S_{om}	= $H_{m0}/(gT_{m-1,0}^2/(2\pi))$ = golfsteilheid op basis van $T_{m-1,0}$ (-)
H_{m0}	= significante golfhoogte berekend uit het spectrum ($\approx H_s$) (m)
$T_{m-1,0}$	= spectrale golfperiode (-)
g	= versnelling van de zwaartekracht (m/s ²)
α	= taludhelling (°)
q	= gemiddelde golfverslagdebië (m ³ /m/s)

De ruwheidscoëfficiënt is afhankelijk van onder andere het oppervlak aan opstaande nokken (per meter dijk) waartegen de golfloop aanbotst, zie Figuur 3.5. Deze nokken worden meegeteld van iets onder de waterlijn (ongeveer $0,35H_{m0}$ à $0,4H_{m0}$ eronder, zie formule (3.3)) tot aan het golfloopniveau dat door 2% van golven wordt overschreden ($z_{2\%}$). Daarbij moet ook rekening gehouden worden met het feit dat niet de volle nokhoogte wordt meegeteld als de nokken hoger zijn dan de dikte van de oplooptong, zie formule (3.4).

Golfloopreductie van steenzettingen met kanalen

Aanvullend op de stabiliteitsproeven is ook de golfloopremmende werking van 4 typen steenzettingen in de Deltagoot bepaald. Hieruit is een ruwheidscoëfficiënt afgeleid die gebruikt kan worden in de formules voor golfloop en golfverslag (TAW 2002):

- Geringe overslag (Figuur 4.5 t/m Figuur 4.7):

$$\gamma_f = 0,0028 \frac{H_{m0}}{d_{kanaal}} + c_{kanaal} \quad \text{met als maximum } \gamma_f = 0,95 \quad (5.3)$$

- Algemene formule:

$$\gamma_f = \min \left[0,0028 \frac{H_{m0}}{d_{kanaal}} + c_{kanaal} + \max \left(0,27 + 0,033 \cdot \ln \left(\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} \right); 0 \right); 0,95 \right] \quad (5.4)$$

Met:

γ_f	= ruwheidscoëfficiënt voor golfloop en golfverslag (-)
H_{m0}	= significante golfhoogte aan de teen van het talud op basis van het spectrum (m)
q	= gemiddeld golfverslagdebië per meter dijk (m ³ /m/s)
d_{kanaal}	= volume van de kanalen per m ² taludoppervlak (m)

De waarde van de constante in de formule (c_{kanaal}), die afhankelijk is van het type steenzetting met kanalen, is als volgt voor de drie onderzochte steenzettingen:

- Hillblock[®] (type Basisblock en type Slimblock): $c_{kanaal} = 0,69$
- RONA[®]Taille: $c_{kanaal} = 0,72$
- Verkalit[®] GOR: $c_{kanaal} = 0,75$

Bovenstaande formules zijn toepasbaar zolang $\gamma_b \cdot \xi_{om} \leq 1,8$ (met γ_b = invloedsfactor voor de berm). Tussen $1,8 < \gamma_b \cdot \xi_{om} \leq 10$ gaat de ruwheidsfactor lineair naar 1.

Het kanaalvolume per vierkante meter is voor de onderzochte steenzettingen gegeven in Tabel 5.2.

zetsteen	Toplaagdikte (m)	Kanaalvolume per m ² (d_{kanaal}) (m)
Hillblock [®] , Basisblock	0,20	0,045
Hillblock [®] , Basisblock	0,15	0,034
Hillblock [®] , Slimblock	0,20	0,058
Hillblock [®] , Slimblock	0,15	0,048
RONA [®] Taille	0,15	0,022
Verkalit [®] GOR	0,15	0,021

Tabel 5.2 Kanaalvolume per m² voor de onderzochte steenzettingen (modelwaarden zoals in de Deltagoot; in werkelijkheid is d_{kanaal} twee maal zo groot bij 2 maal grotere toplaagdikte)

De ruwheidscoëfficiënt blijkt afhankelijk te zijn van de verhouding tussen de significante golfhoogte en het volume aan kanalen per vierkante meter taludoppervlak (toegankelijke holle ruimte waarin een deel van de oploop kan worden geborgen). Bij een significante golfhoogte van $H_{m0} = 1,5$ m en toplaagdikte $D = 0,3$ m, is de ruwheidscoëfficiënt bij een klein overslagdebiet van Hillblock[®] type Basisblock, Hillblock[®] type Slimblock, RONA[®] Taille en Verkalit[®] GOR respectievelijk 0,76, 0,73, 0,82 en 0,83.

6 Referenties

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

Capel, A. (2015)
Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken
Ruwheid ten aanzien van golfoverslag van steenzetting met dambordpatroon en
ribbenpatroon
Deltares rapport 1208618-005, mei 2015

Kaste, D. (2016a)
Stabiliteit van Verkalit® mgv steenzetting bij golfaanval
Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken
Deltares rapport 1208618-010, 22 maart 2016

Kaste, D. (2016b)
Stabiliteit van Verkalit® GOR steenzetting bij golfaanval
Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken
Deltares rapport 1208618-010, 22 maart 2016

Kaste, D. en G.C. Mourik (2016c)
Stabiliteit van Basalton 30 STS+ steenzetting bij golfaanval,
Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken,
Deltares rapport 1208618-008, 22 maart 2016

Klein Breteler, M. (2014)
Validatie van Steentoets2014
Rekenmodel voor het beoordelen van de stabiliteit van steenzettingen
Deltares rapport 1208045-009, 3 februari 2014

Mourik, G.C. (2016a)
Stabiliteit van RONA® ton steenzetting bij golfaanval
Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken
Deltares rapport 1208618-011, 22 maart 2016

Mourik, G.C. (2016b)
Stabiliteit van RONA® Taille steenzetting bij golfaanval
Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken
Deltares rapport 1208618-017, 22 maart 2016

NEN7024
Zetsteen - Deel 1: Algemene eisen
ICS 91100.30; 93.160, april 2015

- Steeg, P. van (2012)
Stabiliteit van taludbekleding met Hillblock® bij golfaanval
Grootschalig modelonderzoek in de Deltagoot
Deltares rapport 1202901-000, januari 2012
- Steeg, P. van (2016)
Stabiliteit van steenzetting met Testblokken bij golfaanval
Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken
Deltares rapport 1208618-009, 22 maart 2016
- Steeg, P. van (2015b)
Analyse golfploopreductie Hillblock taludbescherming
Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken
Deltares rapport 1208618-009, 28 oktober 2015
- Steeg, P. van (2015c)
Golfploopreductie Verkalit® GOR taludbescherming
Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken
Deltares rapport 1208618-004, 28 oktober 2015,
- Steeg, P. van (2015d)
Golfploopreductie RONA® Taille taludbescherming
Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken
Deltares rapport 1208618-004, 28 oktober 2015
- TAW (2002)
Technisch Rapport Golfploop en Golfoverslag bij Dijken,
Delft, mei 2002
- Wolters, G. (2016a)
Stabiliteit van Basalton 30 STS steenzetting bij golfaanval,
Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken,
Deltares rapport 1208618-007, 25 maart 2016
- Wolters, G. (2016b)
Stabiliteit van C-Star steenzetting bij golfaanval
Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken
Deltares rapport 1208618-016, 22 maart 2016

A Procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor voor geklemde steenzettingen zonder interlocking

A.1 Inleiding

Het “Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken” is gericht op het vaststellen van een stabiliteitsfactor, waarmee het resultaat van Steentoets-berekeningen zodanig gaat worden gecorrigeerd dat het overeenkomt met de proefresultaten uit de Deltagoot, rekening houdend met een veiligheidsfactor.

De stabiliteitsfactor is voor elk type steenzetting anders en wordt voor de gebruiker onzichtbaar opgenomen in Steentoets. De benodigde toplaagdikte volgens Steentoets moet in het programma gedeeld worden door deze stabiliteitsfactor om rekening te houden met de specifieke stabiliteit van het betreffende type steenzetting. Hierdoor zal een type steenzetting met een hoge stabiliteitsfactor (die goed scoorde in de Deltagootproeven) voor een concreet ontwerp een kleinere toplaagdikte nodig hebben dan een met een lage stabiliteitsfactor.

In deze bijlage is de door Rijkswaterstaat vastgestelde methode beschreven waarmee de stabiliteitsfactor kan worden bepaald voor geklemde steenzettingen zonder interlocking op basis van de Deltagootproeven. De methode bestaat uit het interpreteren van de proefresultaten en het vervolgens berekenen van een stabiliteitsfactor, waarbij rekening gehouden wordt met een veiligheidsmarge.



Figuur A.1 Golfaanval op testsectie van Basalton.

A.2 Interpretatie van de proeven

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

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

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

Ten aanzien van de eerste twee series wordt de bezwijkgolfhoogte gelijkgesteld aan het gemiddelde tussen de H_{m0} waarbij nog net geen bezwijken optrad en de H_{m0} waarbij dat wel het geval was. Bij de derde serie is de totale proefduur tot het optreden van bezwijken, in combinatie met de golfcondities, het uiteindelijke proefresultaat.

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

Omdat vanwege de beperkte golfhoogte in de Deltagoot het denkbaar is dat het niet lukt om de steenzetting te laten bezwijken, is de procedure voor het bepalen van de bezwijkgolfhoogte verder uitgedetailleerd (zie paragraaf 2.4 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 het bezwijken bij een veel hogere golfhoogte optreedt dan 15% boven de maximale golfcondities. In dat geval wordt alleen gebruikgemaakt van het resultaat van de langeduurproef.
- 4 Als tijdens de langeduurproef er geen bezwijken optreedt, wordt aangenomen dat er wel bezwijken zou zijn opgetreden als de proef 20% langer had geduurd.
- 5 Als tijdens geen enkele proevenserie de steenzetting is bezweken, wordt aangenomen dat er wel bezwijken zou zijn opgetreden tijdens de langeduurproef met een proefduur die 20% groter is dan de uitgevoerde proefduur. Dit is dan het enige proefresultaat op basis waarvan de stabiliteitsfactor wordt afgeleid. De fictieve proef van punt 3 wordt dan niet toegevoegd, omdat het doorstaan van de langeduurproef impliceert dat het bezwijken bij een veel hogere golfhoogte optreedt dan 15% boven de maximale golfcondities.

A.3 Bepaling stabiliteitsfactor

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

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

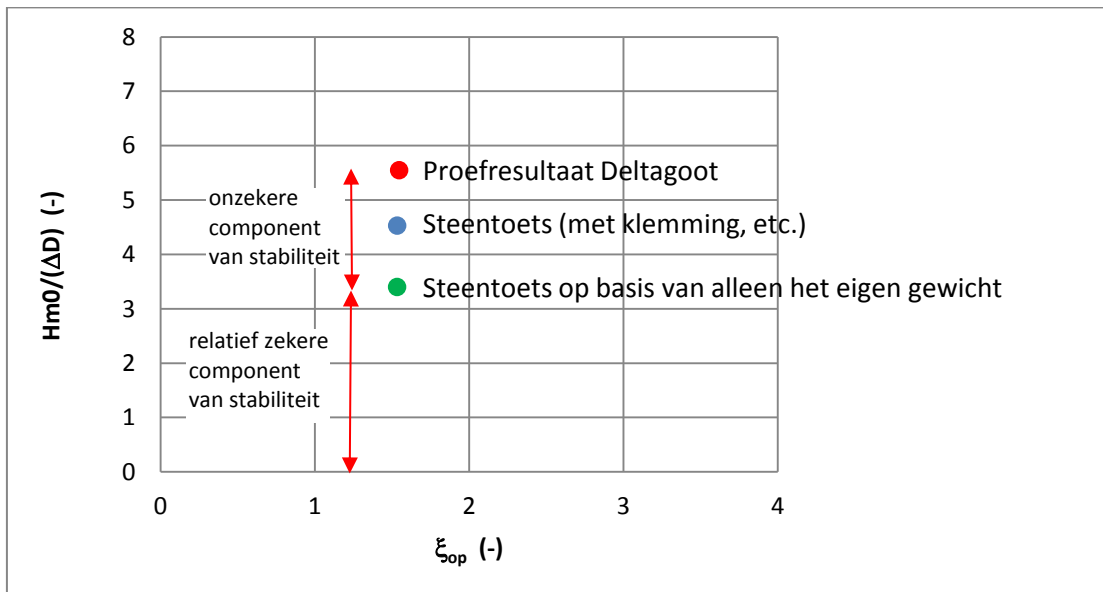
Bij het stap voor stap groter maken van de golfbelasting zal er namelijk in eerste instantie geen vrees zijn dat de steenzetting gaat bezwijken. Pas als de golfhoogte ten opzichte van de afmetingen van de toplaag groot begint te worden, kan er schade gaan optreden. Aangenomen kan worden dat er schade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

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

Normaal gesproken is de stabiliteit volgens Steentoets op basis van eigen gewicht het kleinste, die volgens Steentoets met klemming iets groter en die in de modelproeven het grootste. Dit is schematisch weergegeven in Figuur A.2.

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

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



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

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

$$f_{stab} = \frac{\left(\frac{H_{m0}}{\Delta D_{in modelproeven}} - \frac{H_{m0}}{\Delta D_{STEigengewicht}} \right) / \gamma + \frac{H_{m0}}{\Delta D_{STEigengewicht}}}{\frac{H_{m0}}{\Delta D_{Steentoets}}} \quad (A.1)$$

Met:

H_{m0} = significante golfhoogte bij bezwijken in de Deltagoot (-)

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

γ = veiligheidsfactor (-)

Dit kan vereenvoudigd worden tot:

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

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

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

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

Met:

σ = standaardafwijking in de proefresultaten

Er is hier gekozen voor een minimumwaarde van 1,1 bij $\sigma = 0$, omdat het voor kan komen dat de standaardafwijking bijzonder klein is. Verder kan het voorkomen dat er maar één meetpunt is omdat er geen schade is opgetreden tijdens de 3 proevenseries, zodat er geen standaardafwijking is. In dat geval wordt er gerekend met een standaardafwijking van 0,05, hetgeen overeenkomt met proeven op steenzettingen waarbij de standaardafwijking klein was.

Het berekenen van de stabiliteitsfactor is met deze methode vrij gecompliceerd, omdat ook de stabiliteit op basis van alleen het eigen gewicht (zonder klemming en zonder eventuele kanalen) moet worden meegewogen. Omdat dit eenmalig moet gebeuren, is dit geen bezwaar.

De stabiliteitsfactor is gerelateerd aan een specifieke Steentoets-versie en wordt hard ingeprogrammeerd in Steentoets. Hij is dus onzichtbaar voor de gewone gebruiker.

B Procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor voor flexibele steenzettingen met interlocking

B.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 flexibele steenzettingen met interlocking, zoals Verkalit[®] (mgv en GOR). 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 (zie bijlage C). De stabiliteitsfactor voor Verkalit[®] 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.

B.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_{m0} waarbij nog net geen bezwijken optrad en de H_{m0} waarbij dat wel het geval was. Bij de derde serie is de totale proefduur tot het optreden van bezwijken, in combinatie met de golfcondities, het uiteindelijke proefresultaat.

Omdat elk van deze series een waardevol proefresultaat 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.

Vanwege de beperkte golfhoogte in de Deltagoot is het denkbaar dat het niet lukt om schade te krijgen aan de steenzetting, en daarom is de procedure voor het bepalen van de bezwijkgolfhoogte verder uitgedetailleerd (zie paragraaf 2.4 voor omschrijving schade-categorieën):

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

B.3 Bepaling van stabiliteitsfactor

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

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 die door 15% op basis van gewicht wordt onderschreden), 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:

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

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: $\gamma = 1,1 + 1,89 \cdot \sigma$ (B.2)

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

Met:

σ = standaardafwijking in de proefresultaten (-)

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

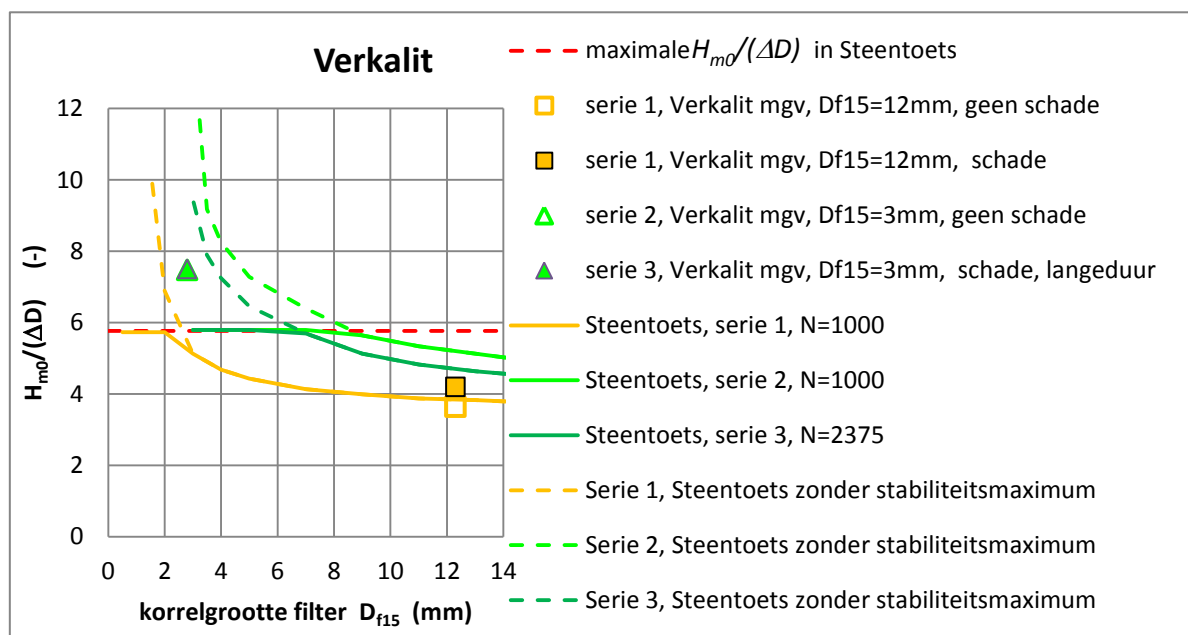
Inmiddels zijn Steentoets2014 en Steentoets-V samengevoegd in Steentoets2015.

C Aanpassing Steentoets voor open steenzettingen op een fijn filter

C.1 Inleiding

De stabiliteit van steenzettingen wordt in Steentoets berekend op basis van de leklengtetheorie. 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[®] in de proevenserie 2 t/m 8, lopen we tegen deze beperkingen aan.

Een consequentie van de beperkingen is te zien in Figuur C.1, waarin de toelaatbare $H_{m0}/(\Delta D)$ 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 leklengte 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 leklengte en de maximale $H_{m0}/(\Delta D)$ op de grens van stabiel en instabiel (de rode stippellijn). De huidige begrenzings in Steentoets zijn nader toegelicht in bijlage E.



Figuur C.1 Gemeten en berekende $H_{m0}/(\Delta D)$ 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 C.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 geïnventariseerd, 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.

C.2 Grens voor de toepasbaarheid van Steentoets2014

Steentoets is alleen toepasbaar vanaf een bepaalde korrelgrootte van het filter en daarom zijn er diverse begrenzings aangebracht (zie bijlage E). Als de korrelgrootte te klein is, dreigt Steentoets zonder begrenzings de stabiliteit te overschatten. Bij erg kleine korrelgrootte wordt de stabiliteit volgens Steentoets zonder begrenzings 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 C.1. In alle gevallen is gerekend zonder klemming.

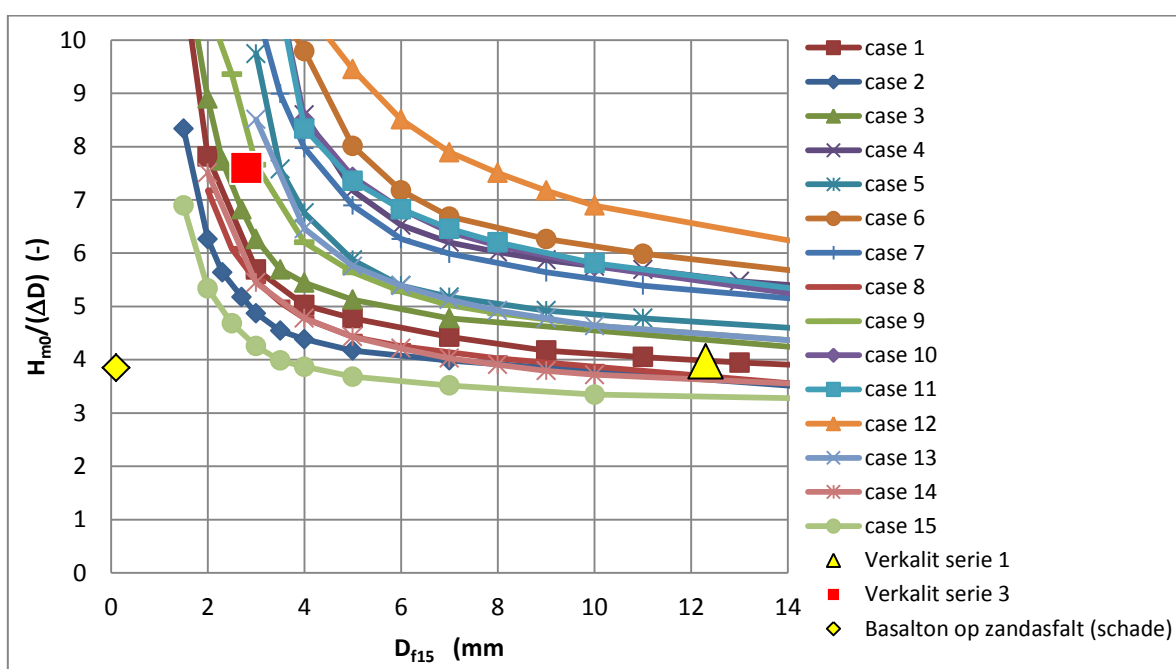
Case	s_{op} (-)	$\tan\alpha$ (-)	D (m)	Ω (%)	b (m)	$D_{f15, \text{grens}}$ (mm)	Λ_{grens} (m)	Λ_{grens}/D (-)
1	0,02	0,33	0,15	6,5	0,07	3	0,092	0,61
2	0,02	0,33	0,15	6,5	0,10	3	0,110	0,73
3	0,04	0,33	0,15	6,5	0,10	2,7	0,104	0,69
4	0,04	0,33	0,40	6,5	0,10	6	0,210	0,53
5	0,03	0,33	0,40	6,5	0,10	5	0,199	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 C.1 Eigenschappen van de doorgerekende cases en de resultaten van de analyse

Bij elk van deze cases is de $H_{m0}/(\Delta D)$ op de grens van bezwijken en nog geen 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 C.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 leklengtetheorie, 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 C.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.

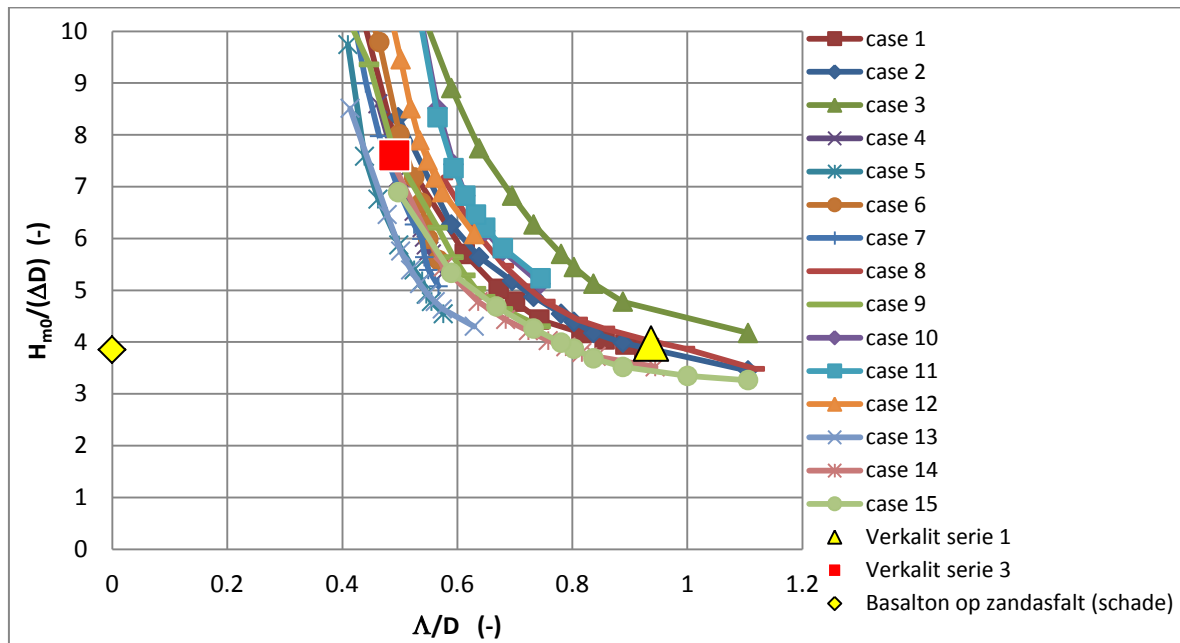


Figuur C.2 Stabiliteit volgens Steentoets (zonder grenzen ten aanzien van de korrelgrootte of stabiliteit) als functie van de korrelgrootte van het filter voor de 15 cases en ter oriëntatie enkele meetpunten uit de Deltagoot (Verkalit®: halverwege het meetpunt waarbij bezwijken optrad en en waarbij er nog geen bezwijken was opgetreden)

In de tabel is ook de leklengte gegeven bij de grens van de toepasbaarheid van Steentoets. Als deze leklengte dimensieloos gemaakt wordt met de toplaagdikte, blijkt de variatie ervan vrij beperkt te zijn. Deze dimensieloze leklengte op de grens, Λ_{grens}/D , is in de laatste kolom van Tabel C.1 gegeven. Deze dimensieloze leklengte lijkt dus geschikt te zijn om te gebruiken als grens tot waar Steentoets met de leklengtetheorie bruikbaar is. In Figuur C.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 leklengtetheorie 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 zandafalt. Dat wordt verder uitgewerkt in het volgende hoofdstuk. Voor de empirische relatie wordt in de buurt van de grens van de toepasbaarheid van de leklengtetheorie 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 leklengtetheorie naar de empirische relatie.



Figuur C.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 waarbij bezwijken optrad en en waarbij er nog geen bezwijken was opgetreden)

C.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:

- huidige Deltagootonderzoek met Verkalit® mgv
- Basalton op zandafalt (Klein Breteler, 2000)

Eind negentiger jaren is Basalton op zandafalt beproefd in de Deltagoot, zonder granulaire filter tussen de Basalton en het zandafalt. De proeven zijn uitgevoerd met een talud van 1:3,5 en een berm op de waterlijn. In dit verband wordt het zandafalt geschematiseerd tot een zeer fijn filter met korrelgrootte van bijna nul. Er is toen begin van bezwijken geconstateerd bij $H_{m0}/(\Delta D) = 3,85$ 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):

$$\left\{ \frac{H_{m0}}{\Delta D} \right\}_{\max} = 7 \left(\min(\xi_{op}; 2) \right)^{-1/3} + \max \left(0,5 \cdot (\min(\xi_{op}; 5) - 2); 0 \right) \frac{f_{duur}}{f_{\beta}} \quad (C.1)$$

Met:

- H_{m0} = 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} = $H_{m0}/(g T_p^2/(2\pi))$ = 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 (-)

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 (C.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 (C.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 $C_{\text{fijnfilter}}$ en wordt daardoor:

$$\left\{ \frac{H_{m0}}{\Delta D} \right\}_{\max} = \left(7 \left(\min(\xi_{op}; 2) \right)^{-1/3} + \max \left(0,5 \cdot (\min(\xi_{op}; 5) - 2); 0 \right) \right) \frac{f_{duur}}{f_{\beta}} C_{\text{fijnfilter}} \quad (C.2)$$

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

Met:

- Λ = $\sqrt{(b D k/k')}$ = lek lengte (m)
- $C_{\text{fijnfilter}}$ = 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 $C_{\text{fijnfilter}}$ is weergegeven in Figuur C.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[®] 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 C.4.

Deze extra factor $C_{\text{fijnfilter}}$ 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 C.4).

Helaas blijkt echter Δ/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 zandafalt 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 $0 < \Lambda/D < 0,3$ (linker deel van Figuur C.4).

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

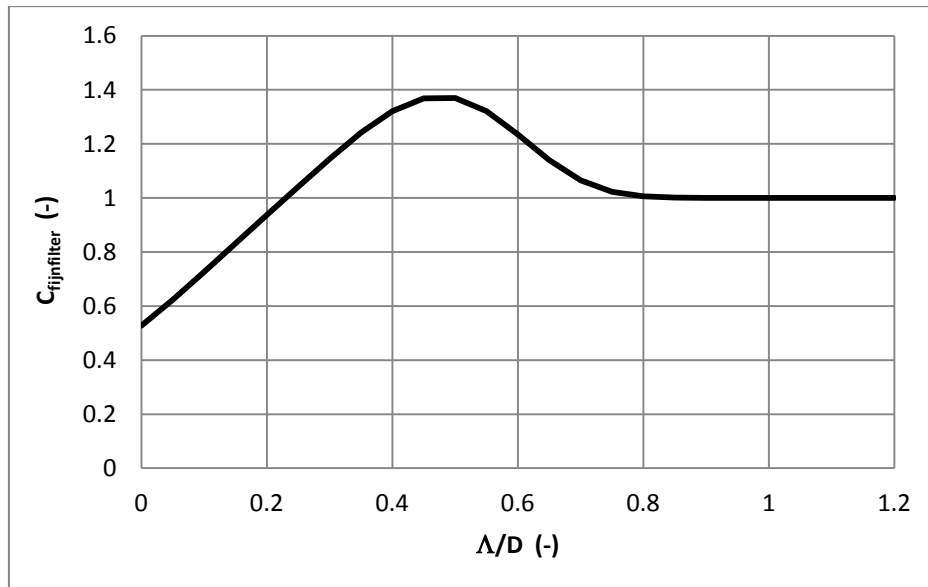
$$L_D = \frac{\Lambda}{D} \cdot \max(0; \min(0,6 + \log(1000D_{f15}); 1)) \quad (C.4)$$

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

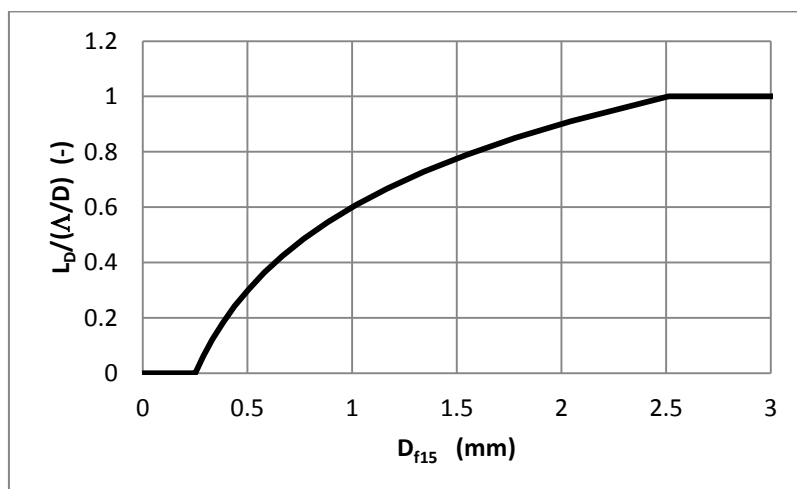
Met:

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

L_D = dimensieloze factor (-)

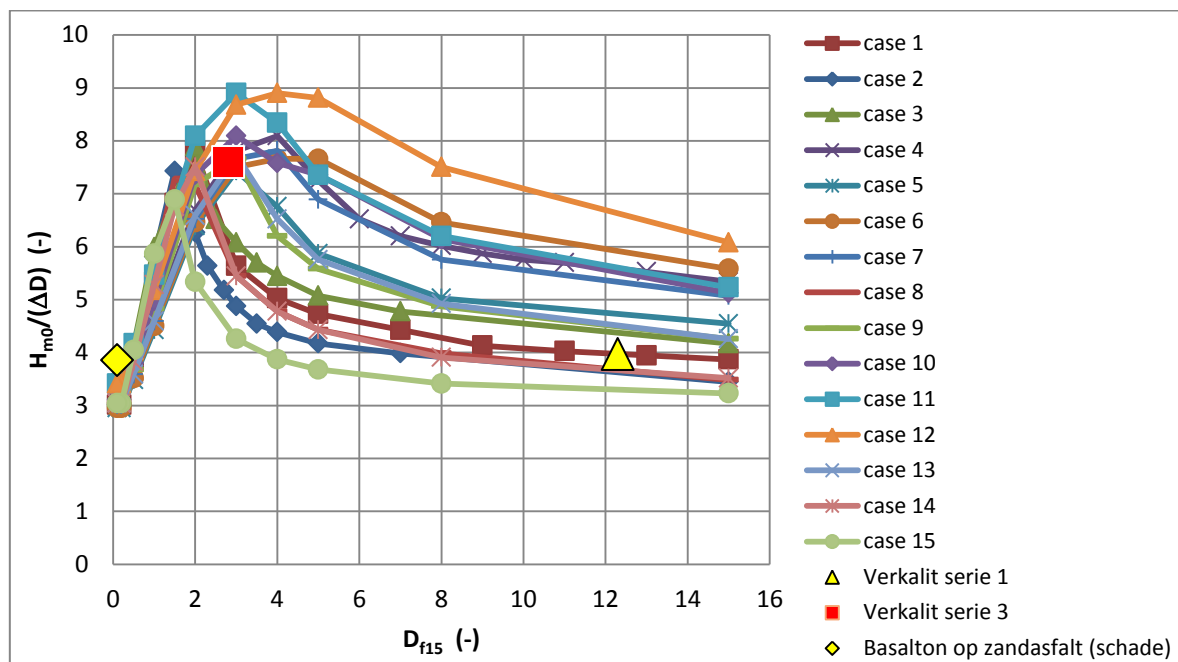


Figuur C.4 Extra factor in verband met een fijn filter voor de begrenzing van de stabiliteit (maximale waarde van $H_{mo}/(\Delta D)$)

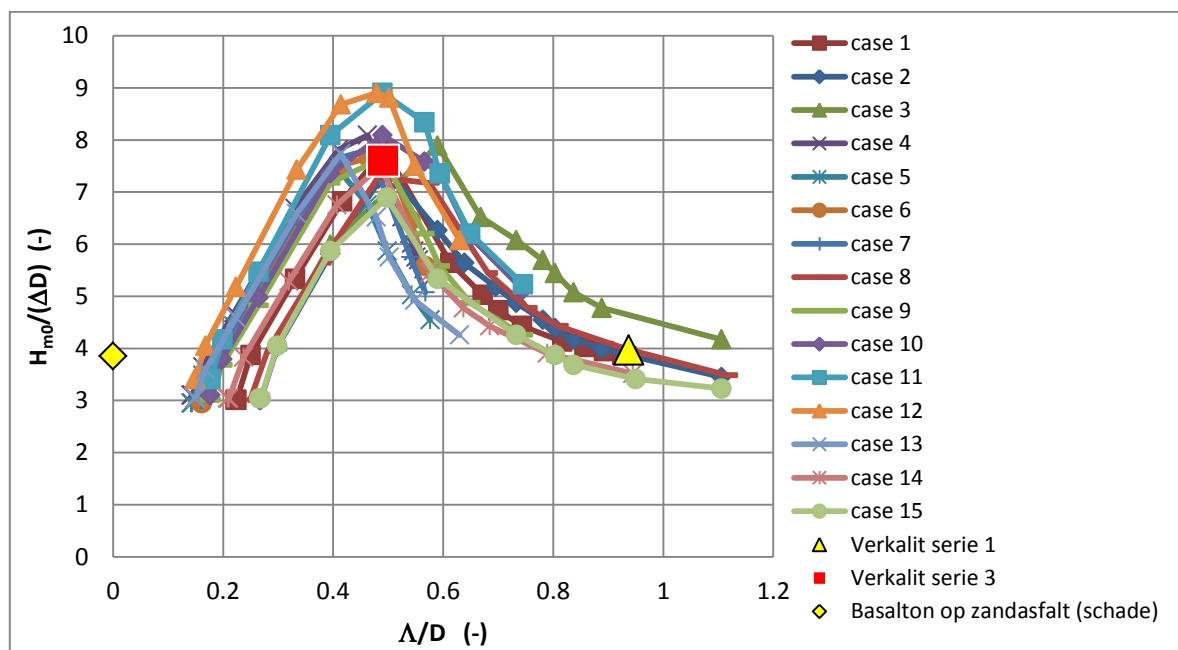


Figuur C.5 Invloedsfactor als functie van de korrelgrootte van het filter

De formule voor L_D is weergegeven in Figuur C.5. Met deze aanvulling is het doel bereikt: er is nog steeds een goede aansluiting op de normale steenzettingen (lek lengtetheorie), 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 zandasfalt).



Figuur C.6 Stabiliteit volgens Steentoets-V, waarin formule (C.2), (C.4) en (C.5) zijn toegevoegd, als functie van de korrelgrootte voor de 15 cases en ter oriëntatie enkele meetpunten uit de Deltagoot (Verkalit®: halverwege het meetpunt waarbij bezwijken optrad en waarbij er nog geen bezwijken was opgetreden)



Figuur C.7 Stabiliteit volgens Steentoets, waarin formule (C.2), (C.4) en (C.5) zijn toegevoegd, als functie van de dimensieloze lek lengte voor de 15 cases en ter oriëntatie enkele meetpunten uit de Deltagoot (Verkalit®: halverwege het meetpunt waarbij bezwijken optrad en waarbij er nog geen bezwijken was opgetreden)

De formules (C.2), (C.4) en (C.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 C.6 en Figuur C.7.

Door deze figuren te vergelijken met Figuur C.2 en Figuur C.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 zandafsluit. Aan de linkerzijde in Figuur C.7 stoppen de lijnen bij $\Delta/D \approx 0,2$ omdat bij een hele kleine korrelgrootte van het filter de lek lengte 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 C.6.

C.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 2016a) en drie proevenserie met 'Verkalit® GOR' (Kaste 2016b). 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 $H_{m0}/(\Delta D)$ 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 C.2.

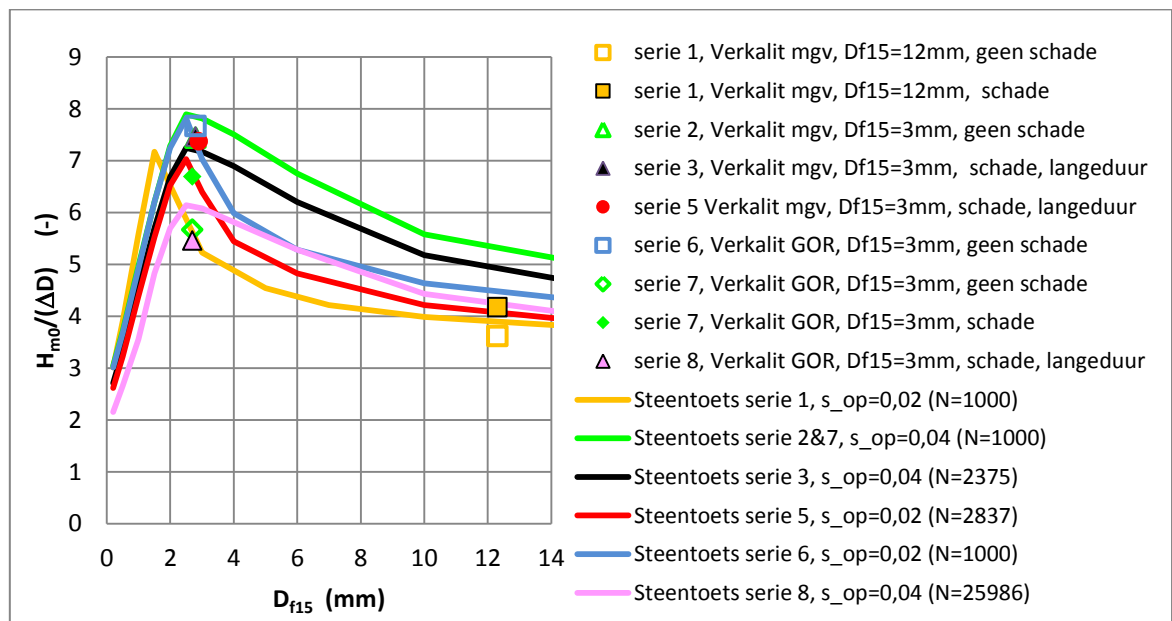
type	serie	proef	D_{f15} (mm)	b (m)	D (m)	S_{om}	N langeduur	$H_{m0}/\Delta D$ bij s/gs
Verkalit® mgv	1	P01+P02	12,3	0,070	0,152	0,024		3,91
Verkalit® mgv	2	P09+fictief	2,8	0,049	0,152	0,042		8,03
Verkalit® mgv	3	P9+P10	2,8	0,049	0,152	0,042	2375	7,50
Verkalit® mgv	5	P22+P23	2,9	0,049	0,152	0,024	2837	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 C.2 Proevenprogramma Verkalit® (D_{f15} = korrelgrootte filter; b = filterlaagdikte; $S_{om} = H_{m0}/(1,56T_{m-1,0}^2)$;

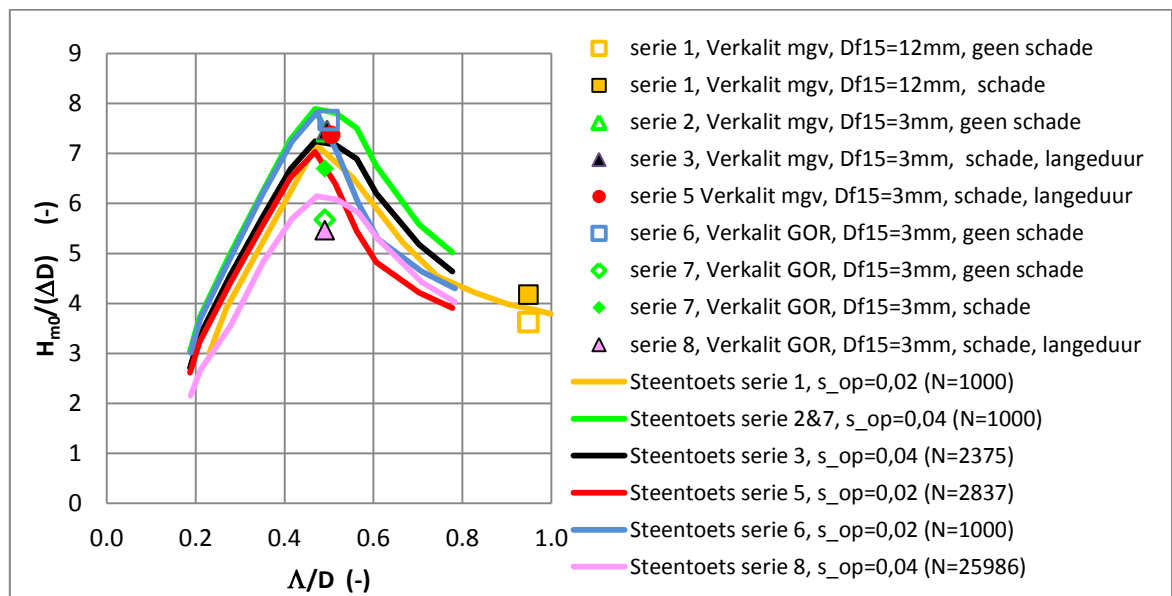
$H_{m0}/\Delta D_{bij\ s/gs}$ = stabiliteit op de grens van wel/niet bezwijken).

De resultaten van de belangrijkste proeven (hoogste golfcondities waarbij de steenzetting niet bezweek en laagste golfcondities waarbij bezwijken optrad) zijn Figuur C.8 en Figuur C.9 gegeven, samen met de rekenresultaten van de aangepaste Steentoets (met formule (C.2), (C.4) en (C.5)). Voor Verkalit® 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 C.8 Gemeten stabiliteit van Veralit® in de Deltagoot en rekenresultaten met Steentoets-V als functie van de korrelgrootte van het filter



Figuur C.9 Gemeten stabiliteit van Veralit® in de Deltagoot en rekenresultaten met Steentoets-V als functie van de dimensieloze leklengte

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 Veralit® 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 Hillblock®. 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.

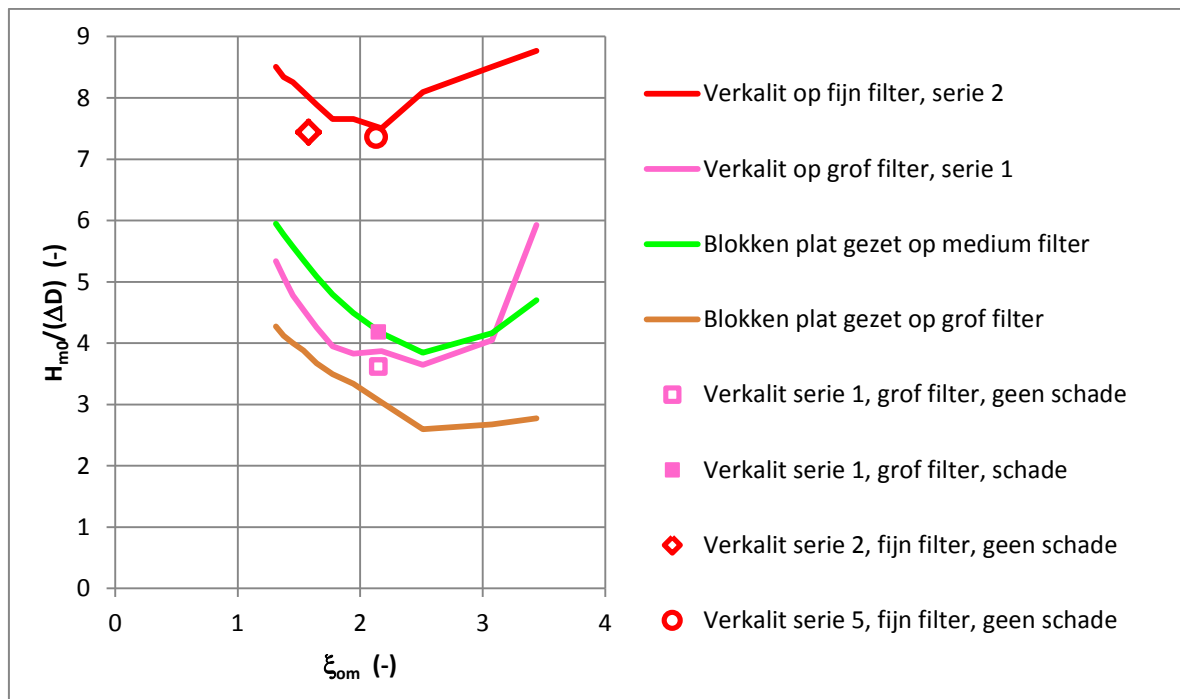
In Figuur C.10 is de stabiliteit van Verkalit[®] gegeven volgens de hier aangepaste Steentoets-V (met stabiliteitsfactor gelijk aan 1) in een grafiek met ξ_{som} op de horizontale as, samen met enkele meetpunten uit de Deltagoot. Er is gerekend met Verkalit[®] op Deltagootschaal en met het in de Deltagoot toegepast 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 C.10 Stabiliteit volgens de normale Steentoets voor plat gezette blokken en blokken op hun kant en volgens de hier aangepaste Steentoets-V voor Verkalit[®] ($f_b = 0,5$)

Inmiddels zijn Steentoets2014 en Steentoets-V samengevoegd in Steentoets2015.

D Uitgevoerde proeven in de Deltagoot

In deze bijlage wordt gebruikgemaakt van de volgende symbolen:

- h = waterdiepte (m)
 H_{m0} = significante golfhoogte berekend uit het spectrum ($\approx H_s$) (m)
 $T_{m-1,0}$ = spectrale golfperiode (s)
 T_p = golfperiode bij de piek van het spectrum (s)
 S_{op} = $H_{m0}/(gT_p^2/(2\pi))$ = golfsteilheid op basis van T_p (-)
 N = aantal golven tijdens de proef (-)
 ξ_{om} = $\tan\alpha/\sqrt{H_{m0}/(gT_{m-1,0}^2/(2\pi))}$ = brekerparameter (-)
 D = dikte van de toplaag van de steenzetting (zuilhoogte) (m)
 Δ = $(\rho_b - \rho)/\rho$ = relatieve soortelijke massa van de zetstenen (-)

	proef	h (m)	H_{m0} (m)	$T_{m-1,0}$ (s)	T_p (s)	S_{op} (-)	N (-)	ξ_{om} (-)	$H_{m0}/(\Delta D)$ (-)	schade
serie 1	P01	4.55	0.62	3.80	4.45	0.020	532	2.02	3.18	a
	P02	4.70	0.89	4.78	5.29	0.020	1217	2.11	4.59	a
	P03	4.70	1.12	5.28	6.00	0.020	681	2.08	5.77	d
serie 2	P04	4.55	0.67	3.04	3.08	0.045	647	1.55	3.43	a
	P05	4.70	0.71	3.16	3.61	0.035	634	1.57	3.66	a
	P06	4.70	0.98	3.83	4.01	0.039	1080	1.61	5.07	a
	P07	4.70	1.18	4.13	4.28	0.041	627	1.58	6.09	d
serie 3a	P08	4.70	0.70	3.15	3.15	0.045	629	1.57	3.59	a
	P09	4.70	0.85	3.53	3.98	0.034	1598	1.60	4.36	a
	P10	4.70	0.85	3.49	3.81	0.038	1772	1.58	4.39	c
	P11	4.70	0.89	3.54	4.01	0.035	735	1.56	4.59	d
serie 3b	P12	4.70	0.87	3.52	3.77	0.039	2315	1.57	4.51	b
	P13	4.70	0.90	3.55	3.80	0.040	1365	1.56	4.66	d

Tabel D.1 Uitgevoerde proeven met Basalton van Holcim Coastal BV

	proef	h (m)	H_{m0} (m)	$T_{m-1,0}$ (s)	T_p (s)	S_{op} (-)	N (-)	ξ_{om} (-)	$H_{m0}/(\Delta D)$ (-)	schade
serie 1	B01	5.40	0.76	4.60	5.02	0.019	468	2.21	3.26	a
	B02	5.60	0.99	5.21	5.69	0.020	994	2.18	4.29	a
	B03	5.60	1.13	5.59	6.09	0.020	996	2.19	4.89	a
	B04	5.60	1.33	5.93	6.48	0.020	1155	2.14	5.76	a
	B05	5.60	1.51	6.40	6.94	0.020	1148	2.17	6.50	a
	B06	5.60	1.66	6.75	7.40	0.019	1153	2.19	7.15	a
	B07	5.90	1.83	6.99	7.69	0.020	1244	2.15	7.91	a
serie 2	B08	5.60	1.09	4.08	4.37	0.037	1046	1.63	4.70	a
	B09	5.60	1.36	4.41	4.77	0.038	1089	1.57	5.86	a
	B10	5.80	1.56	4.75	5.09	0.039	1103	1.58	6.75	a
	B11	5.90	1.74	5.10	5.40	0.038	1117	1.61	7.50	a
	B12	6.00	1.96	5.43	5.69	0.039	1062	1.62	8.47	c
serie 3	B13	5.40	0.75	3.32	3.58	0.037	565	1.60	3.23	a
	B14	5.60	1.45	4.55	4.90	0.039	1603	1.58	6.25	d

Tabel D.2 Uitgevoerde proeven met Basalton+ van Holcim Coastal BV

	proef	h (m)	H _{m0} (m)	T _{m-1,0} (s)	T _p (s)	S _{op} (-)	N (-)	ξ _{om} (-)	H _{m0} /(ΔD) (-)	schade
serie 1	S01	4.55	0.62	4.02	4.42	0.020	491	2.13	2.95	a
	S02	4.70	0.93	4.98	5.30	0.021	391	2.16	4.44	d
serie 2	S03	4.55	0.54	2.75	2.83	0.043	672	1.56	2.59	a
	S04	4.70	0.67	3.12	3.28	0.040	1031	1.58	3.22	a
	S05	4.70	0.79	3.37	3.56	0.040	1034	1.58	3.80	a
	S06	4.70	0.99	3.74	3.91	0.041	463	1.57	4.73	d
serie 3	S07	4.55	0.53	2.75	2.90	0.041	440	1.57	2.56	a
	S08	4.55	0.53	2.76	2.82	0.043	441	1.58	2.54	a
	S09-a	4.70	0.67	3.17	3.40	0.037	2490	1.62	3.19	a
	S09-b	4.70	0.66	3.12	3.36	0.038	589	1.60	3.17	d
	S09-c	4.70	0.68	3.13	3.35	0.039	1807	1.58	3.24	d
	S09-d	4.70	0.72	3.15	3.36	0.041	1187	1.55	3.43	d

Tabel D.3 Uitgevoerde proeven met Testblokken van Hillblock BV

	proef	h (m)	H _{m0} (m)	T _{m-1,0} (s)	T _p (s)	S _{op} (-)	N (-)	ξ _{om} (-)	H _{m0} /(ΔD) (-)	schade
serie 1	T001	4.50	0.80	4.49	5.05	0.020	1102	2.09	2.90	a
	T002	4.50	1.01	5.06	5.62	0.020	1117	2.10	3.67	a
	T003	4.50	1.21	5.55	6.14	0.021	1086	2.10	4.40	a
	T004	4.50	1.38	5.99	6.74	0.020	1129	2.12	5.04	a
	T005	4.50	1.49	6.21	6.89	0.020	1077	2.12	5.42	a
serie 2	T006	4.50	0.98	3.90	4.21	0.035	949	1.64	3.55	a
	T007	4.50	1.23	4.33	4.63	0.037	1049	1.62	4.49	a
	T008	4.50	1.46	4.90	5.13	0.035	1007	1.69	5.31	a
serie 3	T009	4.50	1.43	4.80	5.05	0.036	4201	1.67	5.19	a
	T010	4.50	1.42	4.80	5.03	0.036	7149	1.67	5.19	a
	T011	4.50	1.42	4.80	5.04	0.036	10702	1.68	5.18	a
serie 4	T014	4.50	1.50	5.15	5.35	0.034	986	1.75	5.48	a
	T015	4.50	1.45	4.89	5.17	0.035	1017	1.69	5.27	a
	T016	3.10	0.74	3.15	3.33	0.043	953	1.52	2.70	a
	T017	3.10	0.81	4.23	4.48	0.026	1038	1.96	2.95	a
	T018	3.10	0.94	4.80	4.95	0.025	1061	2.06	3.42	a
	T019	3.10	0.91	3.75	3.84	0.040	960	1.64	3.31	a

Tabel D.4 Uitgevoerde proeven uit 2011 met Hillblock® type Basisblock en type Slimblock van Hillblock BV

	proef	h (m)	H _{m0} (m)	T _{m-1,0} (s)	T _p (s)	S _{op} (-)	N (-)	ξ _{om} (-)	H _{m0} /(ΔD) (-)	schade
serie 1	P01	4.55	0.60	4.01	4.41	0.020	497	2.16	3.71	a
	P02	4.70	0.69	4.36	4.71	0.020	1054	2.18	4.30	a
	P03	4.70	0.83	4.82	5.23	0.019	998	2.21	5.12	a
	P04	4.70	1.00	5.30	5.64	0.020	1022	2.21	6.18	a
	P05	4.70	1.20	5.74	6.21	0.020	1019	2.18	7.45	a
	P06	4.70	1.40	6.24	6.72	0.020	1007	2.19	8.70	a
	P07	4.70	1.50	6.37	6.96	0.020	1055	2.16	9.32	a
serie 2	P08	4.70	0.95	3.76	3.99	0.038	1007	1.60	5.92	a
	P09	4.70	1.19	4.20	4.39	0.040	1042	1.60	7.41	b
	P10	4.70	1.39	4.54	4.78	0.039	643	1.60	8.62	d
serie 3	P11	4.55	0.62	3.07	3.29	0.037	604	1.63	3.85	a
	P12	4.55	0.78	3.39	3.56	0.039	550	1.60	4.82	a
	P13	4.70	1.07	4.02	4.17	0.039	1826	1.62	6.61	d

Tabel D.5 Uitgevoerde proeven met RONA[®] ton van Altena Infra-materialen BV

	proef	h (m)	H _{m0} (m)	T _{m-1,0} (s)	T _p (s)	S _{op} (-)	N (-)	ξ _{om} (-)	H _{m0} /(ΔD) (-)	schade
serie 1	R01	4.55	0.71	4.32	4.73	0.020	478	2.14	3.73	a
	R02	4.70	0.84	4.80	5.05	0.021	224	2.18	4.43	d
serie 2	R03	4.55	0.70	4.31	4.73	0.020	473	2.15	3.72	a
	R04	4.70	0.84	3.47	3.65	0.041	994	1.57	4.50	b
	R05	4.70	0.99	3.77	3.97	0.040	934	1.58	5.28	d
serie 3	R12	4.70	0.73	3.23	3.46	0.039	2428	1.57	3.90	a
	R13	4.70	0.75	3.28	3.47	0.040	4780	1.58	3.98	b
	R14	4.70	0.73	3.26	3.44	0.039	2182	1.59	3.88	d

Tabel D.6 Uitgevoerde proeven met RONA[®] Taille van Altena Infra-materialen BV

	proef	h (m)	H _{m0} (m)	T _{m-1,0} (s)	T _p (s)	S _{op} (-)	N (-)	ξ _{om} (-)	H _{m0} /(ΔD) (-)	schade
serie 1	V01	4.55	0.75	4.47	4.89	0.020	455	2.15	3.62	b
	V02	4.70	0.86	4.80	5.22	0.020	825	2.15	4.18	c
serie 2	V03	4.55	0.59	2.90	3.04	0.041	663	1.58	2.85	a
	V04	4.70	0.72	3.17	3.34	0.042	977	1.55	3.52	a
	V05	4.70	0.83	3.47	3.65	0.040	1027	1.58	4.03	a
	V06	4.70	1.01	3.77	3.98	0.041	1010	1.57	4.88	a
	V07	4.70	1.15	4.09	4.28	0.040	1027	1.59	5.58	a
	V08	4.70	1.35	4.47	4.64	0.040	1028	1.60	6.53	a
	V09	4.70	1.53	4.86	5.08	0.038	989	1.63	7.44	a
serie 3	V10	4.70	1.54	4.85	5.04	0.039	1386	1.63	7.49	d
serie 5	V19	4.70	0.82	4.79	5.22	0.019	875	2.20	3.99	a
	V20	4.70	1.18	5.76	6.14	0.020	1021	2.21	5.72	a
	V21	4.70	1.35	6.13	6.62	0.020	1030	2.20	6.55	a
	V22	4.70	1.52	6.31	6.98	0.020	1055	2.13	7.36	a
	V23	4.70	1.52	6.46	7.03	0.020	1782	2.18	7.38	d

Tabel D.7 Uitgevoerde proeven met Veralit[®] mgv van LBN Betonproducten BV / Berding Beton GmbH

	proef	h (m)	H _{m0} (m)	T _{m-1,0} (s)	T _p (s)	S _{op} (-)	N (-)	ξ _{om} (-)	H _{m0} /(ΔD) (-)	schade
serie 6	V24	4.55	0.68	4.34	4.58	0.021	475	2.20	3.33	a
	V25	4.70	0.86	4.76	5.16	0.021	1012	2.14	4.23	a
	V26	4.70	0.99	5.28	5.63	0.020	999	2.21	4.90	a
	V27	4.70	1.14	5.74	6.09	0.020	983	2.24	5.64	a
	V28	4.70	1.32	6.13	6.64	0.019	1013	2.22	6.53	a
	V29	4.70	1.56	6.38	7.02	0.020	1036	2.13	7.67	a
serie 7	V30	4.55	0.84	3.47	3.69	0.039	567	1.58	4.12	a
	V31	4.70	0.85	3.46	3.69	0.040	1033	1.56	4.21	a
	V32	4.70	1.01	3.77	3.98	0.041	1013	1.57	4.96	a
	V33	4.70	1.15	4.09	4.28	0.040	1024	1.59	5.69	a
	V34	4.70	1.36	4.48	4.65	0.040	980	1.70	6.70	c
	V35	4.70	1.45	4.84	4.95	0.038	176	1.68	7.14	d
serie 8	V36	4.55	0.67	3.12	3.31	0.039	627	1.59	3.30	a
	V37	4.70	1.10	4.00	4.16	0.041	2008	1.59	5.44	a
	V38	4.70	1.12	3.96	4.25	0.040	3900	1.56	5.52	a
	V39	4.70	1.11	4.00	4.23	0.040	8065	1.58	5.46	b
	V40	4.70	1.11	3.99	4.20	0.040	12013	1.58	5.47	c

Tabel D.8 Uitgevoerde proeven met Verkalit® GOR van LBN Betonproducten BV / Berding Beton GmbH

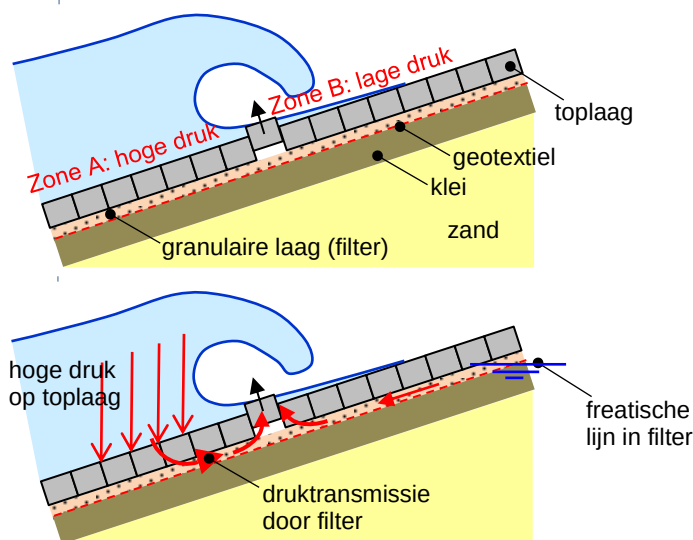
	proef	h (m)	H _{m0} (m)	T _{m-1,0} (s)	T _p (s)	S _{op} (-)	N (-)	ξ _{om} (-)	H _{m0} /(ΔD) (-)	schade
serie 1	C01	4.55	0.69	4.30	4.71	0.020	482	2.16	2.91	a
	C02	4.70	1.00	5.27	5.65	0.020	1001	2.19	4.26	a
	C03	4.70	1.21	5.76	6.19	0.020	1006	2.18	5.15	a
	C04	4.70	1.38	6.10	6.58	0.020	1039	2.16	5.87	a
	C05	4.70	1.58	6.81	7.04	0.020	1416	2.25	6.71	a
serie 2	C06	4.70	1.20	4.20	4.39	0.040	1003	1.60	5.09	a
	C07	4.70	1.35	4.45	4.65	0.040	1026	1.60	5.72	a
	C08	4.70	1.52	4.86	4.93	0.040	1026	1.64	6.47	a
Serie 3	C09	4.70	1.55	4.91	5.13	0.038	1679	1.64	6.57	b
	C10	4.70	1.49	4.88	4.94	0.039	1125	1.66	6.33	d

Tabel D.9 Uitgevoerde proeven met C-Star van LBN Betonproducten BV / Berding Beton GmbH

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.



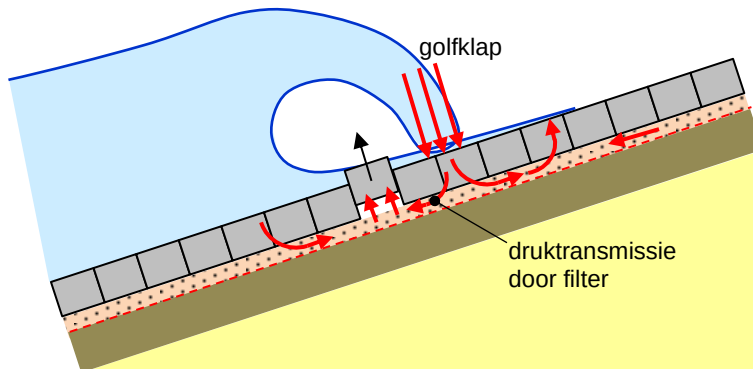
Figuur E.1 Golfneerloop leidt tot drukverschil over topplaat

De hoge druk op het talud wordt doorgegeven aan de granulaire laag (filter) onder de topplaat en komt ook onder de topplaat 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 topplaat 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 topplaat te drukken, of ineens helemaal tijdens een grote golf.

Dit mechanisme is maatgevend voor steenzettingen met een relatief kleine doorlatendheid van de topplaat 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:

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

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:

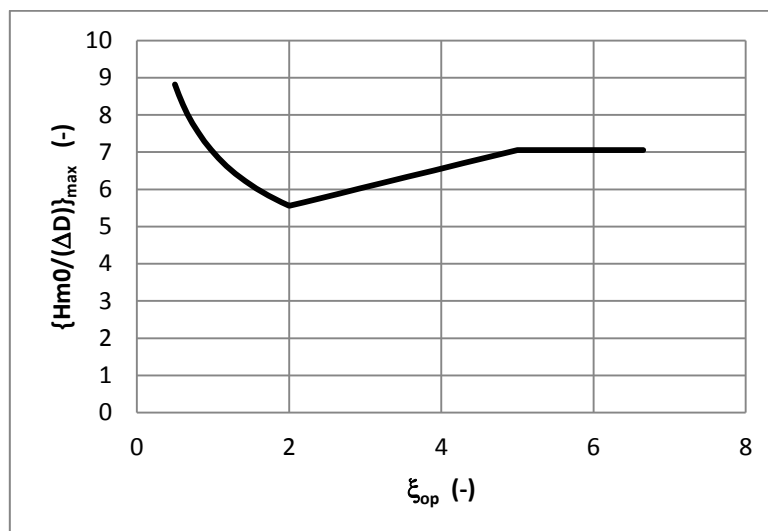
- als de korrelgrootte van het filter $D_{f15} < 3$ mm, dan wordt er gerekend met $D_{f15} = 3$ mm.
- als de lek lengte $\Lambda < D/2$, dan wordt er gerekend met $\Lambda = D/2$ (bij Verkaliit[®] lopen we tegen deze grens als $D_{f15} < 2,8$ mm).
- de berekende $H_{m0}/(\Delta D)$ op de grens van stabiel en instabiel is maximaal als volgt (beperking van de berekende stabiliteit):

$$\left\{ \frac{H_{m0}}{\Delta D} \right\}_{\max} = \left(7 \left(\min(\xi_{op}; 2) \right)^{-1/3} + \max \left(0, 5 \cdot \left(\min(\xi_{op}; 5) - 2 \right); 0 \right) \right) \frac{f_{duur}}{f_{\beta}} \quad (E.2)$$

Met:

- H_{m0} = 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} = $H_{m0} / (g T_p^2 / (2\pi))$ = 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 $H_{m0}/(\Delta D)$) volgens Steentoets2014

Deze begrenzingen zijn aangepast in de versie voor Verkalit[®]: Steentoets-V (zie bijlage C) en inmiddels ook geïmplementeerd in Steentoets2015.