

# Langeduurstabiliteit van steenzettingen

Heranalyse van Deltagootproeven met  
drempelwaardemethode





# Langeduurstabiliteit van steenzettingen

Heranalyse van Deltagootproeven met  
drempelwaardemethode

G.C. Mourik  
M. Klein Breteler

1206424-015



**Titel**  
Langeduurstabiliteit van steenzettingen

**Opdrachtgever**  
Rijkswaterstaat Waterdienst

**Project**  
1206424-015

**Kenmerk**  
1206424-015-HYE-0002

**Pagina's**  
28

**Trefwoorden**  
Steenzetting, langeduurbelasting, drempelwaardemethode

### Samenvatting

De stabiliteit van een steenzetting wordt beïnvloed door de belastingduur. In Steentoets is deze invloed verdisconteerd op basis van de analyse uit Klein Breteler (2005). Van Hijum e.a. (2009) heeft echter beargumenteerd dat er een betere methode is, waarmee ook de invloed van de variërende golfhoogte in de belastingperiode kan worden meegeteld.

Voor het meewegen van een variërende golfhoogte gedurende de belastingperiode kunnen verschillende methoden gebruikt worden. In Klein Breteler (2012) zijn twee methodes vergeleken: de energiemethode en de drempelwaardemethode. In die studie is geconcludeerd dat de voorkeur uitgaat naar de drempelwaardemethode.

Voor het gebruik van de drempelwaardemethode is het voldoende om simpelweg het aantal golven ( $N_{H>drempel}$ ) boven een specifiek gekozen drempelwaarde van de golfhoogte ( $H_{drempel}$ ) te tellen, want volgens de hypothese dragen alleen die bij aan het instabiel worden van de steenzetting. Om  $H_{drempel}$  en  $N_{H>drempel}$  vast te stellen, is in de onderhavige rapportage een heranalyse uitgevoerd van de proeven met een langeduurbelasting (Klein Breteler e.a., 2005).






De drempelwaardemethode blijkt aan de conservatieve kant en kent daarnaast diverse bezwaarpunten. Op basis van de onderhavige analyse is geconcludeerd dat de drempelwaardemethode vooral nog te veel nadelen bevat. Nadere discussie is nodig om richting te geven aan het vervolg van deze studie.

### Referenties

Waterdienst zaaknummer 31068749 / 4500196054, van 7 mei 2012

Contactpersoon Waterdienst: dhr. K. Saathof

Contactpersoon Projectbureau Zeeweringen van RWS: dhr. Y. Provoost

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	jul. 2012	G.C. Mourik		A. Capel		K.J. Bos	
2.0	feb. 2013	G.C. Mourik		R. 't Hart		M.R.A. van Gent	

**Status**  
definitief



## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Methode om <math>H_{drempel}</math> en <math>N_{H&gt;drempel}</math> te bepalen</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Analyse</b>	<b>7</b>
3.1	Opzet van de analyse	7
3.2	Overzicht van de geanalyseerde proeven	7
3.3	Golfhoogteoverschrijdingskrommen	10
3.3.1	Onzekerheidsbanden	10
3.3.2	Snijpuntgebieden	11
3.3.3	Basalton	11
3.3.4	Basalt	12
3.3.5	Blokken op hun kant	13
3.3.6	Hydroblocks	14
3.3.7	Rona®Ton+	15
3.3.8	C-Star	16
3.3.9	Haringmanblokken	16
3.4	$H_{drempel}$ en $N_{H>drempel}$ bepalen uit golfhoogteoverschrijdingskrommen	17
3.4.1	Gemeten waarden voor $H_{drempel}$ en $N_{H>drempel}$	17
3.4.2	Praktisch bruikbare waarde van $H_{drempel}$ en $N_{H>drempel}$ voor het toetsen en ontwerpen van steenzettingen	18
3.5	Vergelijking drempelwaardemethode met Deltagootproeven en Steentoets2010	20
3.6	Bezwijkmechanisme als mogelijke verklaring	22
<b>4</b>	<b>Conclusies</b>	<b>25</b>
<b>5</b>	<b>Referenties</b>	<b>27</b>
	<b>Bijlage(n)</b>	
<b>A</b>	<b>Tabellen</b>	<b>A-1</b>
<b>B</b>	<b>Figuren</b>	<b>B-1</b>





# 1 Inleiding

Voor het toetsen en ontwerpen van steenzettingen wordt gebruikgemaakt van het rekenmodel Steentoets. Eén van de aspecten die de stabiliteit van steenzettingen bepalen, is de duur van de belasting: naarmate de belasting langer aanhoudt, neemt de stabiliteit van steenzettingen af. Steentoets houdt weliswaar rekening met de belastingduur, maar doet dat op een vereenvoudigde wijze. De basis voor die vereenvoudigde rekenwijze is een vertaling van de in de Deltagoot gemeten relatie tussen de belastingduur en de bezwijkgolffoogte bij een constante significante golffoogte en waterstand (Klein Breteler e.a., 2005). Echter, in werkelijkheid is er vrijwel altijd een variërende waterstand en significante golffoogte tijdens de maatgevende storm: bij de lagere waterstanden aan het begin en einde van een storm is de golffoogte lager dan rond de top van de stormopzet.

Voor het meenemen van de invloed van de variërende waterstand is in Steentoets al een methode opgenomen. Maar Steentoets houdt nog géén rekening met het feit dat de golffoogte varieert in de loop van de belastingperiode, waardoor de invloed van de belastingduur in Steentoets wordt overschat. Voor het meenemen van de variërende golffoogte dient een methode nog opgenomen te worden. De onderhavige rapportage richt zich daarop.

In het verleden is hierover reeds nagedacht. Op verzoek van Ep van Hijum is in 2011 een memo opgesteld over de wijze waarop omgegaan moet worden met een variërende waterstand en golfbelasting. Naar aanleiding van die memo is in Klein Breteler (2012) een aanzet gegeven voor het omgaan met een variërende golffoogte. Voor het meewegen van een variërende golffoogte gedurende de belastingperiode kunnen verschillende methoden gebruikt worden. In Klein Breteler (2012) zijn twee methodes vergeleken: de energiemethode en de drempelwaardemethode.

Op basis van ervaring met steenzettingen is in Klein Breteler (2012) geconcludeerd dat de voorkeur uitgaat naar de drempelwaardemethode. De drempelwaardemethode is reeds voorgesteld door Ep van Hijum (Van Hijum e.a., 2009). Zijn rapport is integraal opgenomen in appendix A van Klein Breteler (2012).

Voor het gebruik van de drempelwaardemethode is het voldoende om simpelweg het aantal golven ( $N_{H>drempel}$ ) boven een specifiek gekozen drempelwaarde van de golffoogte ( $H_{drempel}$ ) te tellen, want volgens de hypothese dragen alleen die bij aan het instabiel worden van de steenzetting. De methode stelt dat er een drempelwaarde van de golffoogte ( $H_{drempel}$ ) kan worden vastgesteld afhankelijk van het type en de eigenschappen van de steenzetting en dat er vervolgens schade ontstaat als er een bepaald aantal golven ( $N_{H>drempel}$ ) met  $H > H_{drempel}$  op de steenzetting zijn gekomen. In de hypothese is opgesloten dat alle golven onder de drempelwaarde niet bijdragen aan de degeneratie van de steenzetting en dus ook niet bijdragen aan het moment waarop er schade ontstaat. Elke golf boven de drempelwaarde draagt evenveel bij aan de degeneratie.

Om de drempelwaarde vast te stellen, is in de onderhavige rapportage een heranalyse uitgevoerd van de proeven met een langeduurbelasting van Klein Breteler e.a. (2005). Tevens zijn in de analyse ook van enkele andere onderzoeken proeven gebruikt. In hoofdstuk 2 wordt toegelicht hoe  $H_{drempel}$  en  $N_{H>drempel}$  uit resultaten van modelproeven bepaald kunnen worden.

In dit onderzoek wordt uitsluitend gekeken naar geklemde steenzettingen (zuilen en natuursteen) en niet-geklemd steenzettingen (zoals betonblokken), beide op een filterlaag.

De ingegoten steenzettingen en steenzettingen zonder filterlaag (zoals blokken op klei en blokken op geotextiel op zand) blijven buiten beschouwing, omdat hierover nauwelijks experimentele gegevens zijn met betrekking tot de invloed van de belastingduur op de stabiliteit. Ook de stabiliteit van steenzettingen op een berm of boventalud op dijken of kruin of binnentalud van havendammen vallen om die reden buiten het huidige onderzoek.

Het onderhavige onderzoek is uitgevoerd in het kader van het meerjarige project 'Advisering steenbekledingen Zeeland' voor het Projectbureau Zeeweringen (PBZ). Dit projectbureau is opgericht ten behoeve van de renovatie van de steenzettingen in Zeeland en is een samenwerking van Rijkswaterstaat Zeeland en het Waterschap Scheldestromen. Contractueel is de Waterdienst van Rijkswaterstaat de opdrachtgever namens PBZ voor het onderhavige onderzoek. Het deel van het project dat gericht is op kennisontwikkeling sluit aan op het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen dat uitgevoerd is in de periode van 2003-2009 in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat namens PBZ.

## 2 Methode om $H_{drempel}$ en $N_{H>drempel}$ te bepalen

In appendix B van Klein Breteler (2012) wordt een methode gegeven om  $H_{drempel}$  en  $N_{H>drempel}$  te bepalen uit de meetresultaten van modelproeven. De methode is gebaseerd op de aanname dat het moment waarop schade aan steenzettingen ontstaat afhankelijk is van het aantal golven dat groter is dan  $H_{drempel}$ . In dit hoofdstuk is dit nader uitgewerkt.

Allereerst kan de kans dat afzonderlijke golven in een golfveld boven een waarde  $H$  uitkomen, in geval van een Weibull-verdeling, berekend worden met de volgende formule:

$$p(\text{golfhoogte} > H) = p = \exp\left(-\left(\frac{H}{\beta H_s}\right)^\alpha\right) \quad (2.1)$$

Met:

- $\alpha$  : parameter van de Weibull-verdeling (als Rayleigh, dan  $\alpha = 2$ ) (-)
- $\beta$  : parameter van de Weibull-verdeling (als Rayleigh, dan  $\beta = 1/\sqrt{2}$ ) (-)
- $p$  : kans dat golven boven een bepaalde waarde  $H$  uitkomen (-)
- $H$  : golfhoogte van afzonderlijke golf in golfveld met significante golfhoogte gelijk aan  $H_s$  (m)
- $H_s$  : significante golfhoogte (m)

Voor het aantal golven dat groter is dan  $H$  geldt:

$$N_{\text{golven}>H} = pN = N \cdot \exp\left(-\left(\frac{H}{\beta H_s}\right)^\alpha\right) \quad (2.2)$$

Met:

- $N$  : aantal golven in het golfveld met significante golfhoogte  $H_s$  (-)
- $N_{\text{golven}>H}$  : aantal golven dat groter is dan  $H$  (-)

Bovenstaande algemene theorie kan toegepast worden op het boven een specifieke drempelwaarde gelegen aantal golven dat leidt tot schade aan de steenzetting. Formule (2.2) wordt dan:

$$N_{H>drempel} = N \cdot \exp\left(-\left(\frac{H_{drempel}}{\beta H_s}\right)^\alpha\right) \quad (2.3)$$

Met:

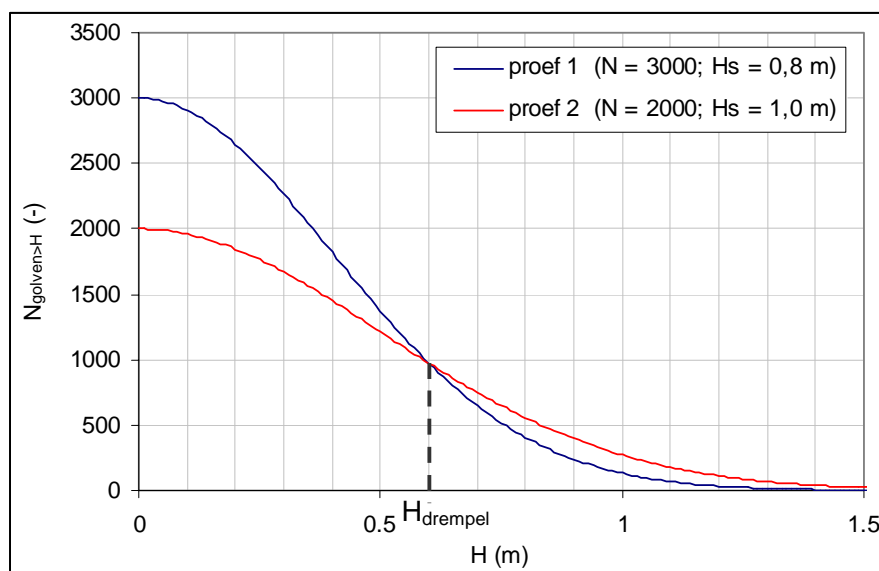
- $H_{drempel}$  : drempelwaarde van de golfhoogte, waarboven de golven de steenzetting aantasten (m)
- $N_{H>drempel}$  : aantal golven boven de drempelwaarde (-)

De hier onderzochte drempelwaardemethode gaat ervan uit dat de waarde van  $H_{drempel}$  en  $N_{H>drempel}$  afhankelijk zijn van de steenzetting en onafhankelijk zijn van  $H_s$ . Uitgangspunt voor de drempelwaardemethode is dat er schade ontstaat als er  $N_{H>drempel}$  golven boven de drempelwaarde zijn geweest. De waarde van het aantal golven  $N_{H>drempel}$  is afhankelijk van het type steenzetting (zuilen, blokken, e.d.), maar niet afhankelijk van de afmetingen van de steenzetting of het filter.

Tijdens grootschalig modelonderzoek is in het verleden voor diverse specifieke steenzettingen de duur bepaald tot er schade ontstond. Daarbij was gedurende de proef de significante golfhoogte constant. De duur tot het ontstaan van schade wordt uitgedrukt in het aantal golven  $N$ . Als op een specifieke steenzetting tijdens minimaal twee proeven, met een verschillende significante golfhoogte, de duur tot schade is vastgesteld, kunnen voor die steenzetting de waarden van  $N_{H>drempel}$  en  $H_{drempel}$  bepaald worden met de bovenstaande formules. Dit is onderstaand uitgewerkt.

Ter illustratie zijn in Figuur 2.1 voor twee fictieve proeven de parameters  $N_{golven>H}$  en  $H$  tegen elkaar uitgezet volgens formule (2.2). In deze figuur is af te lezen hoeveel golven er in de proef waren boven een bepaalde golfhoogte. Omdat alle golven groter dan nul zijn, begint de figuur bij  $H = 0$  m met het totaal aantal golven in de proef. Voor proef 1 (blauwe lijn) is er arbitrair voor gekozen dat schade optreedt na  $N = 3000$  golven met  $H_s = 0,8$  m, waarna de proef is gestopt. Voor proef 2 (rode lijn) is gekozen voor  $N = 2000$  en  $H_s = 1,0$  m. Bij een specifieke steenzetting is bij een kortere belastingduur immers een hogere significante golfhoogte nodig voor het veroorzaken van schade (Klein Breteler e.a., 2005). In de formule is uitgegaan van een Rayleigh-verdeling.

De lijnen (in het vervolg ook wel golfhoogteoverschrijdingskrommen genoemd) geven aan hoeveel afzonderlijke golven zijn opgetreden die groter waren dan  $H$ , voordat er schade ontstond. De drempelwaardemethode is erop gebaseerd dat bij twee proeven op dezelfde steenzetting een gelijk aantal golven hoger dan de drempelwaarde nodig is voor het bereiken van schade. Ofwel, de drempelwaarde is de waarde van  $H$  ter plaatse van het snijpunt van de lijnen. In het voorbeeld van Figuur 2.1 is  $H_{drempel} = 0,6$  m.



Figuur 2.1 Volgens de theoretische benadering snijden de golfhoogteoverschrijdingskrommen elkaar bij de drempelwaarde

Onderstaand is uitgewerkt hoe de drempelwaarde analytisch bepaald kan worden.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen de waarden van  $H_s$  en  $N$  van proef 1 en van proef 2. In proef 1 is bij een significante golfhoogte  $H_{s1}$  schade ontstaan na  $N_1$  golven. Overeenkomstig is in proef 2 bij  $H_{s2}$  schade ontstaan na  $N_2$  golven.

Omdat de drempelwaarde zich richt op de  $H_{drempel}$ , waarbij  $N_{H>drempel}$  in beide proeven gelijk is, geldt:

$$N_{H>drempel} = N_1 \exp\left(-\left(\frac{H_{drempel}}{\beta H_{s1}}\right)^\alpha\right) = N_2 \exp\left(-\left(\frac{H_{drempel}}{\beta H_{s2}}\right)^\alpha\right) \quad (2.4)$$

$$\ln(N_1) - \left(\frac{H_{drempel}}{\beta H_{s1}}\right)^\alpha = \ln(N_2) - \left(\frac{H_{drempel}}{\beta H_{s2}}\right)^\alpha \quad (2.5)$$

$$\ln\left(\frac{N_1}{N_2}\right) = -\left(\frac{H_{drempel}}{\beta}\right)^\alpha \left(\frac{1}{H_{s2}^\alpha} - \frac{1}{H_{s1}^\alpha}\right) \quad (2.6)$$

$$H_{drempel} = \beta \left(\frac{\ln\left(\frac{N_1}{N_2}\right)}{\frac{1}{H_{s1}^\alpha} - \frac{1}{H_{s2}^\alpha}}\right)^{1/\alpha} \quad (2.7)$$

In geval van een Rayleigh verdeling geldt met  $\alpha = 2$  en  $\beta = 1/\sqrt{2}$ :

$$H_{drempel} = \sqrt{\frac{\ln\left(\frac{N_1}{N_2}\right)}{2\left(\frac{1}{H_{s1}^2} - \frac{1}{H_{s2}^2}\right)}} \quad (2.8)$$

Tenslotte kan met deze  $H_{drempel}$  de waarde van  $N_{H>drempel}$  bepaald worden uit formule (2.3).

De bovenstaande formules zijn toepasbaar in gevallen waarbij gedurende een Deltagootproef vanaf het begin tot aan het moment van schade is gegolfd met één constante golfconditie (constant golfspectrum, significante golfhoogte  $H_s$ , piekperiode  $T_p$  en spectrale periode  $T_{m-1,0}$ ). Voor toepasbaarheid van de bovenstaande formules is het relevant dat de significante golfhoogte constant is in de tijd. Tijdens veel langeduurproeven in de Deltagoot is de significante golfhoogte echter niet van het begin tot het einde exact gelijk, doordat langeduurproeven veelal zijn opgedeeld in meerdere kortere subproeven om tussentijds metingen aan de steenzetting te kunnen verrichten. Tussen die afzonderlijke subproeven verschilt onder andere de significante golfhoogte doorgaans enigszins.

Daarnaast komt het soms voor dat de golfbelasting te laag blijkt te zijn voor het ontstaan van schade. Om toch schade te kunnen krijgen, werd de golfhoogte aan het begin van een nieuwe subproef dan verhoogd.

Doordat in formule (2.8) per proef één significante golfhoogte ingevuld kan worden, kan de formule in dergelijke gevallen niet gebruikt worden. De afzonderlijke subproeven dienen bij elkaar opgeteld te worden. Voor het aantal golven per proef dat groter is dan  $H_{drempel}$  geldt de volgende vergelijking:

$$N_{H>drempel} = \sum_{i=1}^n N_{1,i} \exp\left(-\left(\frac{H_{drempel}}{\beta H_{s1,i}}\right)^\alpha\right) = \sum_{i=1}^n N_{2,i} \exp\left(-\left(\frac{H_{drempel}}{\beta H_{s2,i}}\right)^\alpha\right) \quad (2.9)$$

Met:

$H_{s1,i}$ : significante golfhoogte tijdens subproef  $i$  van proef 1

$N_{1,i}$ : aantal golven in het golfveld met significante golfhoogte  $H_{s1,i}$  tijdens subproef  $i$  van proef 1

Het optellen van afzonderlijke subproeven is geïllustreerd in Figuur 2.2. Daarbij is uitgegaan van 4 fictieve subproeven:

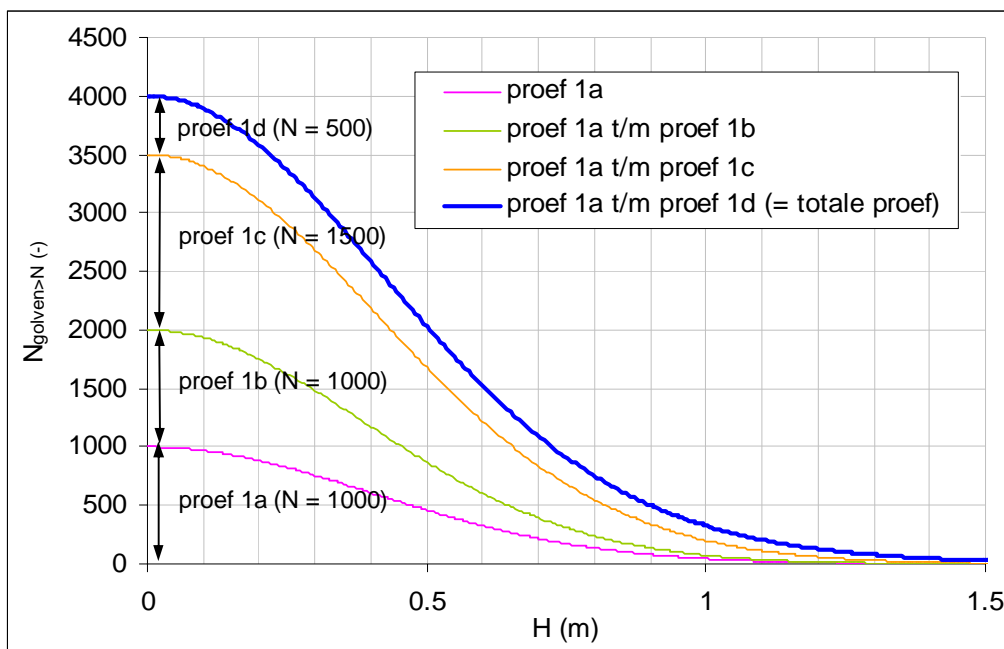
Subproef 1a met  $H_s = 0,80$  en  $N = 1000$

Subproef 1b met  $H_s = 0,75$  en  $N = 1000$

Subproef 1c met  $H_s = 0,90$  en  $N = 1500$

Subproef 1d met  $H_s = 1,20$  en  $N = 500$

De lijnen van de afzonderlijke subproeven kunnen eenvoudig bij elkaar worden opgeteld, wat uiteindelijk resulteert in een lijn voor de totale proef (dikke blauwe lijn).



Figuur 2.2 Het optellen van golfhoogteoverschrijdingskrommen van afzonderlijke subproeven

Het is gecompliceerd om uit formule (2.9) een analytische formule af te leiden voor het bepalen van  $H_{drempel}$ , die geschikt is voor een variabel aantal subproeven per proef. Voor samengestelde proeven (proeven die uit meerdere subproeven bestaan) is het daarom eenvoudiger  $H_{drempel}$  numeriek te berekenen.

Hoewel het golfveld tijdens de Deltagootproeven doorgaans vrijwel Rayleigh-verdeeld is, zijn er toch uitzonderingen waarin dat niet het geval is. Dat is vooral het geval bij kortdurende proeven met slechts weinig golven. Wanneer in die korte duur relatief veel grote of kleine golven optreden, kunnen die de verdeling beïnvloeden. Om te voorkomen dat dergelijke afwijkingen invloed hebben op het bepalen van de drempelwaarde zijn de proeven in het onderhavige onderzoek niet geanalyseerd door het invullen van de formules, maar is de relatie tussen  $N_{golven > H}$  en  $H$  geplot op basis van de uit metingen geconstrueerde verdeling van inkomende golven, tenzij anders vermeld. Van de geplote golfhoogteoverschrijdingskrommen wordt het snijpunt afgelezen, waaruit  $H_{drempel}$  en  $N_{H > drempel}$  volgen (zoals in Figuur 2.1).

## 3 Analyse

### 3.1 Opzet van de analyse

De analyse heeft tot doel om waarden te bepalen voor  $H_{drempel}$  en  $N_{H>drempel}$  op basis van meetdata van Deltagootproeven. Van de gebruikte Deltagootproeven is allereerst in paragraaf 3.2 een overzicht gegeven. Omdat  $H_{drempel}$  en  $N_{H>drempel}$  afhankelijk zijn van de eigenschappen van de steenzetting zijn de modelproeven onderverdeeld per bekledingstype (Basalton, basalt, e.d.).

Per bekledingstype is een grafiek gemaakt met golfhoogteoverschrijdingskrommen van beschouwde proeven (bijlagen B.1 t/m B.7). De grafieken met de overschrijdingskrommen worden toegelicht in paragraaf 3.3.

Op basis van de golfhoogteoverschrijdingskrommen (bijlagen B.1 t/m B.7) kunnen vervolgens  $H_{drempel}$  en  $N_{H>drempel}$  bepaald worden. Volgens de drempelwaardemethode horen per grafiek in het gunstigste geval alle lijnen door hetzelfde snijpunt te gaan (zie hoofdstuk 2).  $H_{drempel}$  is dan de waarde van  $H$  ter plaatse van het snijpunt. Evenzo is  $N_{H>drempel}$  de waarde van  $N_{golven>H}$  ter plaatse van het snijpunt. Per bekledingstype volgt daaruit een waarde van  $H_{drempel}$  en  $N_{H>drempel}$  (paragraaf 3.4).

De volgende stap betreft het vertalen van de per bekledingstype bepaalde  $H_{drempel}$  en  $N_{H>drempel}$  naar een praktisch toepasbaar concept. Daartoe zijn de bekledingstypen eerst onderverdeeld in geklemde en niet-geklemde bekledingen. Omdat de drempelgolfhoogte afhankelijk is van bekledingseigenschappen is  $H_{drempel}$  gekoppeld aan de stabiliteitgerelateerde bezwijkgolfhoogte  $H_{s,bezwijk}$ , die berekend is met Steentoets met een belastingduur van 1000 golven. De bezwijkgolfhoogte is de significante golfhoogte waarbij een steenzetting volgens Steentoets nog niet zal bezwijken.

In paragraaf 3.5 is de drempelwaardemethode tenslotte vergeleken met de meetdata van Deltagootproeven en met de huidige methode van Steentoets2010 om de langeduurbelasting te schematiseren.

### 3.2 Overzicht van de geanalyseerde proeven

$H_{drempel}$  is afhankelijk van de eigenschappen van de steenzetting. Er is daarom geprobeerd per bekledingstype een  $H_{drempel}$  te bepalen. Daarvoor is gebruik gemaakt van de meetresultaten van Deltagootproeven met diverse bekledingstypen. Per bekledingstype is geprobeerd zoveel mogelijk gebruik te maken van zowel lange- als korteduurproeven, aangezien zo beoordeeld kan worden of de drempelwaardemethode een bruikbare methode is bij sterk verschillende duren tot het ontstaan van schade.

Voor de analyse is gebruik gemaakt van de meetresultaten van de onderstaande onderzoeken. Per onderzoek zijn de beschouwde bekledingstypen vermeld.

- Langeduurproeven (Klein Breteler e.a., 2005):
  - Basalton
  - Basalt
  - Blokken op hun kant

- Hydroblocks (toplaagdikte D = 15 cm)
- Hydroblocks (toplaagdikte D = 20 cm)
- Reststerkteproeven (Wolters e.a., 2011)
  - Basalton
- Rona@Ton+-proeven (Wolters, 2010)
  - Rona@Ton+
- C-Star-proeven (Van der Werf e.a., 2007)
  - C-Star
- Haringmanblokproeven (Burger, 1985)
  - Haringmanblokken, niet ingewassen
- Hillblockproeven (Van Steeg, 2012)
  - Hillblocks

Gedurende het onderzoek naar de Hillblocks is geen enkele keer schade aan de bekleding ontstaan, waardoor het niet mogelijk is een  $H_{drempel}$  te bepalen. Het Hillblockonderzoek is in deze analyse daarom verder buiten beschouwing gelaten.

Van de andere onderzoeken is in bijlage A.1 een overzicht gegeven van de geometrische eigenschappen van de modelopstellingen. De eigenschappen zijn weergegeven conform het format van Steentoets2010 (Klein Breteler, 2012b). Wanneer in de tabellen cellen blanco zijn gehouden, dan kan òf gerekend worden met de default waarde òf de betreffende cellen zijn niet van toepassing voor dat type steenzetting. De betreffende cellen kunnen ook in Steentoetsberekeningen blanco blijven. In de onderhavige analyse is gebruik gemaakt van Steentoets2010, versie 1.09.

De typen toplagen en onderlagen van de steenzetting worden in Steentoets2010 aangeduid middels respectievelijk een nummer en een code. Tabel 3.1 en Tabel 3.2 geven een overzicht van de in de bijlage A.1 genoemde typen toplagen en onderlagen.

Nr.	Omschrijving type toplaag
11,1	Haringmanblokken (uitsparing verdisconteerd in soortelijke massa)
11,4	Blokken op hun kant
26,1	Basalt, waarbij op een apart terrein de slechte zuilen eruit gehaald zijn
27,1	Basalton
27,3	Hydroblocks
27,4	Rona@ton
27,5	C-Star

Tabel 3.1 Overzicht van in bijlage A.1 genoemde typen toplagen.

Code	Omschrijving type onderlaag
st	Steenslag
my	Mijnsteen (breed gegradeerd)
ge	Geotextiel
kl	Klei

Tabel 3.2 Overzicht van in bijlage A.1 genoemde typen onderlagen.

De bijlagen A.2 t/m A.8 geven van de beschouwde onderzoeken de meest relevante gegevens van de proevenprogramma's. Voor gedetailleerdere beschrijvingen van de onderzoeken en modelopstellingen wordt verwezen naar de betreffende onderzoeksrapporten.



In enkele gevallen zijn in de onderzoeksrapporten sommige hydraulische randvoorwaarden niet (exact) beschikbaar, terwijl die voor de onderhavige analyse wél benodigd zijn. In die gevallen is het overzicht in de bijlagen aangevuld met zo goed mogelijk geschatte waarden. In de bijlagen A.2 t/m A.8 zijn de geschatte waarden grijs gedrukt. Indien nodig zijn het aantal golven, de proefduur en de golfsteilheid als volgt geschat:

$$\begin{aligned} \text{Aantal golven:} \quad N &= (t_{\text{proef}} \cdot 3600) / T \\ \text{Proefduur:} \quad t_{\text{proef}} &= (T \cdot N) / 3600 \\ \text{Golfsteilheid:} \quad S_{\text{op}} &= (\tan \alpha / \xi_{\text{op}})^2 \end{aligned}$$

Met:

- N : aantal golven (-)
- $t_{\text{proef}}$  : proefduur (uur)
- T : golfperiode (s); als benadering is uitgegaan van  $T = T_{m-1,0}$  of  $T = T_p/1,1$ .
- $T_p$  : piekperiode (golfperiode bij de piek van het golfspectrum) (s)
- $T_{m-1,0}$  : spectrale golfperiode (s)
- $S_{\text{op}}$  : golfsteilheid (-)
- $\alpha$  : taludhelling ( $^\circ$ )
- $\xi_{\text{op}}$  : brekerparameter (-)

Naast de reeds genoemde parameters is in de bijlagen A.2 t/m A.8 tevens de waterdiepte  $h$  (m+gootbodemp) gegeven.

Zolang een bekleding tussen opeenvolgende proeven niet is hersteld of niet opnieuw is ingewassen, mogen opeenvolgende afzonderlijke proeven beschouwd worden als onderdeel van één lange proef. In de onderhavige analyse zijn dergelijke opeenvolgende proeven gewoonlijk bij elkaar opgeteld. In een aantal gevallen is besloten sommige proeven niet mee te tellen. De motivatie daarvoor is per bekledingstype toegelicht in paragraaf 3.3. In deze rapportage wordt een groep opgetelde proeven in het vervolg aangeduid als 'proevengroep'. Per bekledingstype wordt in de bijlagen A.2 t/m A.8 middels kleuren aangegeven welke proeven wel en niet bij elkaar zijn opgeteld. Die kleuren corresponderen met de lijnkleuren in de grafieken in de bijlagen B.1 t/m B.7 (zie paragraaf 3.3 voor de toelichting op de grafieken).

In de bijlagen A.2 t/m A.8 is per proevengroep aangegeven welke schadecategorie aan het einde van die proevengroep is bereikt. Daarbij is uitsluitend gelet op de grootst opgetreden schade, omdat die maatgevend is.

De schadecategorieën zijn als volgt gedefinieerd:

- a) Een verplaatsing van een blok ten opzichte van een naastliggend blok kleiner dan 10 % van de dikte van het blok. In de praktijk was er bij deze golfhoogte doorgaans nog geen waarneembare schade aanwezig. Wanneer zelfs na afloop van een proevenserie nog geen schade was ontstaan, heeft dit meetpunt gewoonlijk betrekking op een verplaatsing van ca. 0 % (geen schade).
- b) Een verplaatsing van een blok ten opzichte van een naastliggend blok tussen 10% en 20% van de dikte van het blok.
- c) Een verplaatsing van een blok ten opzichte van een naastliggend blok tussen 20% en 50% van de dikte van het blok.
- d) Een verplaatsing van een blok ten opzichte van een naastliggend blok groter dan 50% van de dikte van het blok (bij de beschouwde proeven was het blok dan door de golven geheel uit de bekleding gelicht).

Voor het vaststellen van de schadecategorie wordt gekeken naar het hoogteverschil tussen twee stenen, loodrecht op het talud, ter plaatse van de tegen elkaar geplaatste zijden. In het ideale geval zou schadecategorie c overeen moeten komen met de rekenresultaten van Steentoets.

Na het bereiken van schade d zijn de proeven gewoonlijk beëindigd, tenzij anders vermeld. Wanneer verwacht werd dat niet binnen een redelijke termijn schade d zou ontstaan, zijn proeven soms ook voortijdig beëindigd.

### 3.3 Golfhoogteoverschrijdingskrommen

In de bijlagen B.1 t/m B.7 is per bekledingstype een grafiek met de golfhoogteoverschrijdingskrommen gegeven. De grafieken worden in de volgende paragrafen per bekledingstype toegelicht. Steeds is op de horizontale as de golfhoogte gegeven en op de verticale as het aantal golven dat groter is dan deze golfhoogte tijdens de uitgevoerde proef. Bij  $H = 0$  is op de verticale as het totaal aantal golven af te lezen dat tijdens de proef in de goot aanwezig is geweest. Bij de horizontale as kan ter hoogte van  $N_{\text{golven} > H} = 1$  afgelezen worden wat de grootste golf was tijdens de proef.

Er geldt dat hoe meer golven tijdens de proef zijn gemaakt, hoe steiler de lijn wordt. Maar de lijn wordt ook steiler als de  $H_s$  kleiner was. De verhouding tussen de kleine en grote golven ligt steeds vast, omdat de golven voldoen aan de Rayleigh-verdeling (of Weibull-verdeling).

In de figuren corresponderen de lijnkleuren met de kleuren in de bijlagen A.2 t/m A.8. De lijntypen corresponderen met de hoogst opgetreden schadecategorie binnen de betreffende proevengroep:

- Schade a: stippellijn
- Schade b: streeplijn
- Schade c: getrokken lijn, zonder markers
- Schade d: getrokken lijn, met markers

Voor het bepalen van de drempelwaarde zijn vooral de onderste gedeelten van de golfhoogteoverschrijdingskrommen van belang. De verticale as loopt daarom niet verder dan tot 4000 golven.

#### 3.3.1 Onzekerheidsbanden

Rond de lijnen is een onzekerheidsband ingetekend. Deze band geeft per proevengroep een indicatie van de grenzen waarbinnen de steenzetting zou kunnen bezwijken (schade c of d), gezien het betreffende proefresultaat.

Het moment waarop schade ontstaat, kan binnen een bepaalde range beïnvloed worden door een groot aantal aspecten, zoals bijvoorbeeld variatie in de hoeveelheid klemming, de lokale gradering van het inwas- of filtermateriaal, e.d. Bij proeven met schade d wordt gewoonlijk vrij arbitrair een band aangehouden van  $H-10\%$  tot  $H+10\%$ . Wanneer sprake is van opmerkelijke verschijnselen gedurende het proefverloop, zoals uitspoeling van het inwas- en filtermateriaal als gevolg van modeffecten, dan kan de onzekerheidsband breder gemaakt worden en/of verschoven worden. Afwijkende onzekerheidsmarges worden per grafiek toegelicht.

Schade c en d zitten doorgaans dicht tegen elkaar aan en worden volgens Steentoets beide tot falen van de toplaag gerekend. Voor schade c wordt eveneens een onzekerheidsband aangehouden van  $H-10\%$  tot  $H+10\%$ .

Wanneer tijdens een proefengroep maximaal schade a of b is vastgesteld, dan ligt het voor de hand dat schade d pas bij een beduidend grotere golfhoogte zou optreden. De band (die een indicatie geeft van de grenzen waarbinnen schade d kan optreden) wordt daarom naar rechts getrokken (naar een grotere golfhoogte). Tevens is in dergelijke gevallen wat betreft de golfhoogte, waarbij schade d zou optreden, sprake van een grotere onzekerheid. De band wordt daarom verbreed. Bij proeven met schade a of b wordt gewoonlijk vrij arbitrair een range aangehouden van H+10% tot H+40%.

De geplotte lijnen geven de metingen weer, terwijl de onzekerheidsbanden een indicatie geven van de gecorrigeerde en/of tot schade d genormeerde metingen.

### 3.3.2 Snijpuntgebieden

De geplotte zwarte vierkanten in de grafieken markeren de locaties waarbinnen  $H_{drempel}$  en  $N_{H>drempel}$  waarschijnlijk liggen gezien de ligging van de onzekerheidsbanden: de zogenaamde snijpuntgebieden. In het ideale geval is dit het snijpunt van alle lijnen, maar vaak is er geen duidelijk snijpunt of snijden er 2 lijnen op de ene plaats en 2 andere op een andere plaats. Er is steeds uitgegaan van de veronderstelling dat  $N_{H>drempel} \ll 1000$  is, omdat ook bij een korte duur van bijvoorbeeld 500 à 1000 golven de steenzetting bij een voldoende hoge significante golfhoogte zal bezwijken. Uiteindelijk moet er creatief omgegaan worden met de onzekerheidsmarge om toch op een bruikbaar resultaat te komen. Dit aspect wordt ook meegewogen in de conclusies over de betrouwbaarheid van de drempelwaardemethode (zie hoofdstuk 4). Een uitgebreidere toelichting op de vierkantjes is gegeven in paragraaf 3.4.

### 3.3.3 Basalton

Voor Basalton konden twee onderzoeken gebruikt worden: de reststerkteproeven en de langeduurproeven. Zie bijlage A.2 voor een overzicht van de proevenprogramma's.

Van de reststerkteproeven zijn uitsluitend de proeven P03 en P04 bij elkaar opgeteld. Na de proeven P01 en P02 is opnieuw ingewassen, waardoor die als afzonderlijke proeven beschouwd worden. Doordat tijdens P01 en P02 uitsluitend schade a was ontstaan, blijven die proeven in deze analyse verder buiten beschouwing.

Gedurende P03 is de bekleding niet bezwaken, maar was er wel uitspoeling van inwasmateriaal. Tijdens P04 kwam na circa 600 s de eerste zuil iets omhoog ( $Z=4,14$  m; 4e zuil van rechts aan meetcabinezijde). Na 1210 s is deze zuil volledig uit de steenzetting gekomen. De volgende golven hebben de stenen eromheen uitgetild (eerst 1 blok ernaast, dan verdere stenen). Na 1380 s is de schade sterk uitgebreid. De proef is na 1380 s gestopt. In de golfhoogteoverschrijdingskromme (Figuur B.1, magenta lijn) zijn de golven na 1210 s niet meegeteld. De proefengroep P03-P04 werd niet gekenmerkt door bijzonderheden, waardoor een onzekerheidsband is aangehouden van H-10% tot H+10% (schade d).

Voorafgaand aan de langeduurproeven waren in 2003 en 2004 reeds proeven uitgevoerd op de Basaltonbekleding met vergelijkbare waterstanden en golfhoogten. Omdat tussendoor geen schade is hersteld en niet opnieuw is ingewassen, zijn die proeven bij de langeduurproeven opgeteld.

Voor het gemak zijn de proeven uit 2003 en 2004 (met  $\Sigma t_{proef} = 9,1$  uur) in de langeduurproeven (met  $\Sigma t_{proef} = 41,95$  uur) verdisconteerd door de samengestelde lijn van de langeduurproeven eenvoudigweg in de verticale richting te verhogen met  $(9,1/41,95) \cdot 100 \approx$

22%. Omdat de proeven zijn uitgevoerd met vergelijkbare golfhoogtes en waterstanden wordt deze methode voor deze proevengroep als voldoende nauwkeurig beschouwd. Eventuele onnauwkeurigheid is verwaarloosbaar ten opzichte van de relatief grote onzekerheid betreffende het moment van schade, omdat in de proef slechts schadeniveau a is opgetreden. Tezamen resulteren de proeven uit 2003 en 2004 en de langeduurproeven in de blauwe lijn.

De blauwe en magenta lijn verschillen sterk wat betreft de golfsteilheid. Van de langeduurproeven is de golfsteilheid gemiddeld circa 0,014, terwijl dat bij de reststerkteproeven gemiddeld circa 0,035 is. Voor het bepalen van  $H_{\text{drempel}}$  is het belangrijk dat beide lijnen onderling vergelijkbaar zijn. Beide lijnen dienen bij voorkeur gebaseerd te zijn op dezelfde golfsteilheid.

Omdat  $H_{\text{drempel}}$  ook afhankelijk is van de toplaagdikte en de filterlaag mogen de golfhoogteoverschrijdingskrommen van de langeduurproeven en de reststerkteproeven niet rechtstreeks met elkaar vergeleken worden.

Om vergelijking mogelijk te maken, is de blauwe lijn van de langeduurproeven ( $s_{\text{op}} = 0,014$ ) vertaald naar een equivalente lijn (de grijze lijn), met een golfsteilheid van  $s_{\text{op}} = 0,035$  en een stabiliteit die vergelijkbaar is met die van de reststerkteproeven.

Daartoe is eerst met Steentoets2010 voor de modelopstelling van de langeduurproeven en  $s_{\text{op}} = 0,014$  uitgerekend hoe groot  $H_{\text{s,bezwijk}}$  is bij het nog net niet bezwijken van de steenzetting. Vervolgens is dat ook gedaan voor de modelopstelling van de reststerkteproeven en  $s_{\text{op}} = 0,035$ . In beide gevallen wordt gerekend met het totale aantal beschouwde golven van de blauwe proevengroep:  $N = 32318$  golven.  $H_{\text{s,bezwijk}}$  is onder andere afhankelijk van het aantal golven.

Uit de berekeningen met Steentoets2010 volgt, uitgaande van 32318 golven:

- Geometrie langeduurproeven en  $s_{\text{op}} = 0,014$  m:  $H_{\text{s,bezwijk}} = 1,35$
- Geometrie reststerkteproeven en  $s_{\text{op}} = 0,035$  m:  $H_{\text{s,bezwijk}} = 0,73$

De blauwe golfhoogteoverschrijdingskromme is tenslotte vertaald naar de equivalente grijze overschrijdingskromme volgens:  $H_{\text{equivalent}} = (0,73 / 1,35) \cdot H = 0,54 \cdot H$ .

Vanwege schadecategorie a is aan de equivalente lijn een onzekerheidsband toegekend van  $H+10\%$  tot  $H+40\%$ .

### 3.3.4 Basalt

Een overzicht van het proevenprogramma van de langeduurproeven met basalt is gegeven in bijlage A.3. Omdat basaltbekledingen de eerste periode na het zetten niet meteen op volledige eindsterkte zijn (Klein Breteler e.a., 2005), is eerst een viertal ingolfproeven uitgevoerd. Tijdens de laatste ingolfproef (P4410) kwamen er na 1,1 uur golven 2 zuilen uit de bekleding. Om te corrigeren voor het ontbreken van de volledige eindsterkte is de middenlijn van de onzekerheidsband van de blauwe overschrijdingskromme 15% naar rechts verplaatst. Deze vergrotingsfactor wordt ook in Steentoets aangehouden voor basaltzettingen, die nog niet op eindsterkte zijn. Vanwege schadecategorie d is een onzekerheidsband aangebracht van  $-10\%$  tot  $+10\%$  ten opzichte van de gecorrigeerde middenlijn.

Na het herstellen van de schade is opnieuw ingewassen, waarna drie proevenseries zijn uitgevoerd. Tussen elke proevenserie is opnieuw ingewassen, waardoor opeenvolgende proevenseries tot verschillende proevengroepen gerekend worden.

Gedurende proevenserie 1, tijdens P4810, is een tapse zuil uit de bekleding gekomen, maar deze schade werd toegeschreven aan het proces van het ontwikkelen van de sterkte tot de eindsterkte. Er was nog niet eerder zo hoog op het talud gegolfd. Ook de tapse vorm speelde een rol bij het gemakkelijk eruit komen. Na het herstellen van de bekleding is proevenserie 1 voortgezet. Serie 1 is beëindigd toen 4,75 uur na het begin van P4812 één zuil uit de bekleding kwam. Vanwege schadecategorie d is een onzekerheidsband aangehouden van H-10% tot H+10%.

Tijdens proevenserie 2 is geen schade ontstaan aan de steenzetting, maar er zat wel enige beweging in de stenen. Vanwege schadecategorie a is een onzekerheidsband aangehouden van H+10% tot H+40%.

Tijdens proevenserie 3 is één zuil uit de bekleding gekomen na 3,83 uur van proef P4618. Na het ontstaan van de schade is nog verder gegolfd in proef P4619 met oog op de reststerkte. Van proevenserie 3 zijn voor de onderhavige analyse echter alleen de proeven beschouwd tot het moment van optreden van schade d. Vanwege schadecategorie d is een onzekerheidsband aangehouden van H-10% tot H+10%.

### 3.3.5 Blokken op hun kant

Binnen de langeduurproeven met blokken op hun kant zijn drie proevenseries uitgevoerd. Zie bijlage A.4 voor een overzicht van het proevenprogramma. Na de proevenseries is steeds de schade hersteld, waardoor opeenvolgende proevenseries als verschillende proevengroepen beschouwd worden. De blokkenzetting was niet ingewassen.

Tijdens proef P4120 van serie 1 waren wel wat blokken omhoog gekomen. Eén blok was 6 cm omhoog gekomen, maar zat wel muurvast. Enkele andere blokken waren 1 à 5 cm omhoog gekomen en zaten wel los. Tijdens P4121 werden enkele lossen blokken geconstateerd, maar de blokken die het verst omhoog waren gekomen, zaten wel vast. Uiteindelijk sloeg tijdens proef P4122 een blok uit de steenzetting na  $\Sigma t_{\text{proef}} = 3,62$  uur op een niveau van 3,43m boven de gootbodem. Vanwege schadecategorie d is een onzekerheidsband aangehouden van H-10% tot H+10%.

Proevenserie 2 werd beëindigd na proef P4934, toen één blok uit het talud sloeg op een niveau van 4,37 m boven de gootbodem. Vanwege schadecategorie d is een onzekerheidsband aangehouden van H-10% tot H+10%.

Tijdens proevenserie 3 was al tijdens P4141 schade c geconstateerd. Tot het einde van serie 3 (proef P4541) bleef de schade binnen categorie c. Na serie 3 zijn handmatig twee blokken uit de bekleding verwijderd om de reststerkte van de steenzetting te onderzoeken, maar ook tijdens de reststerkteproef (P4542) ontstond geen verdere schade. Er kan gesteld worden dat de bekleding alle proeven van serie 3 plus de reststerkteproef heeft doorstaan zonder schade d. De reststerkteproef wordt meegerekend bij de proevengroep. Vanwege schadecategorie c is een onzekerheidsband aangehouden van H-10% tot H+10%.

### 3.3.6 Hydroblocks

Binnen de langeduurproeven met Hydroblocks zijn eerst vijf proevenseries uitgevoerd met een toplaagdikte van 15 cm. Daarna is een zesde proevenserie uitgevoerd met Hydroblocks van 20 cm dik. Zie bijlage A.5 voor een overzicht van het proevenprogramma. Na afloop van de proevenseries is steeds de schade hersteld en is opnieuw ingewassen, waardoor opeenvolgende proevenseries als verschillende proevengroepen beschouwd worden.

Uit onderzoek is gebleken dat Hydroblocks na een keer tot schade belast te zijn geweest, gemakkelijker beschadigd raken (Klein Breteler e.a., 2005). Bij diverse proeven wordt de onzekerheidsband daarvoor gecorrigeerd.

In proevenserie 1 was na afloop van proef P5251 het talud al sterk vervormd, maar er waren nog geen blokken uitgekomen. Na 9 golven van proef P5252 werd er een gat in de bekleding geslagen tussen 4,34 m en 4,62 m boven de gootbodem. Het golfschot was voor die proef ingesteld op  $H_s = 1,2$  m, maar vanwege enkele hoge golven direct aan het begin was de gemeten  $H_s = 1,96$  m. Als langer zou zijn gegolfd, dan zou de significante golfhoogte wel circa 1,2 geworden zijn. Vanwege schadecategorie d is een onzekerheidsband aangehouden van H-10% tot H+10%.

Proevenserie 2 bestond uit drie proeven, waarbij uiteindelijk na P4251 een gat in de bekleding is ontstaan tussen 3,10 m en 3,80 m boven de gootbodem. Vanwege schadecategorie d is een onzekerheidsband aangehouden van H-10% tot H+10%. Hoewel dit de tweede schade betreft, hoeft bij deze proef nog niet gecorrigeerd te worden voor de lagere stabiliteit van gebruikte Hydroblocks, omdat deze schade beduidend lager op het talud optrad dan de eerste schade. De schade ontstond op een deel van het talud dat nog niet was hersteld.

Proevenserie 3 is beëindigd na proef P4252 toen een gat ontstond tussen 3,38 m en 3,52 m boven de gootbodem. Vóór het bezwijken was de bekleding overigens al aanzienlijk opgebold door migratie van het filtermateriaal. Vanwege schadecategorie d wordt gewoonlijk een onzekerheidsband aangehouden van H-10% tot H+10%. Vanwege de correctie voor de gebruikte Hydroblocks wordt deze band echter 10% naar rechts geschoven, wat resulteert in een onzekerheidsband van H+0% tot H+20%.

Proevenserie 4 is beëindigd na proef P4253 toen een gat ontstond tussen 3,59 m en 3,66 m boven de gootbodem. Vanwege schadecategorie d wordt inclusief de correctie voor de gebruikte Hydroblocks een onzekerheidsband aangehouden van H+0% tot H+20%. De tweede ingolfproef van deze serie (P4850) is niet bij deze proevengroep meegeteld, doordat vanwege de aanzienlijk hogere waterstand tijdens deze proef een ander taluddeel belast werd.

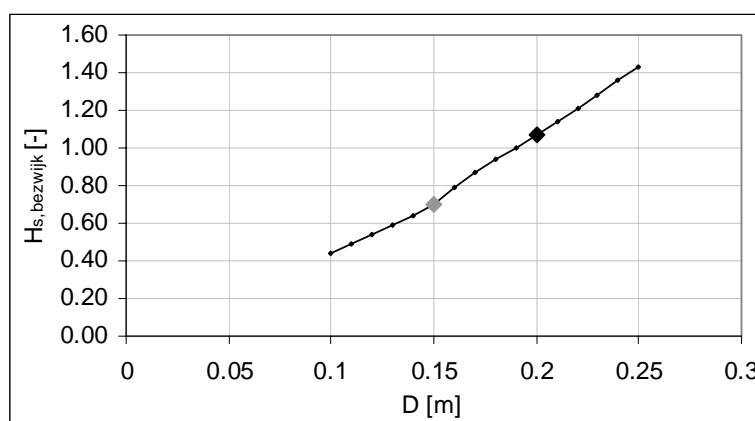
In proevenserie 5 was na afloop van proef P4256 in het talud een aanzienlijke opbolling aanwezig met een hoogte van circa 10 cm, maar er waren nog geen blokken uitgekomen. Na 0,63 uur golven in proef P4457 sloeg tenslotte een blok uit de opbolling op een niveau van 3,73 m boven de gootbodem. Vanwege schadecategorie d wordt inclusief de correctie voor de gebruikte Hydroblocks een onzekerheidsband aangehouden van H+0% tot H+20%.

Voor proevenserie 6 is een nieuwe Hydroblockbekleding ingebouwd. Er is gebruik gemaakt van ongebruikte blokken met een hoogte van 20 cm. Vanaf circa 4,8 uur na het begin van P4860 nam de opbolling in het talud toe. 5,73 uur na het begin van P4860 kwam er een blok uit de bekleding op een niveau van 3,99 m boven de gootbodem. In de paar daarop volgende

golven ontstond een tweede gat tussen 3,71 m en 3,92 m boven de gootbodem, terwijl de golfmachine al was uitgeschakeld.

De zwarte golfhoogteoverschrijdingskromme die uit deze proevengroep volgt, kan niet direct met de lijnen van voorgaande proeven worden vergeleken. Die zijn gebaseerd op een toplaagdikte van 15 cm. Voor het bepalen van  $H_{drempeel}$  is het belangrijk dat beide lijnen gebaseerd zijn op dezelfde toplaagdikte  $D$ . Om een goede vergelijking mogelijk te maken, wordt de zwarte lijn ( $D = 0,20$  m) vertaald naar een equivalente lijn (de grijze lijn) met  $D = 0,15$  m.

Daartoe wordt met Steentoets2010 voor de modelopstelling van de zwarte lijn voor zowel  $D = 0,20$  m en  $D = 0,15$  m uitgerekend hoe groot  $H_{s,bezwijk}$  is bij het nog net niet bezwijken van de steenzetting. De relatie tussen  $D$  en  $H_{s,bezwijk}$  bij nog net niet bezwijken is weergegeven in Figuur 3.1. Op die lijn is de steenzetting voor de bijbehorende waarden van  $D$  nog net stabiel.



Figuur 3.1 De relatie tussen  $D$  en  $H_{s,bezwijk}$  bij nog net niet bezwijken van de bekleding (Steentoets2010).

Uit de berekeningen met Steentoets2010 volgt, uitgaande van 15669 golven (het totale aantal golven binnen deze proevengroep, zie bijlage A.5):

- Als  $D = 0,20$  m:  $H_{s,bezwijk} = 1,07$
- Als  $D = 0,15$  m:  $H_{s,bezwijk} = 0,70$

De zwarte golfhoogteoverschrijdingskromme is tenslotte vertaald naar de equivalente grijze overschrijdingskromme volgens:  $H_{equivalent} = (0,70 / 1,07) \cdot H = 0,65 \cdot H$ .

Vanwege schadecategorie d is aan de equivalente lijn een onzekerheidsband toegekend van  $H-10\%$  tot  $H+10\%$ . Vanwege de nieuwe ongebruikte blokken is niet gecorrigeerd voor gebruikte blokken.

### 3.3.7 Rona®Ton+

Binnen de Rona®Ton+-proeven zijn in totaal drie proevenseries uitgevoerd. Zie bijlage A.6 voor een overzicht van het proevenprogramma. Eerst zijn twee proevenseries (kleine en grote golfsteilheid) uitgevoerd met korteduurproeven met een toenemende golfhoogte. Tussen de korteduurproeven is steeds opnieuw ingewassen, zodat elke korteduurproef als afzonderlijke proef beschouwd wordt. Tenslotte is een derde proevenserie uitgevoerd met een min of meer constante golfhoogte, zonder dat tussendoor is ingewassen. Tussen de laatste proef van proevenserie 2 (proef T9) en proevenserie 3 is niet meer ingewassen, waardoor T9 samen met serie 3 beschouwd is als één langeduurproef (de magenta lijn). Na T11B zijn 2 blokken uit de bekleding geslagen, waarna bleek dat daaronder het filtermateriaal

vrijwel volledig was uitgespoeld. Zonder dit modeffect zou schade gewoonlijk pas bij een grotere golfhoogte zijn opgetreden. Om daarvoor te corrigeren is de onzekerheidsband (schadecategorie d) 10% naar rechts verschoven, wat resulteert in een band van H+0% tot H+20%.

Tijdens de korteduurproeven van de proevenseries 1 en 2 is steeds alleen schade b ontstaan. Verder is bij beide proevenseries de golfhoogte stap voor stap verhoogd tot circa 1,5 m in de proeven T5 (serie 1) en T9 (serie 2). Van alle korteduurproeven is uitsluitend T9 beschouwd (de blauwe lijn), omdat de golfsteilheid daarvan vergelijkbaar is met die van de langeduurproef. Vanwege schadecategorie b is een onzekerheidsband aangehouden van H+10% tot H+40%.

### 3.3.8 C-Star

Binnen de C-Star-proeven zijn in totaal drie proevenseries uitgevoerd. Zie bijlage A.7 voor een overzicht van het proevenprogramma. Eerst zijn twee proevenseries (kleine en grote golfsteilheid) uitgevoerd met korteduurproeven met een toenemende golfhoogte. Tussen de korteduurproeven is steeds opnieuw ingewassen, zodat elke korteduurproef als afzonderlijke proef beschouwd wordt. Tenslotte is een derde proevenserie uitgevoerd met een min of meer constante golfhoogte, zonder dat tussendoor is ingewassen. Tussen de laatste proef van proevenserie 2 (proef T24) en proevenserie 3 is niet meer ingewassen, waardoor T24 samen met serie 3 beschouwd is als één langeduurproef (de magenta lijn). Na T34 is er een maximale blokverplaatsing gemeten van 4 cm (schade c). Vanwege schadecategorie c is een onzekerheidsband aangehouden van H-10% tot H+10%.

Tijdens de korteduurproeven van de proevenseries 1 en 2 was steeds alleen sprake van schade a. Verder is bij beide proevenseries de golfhoogte stap voor stap verhoogd tot ruim 1,5 m in de proeven T15 (serie 1) en T24 (serie 2). Van alle korteduurproeven is uitsluitend T24 beschouwd (de blauwe lijn), omdat de golfsteilheid daarvan vergelijkbaar is met die van de langeduurproef. Vanwege schadecategorie a is een onzekerheidsband aangehouden van H+10% tot H+40%.

### 3.3.9 Haringmanblokken

In het onderzoek met Haringmanblokken is een uitgebreide serie proeven uitgevoerd. Zie bijlage A.8 voor een overzicht van het proevenprogramma.

Na het ingolven is gestart met de proeven P01, P02 en P03. Nadat bleek dat tijdens die proeven een deel van de waterspanningen niet goed was geregistreerd zijn die proeven nogmaals herhaald (P04, P05 en P06A), waarbij tevens een aantal proeven is toegevoegd met een afwijkende golfsteilheid (P07 en P08). Toen na die proeven nog geen schade was ontstaan, is proef P06 voortgezet als langeduurproef: P06B. Na 17 uur is schade d opgetreden toen een half blok uit de steenzetting kwam. Verder kwamen elders op het talud enkele blokken 2 tot 9 cm omhoog. Uit deze serie proeven volgt de blauwe golfhoogteoverschrijdingskromme. De ingolfproef is niet in de proevengroep inbegrepen, omdat aanvullende gegevens over de golfsteilheid en waterstand ontbreken. Doordat de golfhoogte gering is ten opzichte van de overige proeven uit de proevengroep, wordt geen significante bijdrage van de ingolfproef aan de onderhavige analyse verwacht. Opgemerkt wordt dat een aantal proeven is uitgevoerd met een lagere golfsteilheid. Omdat het om



slechts een aantal procent van het totale aantal golven gaat, wordt dit verwaarloosd en wordt daarvoor niet gecorrigeerd. Vanwege schadecategorie d is een onzekerheidsband aangehouden van H-10% tot H+10%.

Na het herstellen van de schade is opnieuw ingegolfd, waarna de proeven P09 (310 golven met  $s_{op} = 0,017$ ) en P10 (26977 golven met  $s_{op} = 0,052$ ) zijn uitgevoerd. Na afloop van P10 was nog geen enkele schade ontstaan (schade a). Nadat handmatig een blok uit de bekleding was gehaald, werd de constructie tijdens de destructieproef na 23322 golven ondermijnd door uitspoeling van mijnsteen uit de onderlaag. De proeven P09 en P10 vormen samen de magenta lijn. De destructieproef wordt niet meegerekend vanwege de vooraf handmatig aangebrachte schade. Om dezelfde reden als bij de blauwe lijn is ook bij de magenta lijn de ingolfproef niet meegerekend. Ook is om dezelfde reden als bij de blauwe lijn niet gecorrigeerd voor de lagere golfsteilheid van proef P09.

Na de destructieproef is de schade hersteld. Er werd voor gekozen de blokken iets anders te herplaatsen. De blokken zijn vrij los tegen elkaar gezet en vervolgens ingewassen met duinzand, in tegenstelling tot de voorgaande proeven (niet ingewassen). Van het duinzand was  $D_{i15} = 0,17$  mm.

Net als bij de voorgaande proevengroepen is de ingolfproef niet meegerekend. Na P15 is de proevenserie beëindigd. De schade bleef beperkt tot een 3 cm en een 5 cm omhoog gekomen blok.

De aanwezigheid van inwasmateriaal tussen de blokken heeft invloed op de stabiliteit. Om bij deze ingewassen steenzetting schade te veroorzaken, is gewoonlijk een grotere golfhoogte benodigd. Het verdient daarom de voorkeur de groene lijn te vertalen naar een equivalente lijn. Echter, hoeveel daarvoor gecorrigeerd moet worden is moeilijk in te schatten, doordat kennis over met dermate fijn materiaal ingewassen Haringmanblokken beperkt is. Omdat de onnauwkeurigheid van een eventuele correctie vrij groot zal zijn, is er voor gekozen geen equivalente lijn te berekenen. Wel is de onzekerheidsband (schadecategorie c) ter compensatie arbitrair 10% naar rechts verschoven en tweemaal breder gemaakt, wat resulteert in een band van H-10% tot H+30%.

Opgemerkt wordt dat de golfhoogteoverschrijdingskrommen van de Haringmanblokproeven zijn gebaseerd op de Rayleigh-verdeling, met de in Burger (1985) gegeven waarden voor  $H_s$  en  $N$  als invoerparameters. Gelet op de daaruit volgende resultaten in bijlage B.7 (ver uit elkaar liggende lijnen zonder snijpunt) wordt niet verwacht dat betere resultaten volgen uit een bewerkelijke analyse van de oude meetdata.

### 3.4 $H_{drempel}$ en $N_{H>drempel}$ bepalen uit golfhoogteoverschrijdingskrommen

#### 3.4.1 Gemeten waarden voor $H_{drempel}$ en $N_{H>drempel}$

Op basis van de golfhoogteoverschrijdingskrommen (bijlagen B.1 t/m B.7) kunnen nu  $H_{drempel}$  en  $N_{H>drempel}$  bepaald worden. Volgens de drempelwaardemethode horen per grafiek alle lijnen door hetzelfde snijpunt te gaan (zie hoofdstuk 2).  $H_{drempel}$  is de waarde van H ter plaatse van het snijpunt van de lijnen. Evenzo is  $N_{H>drempel}$  de waarde van  $N_{golven>H}$  ter plaatse van het snijpunt. Omdat in vrijwel geen enkel geval alle lijnen door (ongeveer) hetzelfde snijpunt gingen, is in de vorige paragrafen al een onzekerheidsmarge gegeven. Dat vergroot de mogelijkheden een geschikt snijpunt te vinden.

Per bekledingstype is gezocht naar het meest optimale snijpunt. Met de ingetekende onzekerheidsbanden is een zogenaamd snijpuntgebied gemarkeerd.

De snijpuntgebieden zijn als zwarte kaders getekend in de bijlagen B.1 t/m B.7 en zijn gegeven in Tabel 3.3. Met oog op het vervolg van de analyse is in de tabel onderscheid gemaakt tussen de geklemde en niet-geklemde bekledingen.

Bij het markeren van de snijpuntgebieden wordt voor  $N_{H>drempel}$  een onder- en bovengrens aangehouden. Vooral de hogere golven dragen bij aan schade. Die hogere golven vormen een relatief klein percentage van het totale aantal golven. Een te groot aantal golven is daarom niet realistisch. Ook een te klein aantal golven is niet gewenst, doordat met de drempelwaardemethode het ontstaan van schade onnauwkeuriger te voorspellen is naarmate er gerekend wordt met een kleinere  $N_{H>drempel}$ . Gelet op de snijpuntgebieden in de meeste grafieken is vrij arbitrair gekozen voor  $100 > N_{H>drempel} > 400$ .

Bij het bepalen van de snijpuntgebieden is er rekening mee gehouden dat een individuele proef betrekking kan hebben op een steenzetting die stabiel is dan gemiddeld. Bij een sterkere bekleding ligt de lijn verder naar rechts dan de andere lijnen. Wanneer een lijn tussen  $100 > N_{H>drempel} > 400$  verder naar rechts ligt dan andere lijnen is ervoor gekozen die afzonderlijke lijn niet te beschouwen bij het bepalen van de snijpuntgebieden. Dit geeft een conservatief (veilig) resultaat. Niet beschouwde lijnen zijn de groene lijn in de basaltgrafiek (bijlage B.2) en de magenta lijn in de Haringmanblokkengrafiek (bijlage B.7).

Bij de Haringmanblokken is geen duidelijk snijpunt aanwezig. In dat geval is tussen de boven- en ondergrens toch een locatie gemarkeerd waar de onzekerheidsbanden de meeste overlap vertonen en waar de locatie van het snijpunt het meest voor de hand liggend is.

De gegevens van de snijpuntgebieden zijn samengevat in Tabel 3.3.

Bekleding	$N_{H>drempel}$ [-]	$H_{drempel}$ [m]	$H_{s,bezwijk}$ [m]	$f_{dr} = H_{drempel}/H_{s,bezwijk}$ [-]
<i>Geklemde bekledingen</i>				
Basalton	150 - 350	1,15 - 1,35	1,05	1,10 - 1,29
Basalt	200 - 400	1,50 - 1,70	1,45	1,03 - 1,17
Hydroblocks	150 - 300	0,85 - 0,95	1,13	0,75 - 0,84
Rona@Ton+	150 - 250	1,75 - 1,90	1,28	1,37 - 1,48
C-Star	150 - 300	1,70 - 2,00	1,39	1,22 - 1,44
<i>Niet-geklemde bekledingen</i>				
Blokken op hun kant	150 - 350	0,80 - 0,90	0,76	1,05 - 1,18
Haringmanblokken	100 - 200	1,90 - 2,05	1,28	1,48 - 1,60

Tabel 3.3  $N_{H>drempel}$ ,  $H_{drempel}$  en  $H_{s,bezwijk}$  per bekledingstype

### 3.4.2 Praktisch bruikbare waarde van $H_{drempel}$ en $N_{H>drempel}$ voor het toetsen en ontwerpen van steenzettingen

De volgende stap betreft het vertalen van de per bekledingstype bepaalde  $H_{drempel}$  en  $N_{H>drempel}$  naar een praktisch toepasbaar concept voor de bepaling van de stabiliteit in de praktijk. Omdat de drempelgolfhoogte afhankelijk is van de stabiliteit van de bekleding, ligt het voor de hand  $H_{drempel}$  te relateren aan de bezwijkgolfhoogte  $H_{s,bezwijk}$ . Er wordt gekozen voor de significante golfhoogte bij bezwijken na 1000 golven volgens Steentoets2010. Het verband tussen  $H_{drempel}$  en  $H_{s,bezwijk}$  wordt bij voorkeur beschreven door een eenvoudige formule, namelijk  $H_{drempel} = f_{dr} \cdot H_{s,bezwijk}$ , waarin drempelwaardefactor  $f_{dr}$  een maat voor de verhouding

is. De waarde van  $H_{s,bezwijk}$  is voor elk beproefde bekledingstype berekend met Steentoets2010, uitgaande van de geometrie zoals gegeven in bijlage A.1, en toegevoegd in Tabel 3.3. Door in alle gevallen te rekenen met 1000 golven is de invloed van de belastingduur geëlimineerd in deze waarde van  $H_{s,bezwijk}$ , waardoor het een constructie gerelateerde parameter is die niet beïnvloed wordt door de belastingduur. In de laatste kolom is de waarde van  $f_{dr}$  gegeven, zoals het volgt uit de proefresultaten ( $f_{dr} = H_{drempel}/H_{s,bezwijk}$ ). Omdat er geen sprake is van één snijpunt van de gemeten golfhoogteoverschrijdingskrommes, maar een snijpuntgebied, volgt er niet 1 waarde voor  $f_{dr}$  uit de proeven, maar een range. Deze range is gegeven in Tabel 3.3.

In de praktijk zal er gerekend moeten worden met één specifieke waarde voor de  $f_{dr}$  en  $N_{H>drempel}$  per bekledingstype. Dat betekent dat de range die volgt uit de proeven vertaald moet worden naar een specifieke waarde. Die waarde moet zo gekozen worden dat uiteindelijk een conservatief (veilig) resultaat verkregen wordt.

Voor de beproefde steenzettingen is de relatie tussen  $H_{s,bezwijk}$  en  $\xi_{op}$  gegeven in bijlage B.8. De grote markers markeren de  $H_{s,bezwijk}$  welke horen bij de gemiddelde golfsteilheid van de betreffende proevenseries. De bezwijkgolfhoogten zijn toegevoegd aan Tabel 3.3. Voor Basalton is in de tabel uitsluitend de bezwijkgolfhoogte gegeven van de reststerkteproeven. Van Basalton zijn de langeduurproeven immers vertaald naar een equivalente lijn, die vergelijkbaar is met de reststerkteproeven. Evenzo is voor Hydroblocks in de tabel alleen de bezwijkgolfhoogte gegeven voor de proeven met  $D = 15$  cm.

De volgende stap is het vertalen van de gemeten range voor de  $f_{dr}$  en  $N_{H>drempel}$  per bekledingstype naar een conservatieve waarde voor een groep van bekledingstypes. Daartoe zijn uit de  $H_{H>drempel}$ -ranges van Tabel 3.3 eerst twee waarden voor  $N_{H>drempel}$  gekozen: één voor geklemde en één voor niet-geklemde steenzettingen. Voor elk is een waarde gekozen die voor alle proevenseries ligt binnen de range van Tabel 3.3. Het resultaat is als volgt:

- Geklemde steenzettingen:  $N_{H>drempel} = 250$
- Niet-geklemde steenzettingen:  $N_{H>drempel} = 200$

De ideale waarde voor  $f_{dr}$  kan theoretisch afgeleid worden, door te zoeken naar de  $f_{dr}$  die een gelijke stabiliteit oplevert bij  $N = 1000$  volgens de drempelwaardemethode en volgens Steentoets2010 (belastingduur van 1000 golven). Dit wordt nader toegelicht in de volgende paragraaf. De waarde  $f_{dr}$  is rekenkundig bepaald door wat waarden te proberen en blijkt als volgt te zijn:

- Geklemde steenzettingen:  $f_{dr} = 0,83$
- Niet-geklemde steenzettingen:  $f_{dr} = 0,90$

In de figuren B.9 t/m B.12 zijn lijnen getekend volgens Steentoets2010 en volgens de drempelwaardemethode met bovenstaande waarden voor  $f_{dr}$  en  $N_{H>drempel}$ . In deze figuren is te zien dat beide dezelfde stabiliteit geven als  $N = 1000$ .

De resulterende waarden voor  $f_{dr}$  zijn vrij laag ten opzichte van de experimenteel bepaalde waarden uit Tabel 3.3. Het feit dat ze lager zijn dan de experimentele waarden, betekent dat hiermee een conservatief (veilig) resultaat verkregen wordt.

### 3.5 Vergelijking drempelwaardemethode met Deltagootproeven en Steentoets2010

In de voorgaande paragrafen is de langeduurbelasting met een variërende golfhoogte geschematiseerd door middel van de drempelwaardemethode. In de onderhavige paragraaf wordt deze drempelwaardemethode vergeleken met de meetdata van Deltagootproeven en met de huidige methode van Steentoets2010 om langeduurbelasting te schematiseren. Daartoe wordt per bekledingstype in één grafiek driemaal de stabiliteit  $H_s/(\Delta D)$  uitgezet tegen het aantal golven  $N$  (zie bijlagen B.9 t/m B.12):

- Lijn volgens de drempelwaardemethode (getrokken lijnen)

De lijn volgens de drempelwaardemethode geeft het verband tussen  $N$  en  $H_s/(\Delta D)$ . De waarden  $\Delta$  en  $D$  hebben betrekking op de beschouwde steenzetting, die beproefd is in de Deltagoot. De significante golfhoogte  $H_s$  is berekend volgens de Rayleigh-verdeling:

$$N_{H>drempel} = N \cdot \exp\left(-\left(\frac{H_{drempel}}{\beta H_s}\right)^\alpha\right) \quad (3.1)$$

Met:

- $\alpha$  : parameter van de Weibull-verdeling (als Rayleigh, dan  $\alpha = 2$ ) (-)  
 $\beta$  : parameter van de Weibull-verdeling (als Rayleigh, dan  $\beta = 1/\sqrt{2}$ ) (-)

Uit formule (3.1) volgt  $H_s$ :

$$H_s = \frac{\left(\frac{H_{drempel}}{\beta}\right)}{\left(-\ln\left(\frac{N_{H>drempel}}{N}\right)\right)^{\frac{1}{\alpha}}} \quad (3.2)$$

Met:

- $H_s$  : significante golfhoogte (m)  
 $H_{drempel}$  : drempelwaarde van de golfhoogte, waarboven de golven de steenzetting aantasten (m)  
 geklemde steenzettingen:  $H_{drempel} = 0,83 \cdot H_{s,bezwijk}$   
 niet-geklemde steenzettingen:  $H_{drempel} = 0,90 \cdot H_{s,bezwijk}$   
 $H_{s,bezwijk}$  : bezwijkgolfhoogte volgens Steentoets2010 voor de beschouwde steenzetting (m)  
 $N_{H>drempel}$  : aantal golven boven de drempelwaarde (-)  
 geklemde steenzettingen:  $N_{H>drempel} = 250$   
 niet-geklemde steenzettingen:  $N_{H>drempel} = 200$   
 $N$  : aantal golven in het golfveld met significante golfhoogte  $H_s$  (-)

De drempelwaardemethode-lijn kan omhoog of omlaag verschoven worden door de factor  $f_{dr}$  te variëren. In paragraaf 3.4 zijn de factoren  $f_{dr} = 0,83$  (geklemd) en  $f_{dr} = 0,90$  (niet geklemd) bepaald door  $f_{dr}$  zo te kiezen dat de drempelwaardemethode-lijn bij 1000 golven overeenkomt met de Steentoets2010-lijn.

- Lijn volgens Steentoets2010 (stippellijnen)

De lijn volgens Steentoets2010 geeft het verband tussen N en  $H_s/(\Delta D)$ , waarbij  $H_s/(\Delta D)$  volgt uit Steentoetsberekeningen. Per beschouwde steenzetting (zie bijlage A.1 voor de eigenschappen) is met Steentoets2010 voor een serie waarden van N de bijbehorende stabiliteit  $H_s/(\Delta D)$  berekend. Per steenzetting is gerekend met de gemiddelde golfsteilheid van de uitgevoerde proeven.

- Meetresultaten van Deltagootproeven (grote markers)

Tenslotte zijn de meetresultaten van de Deltagootproeven in de grafieken geplot. Daarbij is N het totale aantal golven van de beschouwde proevengroep. Ook de waarden  $\Delta$  en D hebben betrekking op de beschouwde steenzetting.

$H_s$  betreft de gemiddelde significante golfhoogte  $H_{sN}$  van de beschouwde proevengroep. Van afzonderlijke proefgedeelten verschillen de hydraulische condities vaak, maar ze kunnen tot één proef opgeteld worden volgens de methode in Klein Breteler (2006). De significante golfhoogte van de totale proef  $H_{sN}$  kan bepaald worden op basis van het gewogen gemiddelde van de energie:

$$H_{sN} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i H_{si}^2)}{\sum_{i=1}^n N_i}} \quad (3.3)$$

Met:

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

$N_i$  : aantal golven in proef i (-)

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

N : aantal proeven (-)

In de grafieken correspondeert het type marker van de meetpunten met de ontstane schade:

- Open vierkante markers: schade a
- Open ruitvormige markers: schade b
- Dichte ruitvormige markers: schade c
- Dichte vierkante markers: schade d

De kleuren van de markers corresponderen met de kleuren van de bijbehorende golfhoogteoverschrijdingskrommen van de figuren B.1 t/m B.7.

De figuren laten zien dat de drempelwaardemethode-lijnen bij geklemde bekledingen bij meer dan 1000 golven circa 0 tot 25 procent lager liggen dan de Steentoets2010-lijnen. Volgens de drempelwaardemethode zal een steenzetting bij een lange duur dus eerder bezwijken dan volgens Steentoets2010. Voor langeduurbelastingen is de drempelwaardemethode dus veiliger dan Steentoets2010. Verschillen tussen Steentoets en de drempelwaardemethode bij meer dan 1000 golven kunnen in principe eenvoudig verkleind worden door de factor  $f_{dr}$  groter te kiezen, waardoor de drempelwaardemethode-lijn omhoog gaat. Daar wordt echter niet voor gekozen, omdat dan afwijkingen ontstaan in de resultaten bij 1000 golven. Omdat Steentoets voor een belangrijk deel is gebaseerd en afgestemd op modelproeven met 1000 golven worden bij voorkeur juist bij die belastingduur geen veranderingen aangebracht. Bij niet-geklemde bekledingen liggen beide lijnen vrijwel op elkaar.

Bij minder dan 1000 golven ligt de drempelwaardemethode-lijn daarentegen aanzienlijk hoger dan de Steentoets2010-lijn, zowel voor geklemde als niet-geklemde bekledingen. Dit wordt mogelijk grotendeels veroorzaakt doordat de Steentoets2010-lijn beperkt wordt door een in Steentoets aanwezige bovengrens van de stabiliteit. Wanneer de drempelwaardemethode-lijn in Steentoets geïmplementeerd wordt, wordt die eveneens beperkt door die bovengrens. Bij minder dan 1000 golven worden geen grote verschillen verwacht tussen beide methoden.

De meetpunten van de Deltagootproeven liggen doorgaans boven de beide lijnen (veilig). In een aantal gevallen liggen de meetpunten net onder de Steentoets2010-lijn, maar net boven de drempelwaardemethode-lijn (basalt en Hydroblocks). Dit suggereert dat de drempelwaardemethode beter overeenstemt met de metingen dan Steentoets2010.

Daarbij dient echter opgemerkt te worden dat de waarden van  $H_s/(\Delta D)$  soms onrealistisch laag kunnen zijn doordat bij het bepalen van  $H_{sN}$  ook de proeven uit de proevengroep zijn meegeteld met een kleine golfhoogte. Hoewel die proeven nauwelijks invloed hebben op het ontstaan van schade (en dus op de stabiliteit) trekken ze wel de meetpunten omlaag. Vanuit die gedachte kan Steentoets2010 dus niet als onveilig bestempeld worden.

Opmerkelijk zijn de groene, oranje en lichtblauwe meetpunten van Hydroblocks. Die liggen onder de beide lijnen. De ligging wordt verklaard doordat het daar gaat om hergebruikte Hydroblocks. Uit onderzoek is gebleken dat Hydroblocks een deel van hun wrijving verliezen als ze een keer uit het talud verwijderd en opnieuw ingebouwd zijn (Klein Breteler e.a., 2005). Doordat Steentoets is gebaseerd op nieuwe Hydroblocks, en niet op hergebruikte, wordt de lagere ligging van deze proeven verklaard.

### 3.6 Bezwijkmechanisme als mogelijke verklaring

Uit bovenstaande analyse blijkt dat het niet eenvoudig is om op basis van de metingen in de Deltagoot  $H_{drempel}$  en  $N_{H>drempel}$  voor de drempelwaardemethode te bepalen. Hierdoor groeit de twijfel of de methode wel aansluit op de fysische werkelijkheid. In deze paragraaf zal getracht worden een verklaring hiervoor te vinden vanuit de beschrijving van het bezwijkmechanisme.

Bij het beschouwen van het bezwijkmechanisme van de steenzettingen moet onderscheid gemaakt worden tussen geklemde niet geklemde steenzettingen. Het bezwijkmechanisme verloopt naar verwachting doorgaans volgens de volgende stappen:

- 1 Geklemde steenzettingen op een filterlaag (basalt, betonzuilen):
  - Bij kleine en grote golven spoelt er geleidelijk aan inwasmateriaal uit de spleten.
  - Bij sommige zuilen ontstaat er aan één of meer zijden een verminderde interactie met naburige zuilen.
  - De stijghoogteverschillen zijn bij sommige golven zo groot dat de steenzetting enkele millimeters of een paar centimeter als een kattenrug opbolt.
  - Daaropvolgende golven veroorzaken:
    - dat de opbolling weer verdwijnt
    - dat het filtermateriaal gaat migreren en de opbolling definitief wordt
  - De steeds meer cumulerende opbolling zorgt ervoor dat er steeds minder interactie is tussen naburige zuilen.
  - één of meer zuilen spoelen uit het taludoppervlak, waarna de steenzetting als bezweken wordt beschouwd

- 2 Niet geklemde steenzettingen op een filterlaag (rechthoekige blokken):
- Sommige blokken zitten reeds bij aanvang van de hydraulische belasting los in de steenzetting (orde 0,1 à 10%).
  - Golfklappen op de steenzetting geven trillingen, die zouden kunnen bijdragen aan het los gaan zitten van een toenemend aantal blokken.
  - Bij grote golven is het stijghoogteverschil zodanig groot dat sommige blokken iets omhoog bewegen.
  - Daaropvolgende golven veroorzaken:
    - dat de steen weer naar beneden zakt
    - dat het filtermateriaal gaat migreren en de verplaatsing definitief wordt
  - De steeds meer cumulerende verplaatsing leidt na een tiental of vele honderden golven tot het uitspoelen van een steen, waarna de steenzetting als bezweken wordt beschouwd.

Uit bovenstaande beschrijving van het bezwijkmechanisme voor geklemde steenzettingen blijkt dat het uitspoelen van inwasmateriaal, dat bijdraagt aan de degeneratie, ook al plaatsvindt bij relatief kleine golven. Daarnaast is er een voldoende groot aantal grote golven nodig om de steenzetting uiteindelijk te laten bezwijken. Het tweede aspect zou kunnen aansluiten bij de drempelwaardemethode, maar het eerste aspect sluit daar veel minder op aan.

Voor niet geklemde steenzettingen geldt dat het stijghoogteverschil voldoende moet zijn om een blok in beweging te brengen. Dat sluit in principe goed aan op de drempelwaardemethode. Toch zullen hele grote golven naar verwachting echter meer bijdragen aan de schade dan de matig grote golven, terwijl volgens de drempelwaardemethode alle golven boven de drempel evenveel bijdragen.

Geconcludeerd kan worden dat voor zowel geklemde als niet geklemde steenzettingen er wel aanwijzingen zijn vanuit het bezwijkmechanisme dat de drempelwaardemethode niet goed zou kunnen aansluiten bij de werkelijkheid.





## 4 Conclusies

De stabiliteit van een steenzetting wordt beïnvloed door de belastingduur. In Steentoets is deze invloed verdisconteerd op basis van de analyse uit Klein Breteler (2005). Van Hijum e.a. (2009) heeft echter beargumenteerd dat er een betere methode is, waarmee ook de invloed van de variërende golfhoogte in de belastingperiode kan worden meegeteld.

Voor het meewegen van een variërende golfhoogte gedurende de belastingperiode kunnen verschillende methoden gebruikt worden. In Klein Breteler (2012) zijn twee methodes vergeleken: de energiemethode en de drempelwaardemethode (Van Hijum e.a., 2009). Op basis van ervaring met steenzettingen is in Klein Breteler (2012) geconcludeerd dat de voorkeur uitgaat naar de drempelwaardemethode.

De drempelwaardemethode betreft een vertaling op basis van een specifiek gekozen drempelwaarde van de golfhoogte ( $H_{drempel}$ ). In elk deel van de storm worden alleen de afzonderlijke golven beschouwd die groter zijn dan  $H_{drempel}$  ( $N_{H>drempel}$ ). Uitgangspunt voor de drempelwaardemethode is dat er schade ontstaat als er  $N_{H>drempel}$  golven boven de drempelwaarde zijn geweest. Als de golfhoogte klein is (aan het begin en einde van de storm), dan zijn dit slechts weinig golven, terwijl tijdens de top van de storm het percentage golven groter dan  $H_{drempel}$  veel groter is. Hierbij moet gebruikgemaakt worden van een goed gekozen golfhoogteverdeling (zoals Rayleigh of Weibull).

Voor het gebruik van de drempelwaardemethode is het voldoende om simpelweg het aantal golven boven een specifiek gekozen drempelwaarde van de golfhoogte te tellen, want volgens de hypothese dragen alleen die bij aan het instabiel worden van de steenzetting. Om de drempelwaarde vast te stellen, is in de onderhavige rapportage een heranalyse uitgevoerd van de proeven met een langeduurbelasting (Klein Breteler e.a., 2005). Uit de analyse volgden de volgende waarden voor  $H_{drempel}$  en  $N_{H>drempel}$ :

Geklemde steenzettingen:  $H_{drempel} = 0,83 \cdot H_{s,bezwijk}$   
 $N_{H>drempel} = 250$

Niet-geklemde steenzettingen:  $H_{drempel} = 0,90 \cdot H_{s,bezwijk}$   
 $N_{H>drempel} = 200$

Daarin is  $H_{s,bezwijk}$  de bezwijkgolfhoogte, die Steentoets uitrekent voor een belastingduur van 1000 golven.

In paragraaf 3.5 is de drempelwaardemethode vergeleken met de huidige methode van Steentoets2010 om langeduurbelasting te schematiseren:

- Bij een belastingduur van 1000 golven leveren beide methoden per definitie dezelfde stabiliteit op.
- Bij meer dan 1000 golven laat de vergelijking zien dat de drempelwaardemethode bij geklemde bekledingen een wat lagere stabiliteit oplevert dan Steentoets2010. Volgens de drempelwaardemethode zal een steenzetting bij een lange duur dus sneller bezwijken dan volgens Steentoets2010. Voor langeduurbelastingen is de drempelwaardemethode dus veiliger/conservatiever dan Steentoets2010. Bij niet-geklemde bekledingen geven beide methoden vrijwel dezelfde resultaten.

- Bij minder dan 1000 golven worden geen grote verschillen verwacht tussen beide methoden, als gevolg van de begrenzing van de stabiliteit in Steentoets.

Daarnaast is de drempelwaardemethode vergeleken met meetdata van Deltagootproeven. Hoewel het aantal meetpunten beperkt is, zijn die niet strijdig met de drempelwaardemethode. Gezien het feit dat de drempelwaardemethode een lagere stabiliteit geeft dan Steentoets is dat logisch.

De drempelwaardemethode is derhalve wat aan de conservatieve kant en kent daarnaast diverse bezwaarpunten:

- De snijpunten tussen de golfhoogteoverschrijdingskrommen, die nodig zijn voor het bepalen van  $H_{drempel}$  en  $N_{H>drempel}$ , waren in veel gevallen niet eenduidig zichtbaar. De aanwezige lijnen sneden elkaar zelden in hetzelfde punt en soms was er zelfs in het geheel geen snijpunt aanwezig. Dat geeft onzekerheid omtrent de nauwkeurigheid en bruikbaarheid van de methode.
- Eén van de eigenschappen van een drempelwaardemethode is de aanwezigheid van een grote discontinuïteit: alle golven groter dan  $H_{drempel}$  tellen volledig mee, terwijl alle golven kleiner dan  $H_{drempel}$  in het geheel niet meetellen. Doorgaans is de werkelijkheid niet zo zwart-wit, maar is er een overgangsgebied waarbij golven een beetje meetellen in de degeneratie. Met de drempelwaardemethode leidt deze onnatuurlijk scherpe grens tot resultaten die onnatuurlijk aandoen: Stel dat de drempelgolfhoogte van een geklemde steenzetting 1,50 m is. In dat geval leveren 251 golven van 1,51 m volgens deze methode wél schade op, terwijl 249 golven van bijvoorbeeld 3,0 m geen schade opleveren. Hoewel deze grote discontinuïteit in werkelijkheid niet zal optreden vanwege de altijd aanwezige golfverdeling (zoals Rayleigh), geeft dit toch te denken.
- Een nadeel is dat  $H_{drempel}$  gekoppeld is aan de bezwijkgolfhoogte  $H_{s,bezwijk}$ . Hoewel dat fysisch logisch is, brengt dat met zich mee dat na implementatie in Steentoets een extra iteratieslag in de berekeningen nodig is. De rekentijd van Steentoets neemt daardoor flink toe.
- Het verloop van de stabiliteit als functie van de belastingduur vloeit één op één voort uit de methodiek. Helaas blijkt dit verloop voor geklemde steenzettingen wat minder goed op de beschikbare metingen aan te sluiten.

Op basis van deze analyse wordt geconcludeerd dat de drempelwaardemethode vooralsnog te veel nadelen bevat. Nadere discussie is nodig om richting te geven aan het vervolg van deze studie.

## 5 Referenties

- Burger, A.M. (1985), Sterkte Oosterscheldedijken onder geconcentreerde golfaanval, Verslag grootschalig modelonderzoek, WL | delft hydraulics, rapport M2036, maart 1985
- Hijum, E. van, en Wouters, J. (2009), Mathematische benadering langeduursterkte van steenzettingen, Infram, (concept)rapport 07i128/01, 5 januari 2009
- Klein Breteler, M., en Eysink, W.D. (2005), Langeduursterkte van steenzettingen, Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen, Verslag Deltagootonderzoek, WL | delft hydraulics, rapport H4475, versie 2, november 2005
- Klein Breteler, M. (2006c), Het optellen van belastingperioden met verschillende golfhoogte, Deltares, memo, februari 2006
- Klein Breteler, M. (2012a), Effectieve duur van langeduurbelasting met variërende golfhoogte, Stabiliteit van steenzettingen, Onderzoeksprogramma 'Advisering steenbekledingen Zeeland', Deltares, rapport 1204727-013-HYE-0004, versie 2, februari 2012
- Klein Breteler, M. (2012b), Documentatie Steentoets2008 en Steentoets2010, Deltares, rapport 1204727-009-HYE-0001, februari 2012
- Klein Breteler, M., en Mourik, G.C. (2012c), Validatie van Steentoets2010, Stabiliteit van Steenzettingen, Onderzoeksprogramma 'Advisering steenbekledingen Zeeland', Deltares, rapport 1204727-009-HYE-0009, versie 2.1, mei 2012
- Steeg, P. van (2012), Stabiliteit van taludbekledingen met Hillblocks bij golfaanval, Grootschalig modelonderzoek in de Deltagoot, Deltares, rapport 1202901-000-HYE-0014, versie 3, januari 2012
- Werf, I. van der, en Klein Breteler, M. (2007), Stabiliteit van C-Star taludbekleding onder golfaanval, Grootschalig modelonderzoek Deltagoot, WL | delft hydraulics, rapport H4885, versie 1, augustus 2007
- Wolters, G. (2010), Rona®Ton+ proeven in de Deltagoot, Deltares, rapport 1201537, versie 1.3, juni 2010
- Wolters, G., en Klein Breteler, M. (2011), Reststerkte van een dijk met steenzetting op een kleilaag, Meetverslag Deltagootproeven SBW-Reststerkte, Deltares, rapport 1202122.002, versie 3.0, november 2011



## A Tabellen



### Geometrie modelopstellingen

STEENTOETS2010 versie 1.06, Deltares, juli 2010 (2008.121)	TOPLAAG															
	niveau ondergrens [m NAP]	niveau bovengrens [m NAP]	helling tana	type top laag	type onderlagen (filter, geotextiel, klei, etc)	D [m]	B [m]	L [m]	spleetbreedte stookv. [mm]	langsv. [mm]	open oppervlak [%]	gaten in steen? ja/nee	soortelijke massa [kg/m <sup>3</sup> ]	ingewassen ja/nee	D <sub>15</sub> inwasmateriaal [mm]	goed geklemd? ja/nee?
Basalton (proeven '03 en '04 + langeduurproeven), IJsselmeer	2	6	0.2857	27.1	st ge kl	0.2					13	ja/nee	2827	j	8	j
Basalton (reststerkteproeven)	2.35	4.7	0.2857	27.1	st ge kl	0.15					13	n	2388	j	8	j
Basalt (langeduurproeven)	2	6	0.2857	26.1	st ge kl	0.2					13	ja/nee	2955	j	8	j
Blokken op hun kant (langeduurproeven)	2	6	0.2857	11.4	st ge kl	0.2	0.1	0.2	0.5	0.5		ja/nee	2317	n		n
Hydroblocks D = 15 cm (langeduurproeven)	2	6	0.2857	27.3	st ge kl	0.15	0.25	0.25			13	ja/nee	2426	j	8	j
Hydroblocks D = 20 cm (langeduurproeven)	2	6	0.2857	27.3	st ge kl	0.2	0.25	0.25			13	ja/nee	2359	j	8	j
RonaTon+ (RonaTon+-proeven)	1.92	5.4	0.3333	27.4	st ge kl	0.16					12	n	2460	j	8	j
C-Star (C-Star-proeven)	1.9	5.5	0.3333	27.5	st ge kl	0.18	0.12	0.18			14	ja/nee	2338	j	4	j
Haringmanblokken; niet ingewassen (Haringmanblokkenproeven)	3.5	8.5	0.2857	11.1	st my	0.2	0.5	0.5	2	2		ja/nee	2290	n		j

### Geometrie modelopstellingen (vervolg)

STEENTOETS2010 versie 1.06, Deltares, juli 2010 (2008.121)	BOVENSTE FILTERLAAG					TWEDE FILTERLAAG					KLEI		type bovenste overgang (-sconstructie) a0 .... c1
	b [m]	D <sub>15</sub> [mm]	D <sub>50</sub> [mm]	porosititeit [-]	2e filter laag? ja/nee	b [m]	D <sub>15</sub> [mm]	D <sub>50</sub> [mm]	porosititeit [-]	dijk-opbouw gk/kl/ks/zs	b <sub>klei</sub> [m]		
Basalton (proeven '03 en '04 + langeduurproeven), IJsselmeer	0.12	22	29	0.4	n					kl	1		b0
Basalton (reststerkteproeven)	0.07	15	24	0.4	n					kl	1		b0
Basalt (langeduurproeven)	0.12	22	29	0.4	n					kl	1		b0
Blokken op hun kant (langeduurproeven)	0.05	6.5	9	0.4	n					kl	1		b0
Hydroblocks D = 15 cm (langeduurproeven)	0.069	22	29	0.4	n					kl	1		b0
Hydroblocks D = 20 cm (langeduurproeven)	0.097	22	29	0.4	n					kl	1		b0
RonaTon+ (RonaTon+-proeven)	0.07	12	21	0.4	n					kl	1		b0
C-Star (C-Star-proeven)	0.07	10	13	0.4	n					kl	1		b0
Haringmanblokken; niet ingewassen (Haringmanblokkenproeven)	0.04	9	14	0.4	n	1	3	18	0.2				b0

Geometrie modelopstellingen

Deltares

1206424-015

Tabel A.1

## Proevenprogramma: Basalton

### Langeduurproeven

serie	proef	N (-)	t <sub>proef</sub> (uur)	H <sub>s</sub> (m)	h (m+gootb)	ξ <sub>op</sub> (-)	s <sub>op</sub> (-)	tanα (-)	schade	lijnen
inwassen en trillen										
nov '03		3830	6.77	>1.2	4.6-5.1					
dec '03		1019	1.33	1.45	4.50	1.53	0.035	0.2857		
juli '04		808	1.00	1.40	4.39	1.48	0.037	0.2857		
1	P4201	649	1.00	1.24	4.20	2.58	0.012	0.2857		
1	P4202	673	1.00	1.34	4.20	2.48	0.013	0.2857		
1	P4203	659	1.00	1.26	4.20	2.48	0.013	0.2857		
1	P4204	1566	2.50	1.33	4.20	2.48	0.013	0.2857		
2	P4401	925	1.50	1.38	4.42	2.61	0.012	0.2857		
2	P4402	1294	2.00	1.36	4.41	2.47	0.013	0.2857		
3	P4601	4489	7.00	1.39	4.63	2.39	0.014	0.2857		
4	P4801	1890	3.00	1.40	4.82	2.38	0.014	0.2857		
4	P4802	2535	4.00	1.38	4.83	2.42	0.014	0.2857		
4	P4803	4467	7.00	1.38	4.81	2.39	0.014	0.2857		
5a	P5001	1205	1.90	1.46	5.02	2.42	0.014	0.2857		
5a	P5002	345	0.55	1.36	5.02	2.48	0.013	0.2857		
5b	P4804	4080	6.50	1.39	4.83	2.46	0.014	0.2857		
5b	P4805	1884	3.00	1.38	4.81	2.47	0.013	0.2857	a	

### Reststerkteproeven

serie	proef	N (-)	t <sub>proef</sub> (uur)	H <sub>s</sub> (m)	h (m+gootb)	ξ <sub>op</sub> (-)	s <sub>op</sub> (-)	tanα (-)	schade	lijnen
inwassen										
	P01	998	1.00	1.00	4.40	1.52	0.035	0.2857	a	
inwassen										
	P02	1073	1.13	1.21	4.50	1.55	0.034	0.2857	a	
	P03	1051	1.17	1.39	4.60	1.54	0.035	0.2857		
	P04	260	0.34	1.60	4.70	1.48	0.037	0.2857	d	

Tabel A.2



## Proevenprogramma: Basalt

### Langeduurproeven

serie	proef	N (-)	t <sub>proef</sub> (uur)	H <sub>s</sub> (m)	h (m+gootb)	ξ <sub>op</sub> (-)	s <sub>op</sub> (-)	tanα (-)	schade	lijnen
inwassen										
ingolven	P4010	1818	2.00	0.92	4.04	1.79	0.025	0.2857		
ingolven	P4210	1389	1.77	1.26	4.22	1.93	0.022	0.2857		
ingolven	P4211	1349	1.73	1.23	4.20	1.96	0.021	0.2857		
ingolven	P4410	847	1.10	1.28	4.40	1.94	0.022	0.2857	d	
inwassen										
1	P4411	2721	3.50	1.30	4.41	1.85	0.024	0.2857		
1	P4610	4702	6.00	1.27	4.63	1.91	0.022	0.2857		
1	P4810	391	0.42	1.17	4.82	2.09	0.019	0.2857		
1	P4811	6954	8.83	1.27	4.84	1.88	0.023	0.2857		
1	P4812	3661	4.75	1.25	4.83	1.90	0.023	0.2857	d	
inwassen										
2	P4215	2738	3.50	1.46	4.22	1.95	0.022	0.2857		
2	P4415	2670	3.50	1.43	4.42	1.98	0.021	0.2857		
2	P4615	4312	5.75	1.42	4.63	1.94	0.022	0.2857		
2	P4616	940	1.25	1.41	4.61	2.02	0.020	0.2857	a	
inwassen										
3	P4418	2481	3.50	1.59	4.42	1.94	0.022	0.2857		
3	P4618	2780	3.83	1.53	4.60	1.91	0.022	0.2857	d	
reststerkte	P4619	709	1.00	1.55	4.60	1.92	0.022	0.2857		

Tabel A.3

## Proevenprogramma: Blokken op hun kant

### Langeduurproeven

serie	proef	N (-)	t <sub>proef</sub> (uur)	H <sub>s</sub> (m)	h (m+gootb)	ξ <sub>op</sub> (-)	s <sub>op</sub> (-)	tanα (-)	schade	lijnen
1	P4120	957	1.00	0.83	4.10	1.69	0.029	0.2857		
1	P4121	951	1.00	0.83	4.10	1.72	0.027	0.2857		
1	P4122	1558	1.62	0.82	4.11	1.73	0.027	0.2857	d	
schade hersteld										
ingolven	P4930	1141	1.00	0.49	4.91	1.78	0.026	0.2857		
2	P4931	1032	1.00	0.64	4.90	1.73	0.027	0.2857		
2	P4932	2606	2.50	0.66	4.90	1.71	0.028	0.2857		
2	P4933	802	0.78	0.68	4.90	1.68	0.029	0.2857		
2	P4934	2130	2.09	0.68	4.90	1.67	0.029	0.2857	d	
schade hersteld										
ingolven	P4040	1210	1.00	0.45	4.00	1.67	0.029	0.2857		
3	P4140	1148	1.00	0.52	4.10	1.72	0.028	0.2857		
3	P4141	2840	2.50	0.54	4.11	1.69	0.029	0.2857	c	
3	P4240	3969	3.50	0.53	4.21	1.70	0.028	0.2857		
3	P4340	2855	2.50	0.53	4.31	1.70	0.028	0.2857		
3	P4341	5145	4.50	0.53	4.31	1.70	0.028	0.2857		
3	P4440	7422	6.50	0.52	4.41	1.71	0.028	0.2857		
3	P4441	8547	7.50	0.53	4.41	1.69	0.029	0.2857		
3	P4540	2808	2.50	0.53	4.51	1.69	0.029	0.2857		
3	P4541	10814	9.50	0.53	4.52	1.68	0.029	0.2857	c	
reststerkte	P4542	3577	3.50	0.72	4.50	1.67	0.029	0.2857		

## Proevenprogramma: Hydroblocks

### Langeduurproeven (D = 15 cm)

serie	proef	N (-)	t <sub>proef</sub> (uur)	H <sub>s</sub> (m)	h (m+gootb)	ξ <sub>op</sub> (-)	s <sub>op</sub> (-)	tanα (-)	schade	lijnen
inwassen, trillen, inwassen										
1	P5050	1102	1.23	0.83	5.00	1.89	0.023	0.2857		
1	P5250	1060	1.27	0.95	5.20	1.89	0.023	0.2857		
1	P5251	1093	1.37	1.08	5.20	1.98	0.021	0.2857		
1	P5252	9	0.02	1.96	5.20	1.64	0.030	0.2857	d	
inwassen										
ingolven										
2	P4150	913	1.00	0.77	4.10	1.98	0.021	0.2857		
2	P4250	1220	1.50	1.02	4.20	2.11	0.018	0.2857		
2	P4251	681	0.85	0.99	4.20	1.99	0.021	0.2857	d	
inwassen										
ingolven										
3	P4151	969	1.00	0.70	4.11	1.92	0.022	0.2857		
3	P4252	894	1.07	0.89	4.20	2.16	0.017	0.2857	d	
inwassen, trillen, inwassen, trillen										
ingolven										
4	P4152	966	1.00	0.70	4.11	2.01	0.020	0.2857		
4	P4850	958	1.00	0.69	4.81	2.05	0.019	0.2857		
4	P4253	1525	1.63	0.75	4.21	2.13	0.018	0.2857	d	
inwassen, trillen, inwassen, trillen										
ingolven										
5	P4254	1028	1.00	0.56	4.21	2.00	0.020	0.2857		
inwassen, trillen										
ingolven										
5	P4255	1973	2.00	0.63	4.22	2.09	0.019	0.2857		
5	P4256	1463	1.50	0.64	4.21	2.07	0.019	0.2857		
5	P4457	619	0.63	0.65	4.41	2.03	0.020	0.2857	d	

### Langeduurproeven (D = 20 cm)

serie	proef	N (-)	t <sub>proef</sub> (uur)	H <sub>s</sub> (m)	h (m+gootb)	ξ <sub>op</sub> (-)	s <sub>op</sub> (-)	tanα (-)	schade	lijnen
inwassen, trillen, inwassen										
ingolven										
6	P4160	890	1.00	0.85	4.09	1.99	0.021	0.2857		
inwassen, trillen, inwassen										
ingolven										
6	P4260	2399	3.02	1.15	4.21	1.98	0.021	0.2857		
6	P4261	407	0.50	1.10	4.20	1.91	0.022	0.2857		
6	P4460	318	0.40	1.10	4.42	2.17	0.017	0.2857		
6	P4461	2429	3.10	1.11	4.42	2.02	0.020	0.2857		
6	P4660	5573	7.00	1.09	4.62	2.07	0.019	0.2857		
6	P4860	4543	5.73	1.10	4.79	2.06	0.019	0.2857	d	

Tabel A.5

## Proevenprogramma: RonaTon+

### RonaTon+-proeven

serie	proef	N (-)	t <sub>proef</sub> (uur)	H <sub>s</sub> (m)	h (m+gootb)	ξ <sub>op</sub> (-)	s <sub>op</sub> (-)	tanα (-)	schade	lijnen
inwassen										
1	T1	1092	1.22	0.83	4.50	2.21	0.023	0.3333	b	
inwassen										
1	T4	1085	1.69	1.39	4.50	2.38	0.020	0.3333	b	
inwassen										
1	T5	1036	1.66	1.51	4.50	2.35	0.020	0.3333	b	
inwassen										
2	T6	1016	0.96	0.95	4.50	1.74	0.037	0.3333	b	
inwassen										
2	T7	971	0.98	1.18	4.50	1.67	0.040	0.3333	b	
inwassen										
2	T8	1068	1.19	1.36	4.50	1.73	0.037	0.3333	b	
inwassen										
2	T9	1039	1.27	1.52	4.50	1.79	0.035	0.3333	b	
3	T10	841	1.03	1.51	4.50	1.80	0.034	0.3333		
3	T5A	341	0.52	1.53	4.50	2.22	0.023	0.3333		
3	T10A	2092	2.59	1.52	4.50	1.81	0.034	0.3333		
3	T11	5172	6.35	1.52	4.50	1.79	0.035	0.3333		
3	T11A	492	0.64	1.53	4.50	1.90	0.031	0.3333		
3	T11B	345	0.45	1.54	4.50	1.87	0.032	0.3333	d	

Tabel A.6

## Proevenprogramma: C-Star blokken

### C-Star-proeven

serie	proef	N (-)	t <sub>proef</sub> (uur)	H <sub>s</sub> (m)	h (m+gootb)	ξ <sub>op</sub> (-)	s <sub>op</sub> (-)	tanα (-)	schade	lijnen
inwassen										
1	T11	1260	1.55	0.84	4.50	2.30	0.021	0.3333	a	
inwassen										
1	T12	1190	1.65	1.00	4.50	2.35	0.020	0.3333	a	
inwassen										
1	T13	1277	1.95	1.20	4.50	2.35	0.020	0.3333	a	
inwassen										
1	T14	1247	2.06	1.36	4.50	2.39	0.019	0.3333	a	
inwassen										
1	T15	1101	1.92	1.53	4.50	2.38	0.019	0.3333	a	
inwassen										
2	T22	1086	1.23	1.14	4.50	1.66	0.039	0.3333	a	
inwassen										
2	T23	1046	1.30	1.35	4.50	1.73	0.036	0.3333	a	
inwassen										
2	T24	1706	2.35	1.54	4.70	1.80	0.034	0.3333	a	
3	T32	3486	4.80	1.56	4.70	1.74	0.036	0.3333		
3	T33	6968	9.60	1.56	4.70	1.77	0.035	0.3333		
3	T34	10513	14.48	1.56	4.70	1.78	0.035	0.3333	c	

Tabel A.7

## Proevenprogramma: Haringmanblokken

### Haringmanblokproeven

serie	proef	N (-)	t <sub>proef</sub> (uur)	H <sub>s</sub> (m)	h (m+gootb)	ξ <sub>op</sub> (-)	s <sub>op</sub> (-)	tanα (-)	schade	lijnen
ingolven			4.00	0.60-0.80						
	T1	571	0.50	0.90	5.00	1.21	0.056	0.2857		
	T2	486	0.50	1.20	5.00	1.29	0.049	0.2857		
	T3	434	0.50	1.50	5.00	1.61	0.031	0.2857		
	T4	571	0.50	0.96	5.00	1.21	0.056	0.2857		
	T5	486	0.50	1.25	5.00	1.29	0.049	0.2857		
	T6A	434	0.50	1.43	5.00	1.34	0.045	0.2857		
	T7	475	0.50	0.89	5.00	1.61	0.031	0.2857		
	T8	371	0.50	1.10	5.00	1.70	0.028	0.2857		
	T6B	14747	17.00	1.43	5.00	1.34	0.045	0.2857	d	
herstellen										
ingolven			1.00	0.60-0.80						
	T9	310	0.50	0.85	5.00	2.20	0.017	0.2857		
	T10	26977	29.00	1.33	5.00	1.25	0.052	0.2857	a	
destructieproef			2.58	1.50						
herstellen (blokken zijn bewust extra los gezet en inwassen met duinzand)										
ingolven			1.00	0.50-0.75						
	T11	1158	1.00	0.94	5.00	1.22	0.055	0.2857		
	T12	1040	1.00	1.05	5.00	1.27	0.051	0.2857		
	T13	963	1.00	1.23	5.00	1.30	0.048	0.2857		
	T14	889	1.00	1.37	5.00	1.23	0.054	0.2857		
	T15	808	1.00	1.50	5.00	1.30	0.048	0.2857	c	

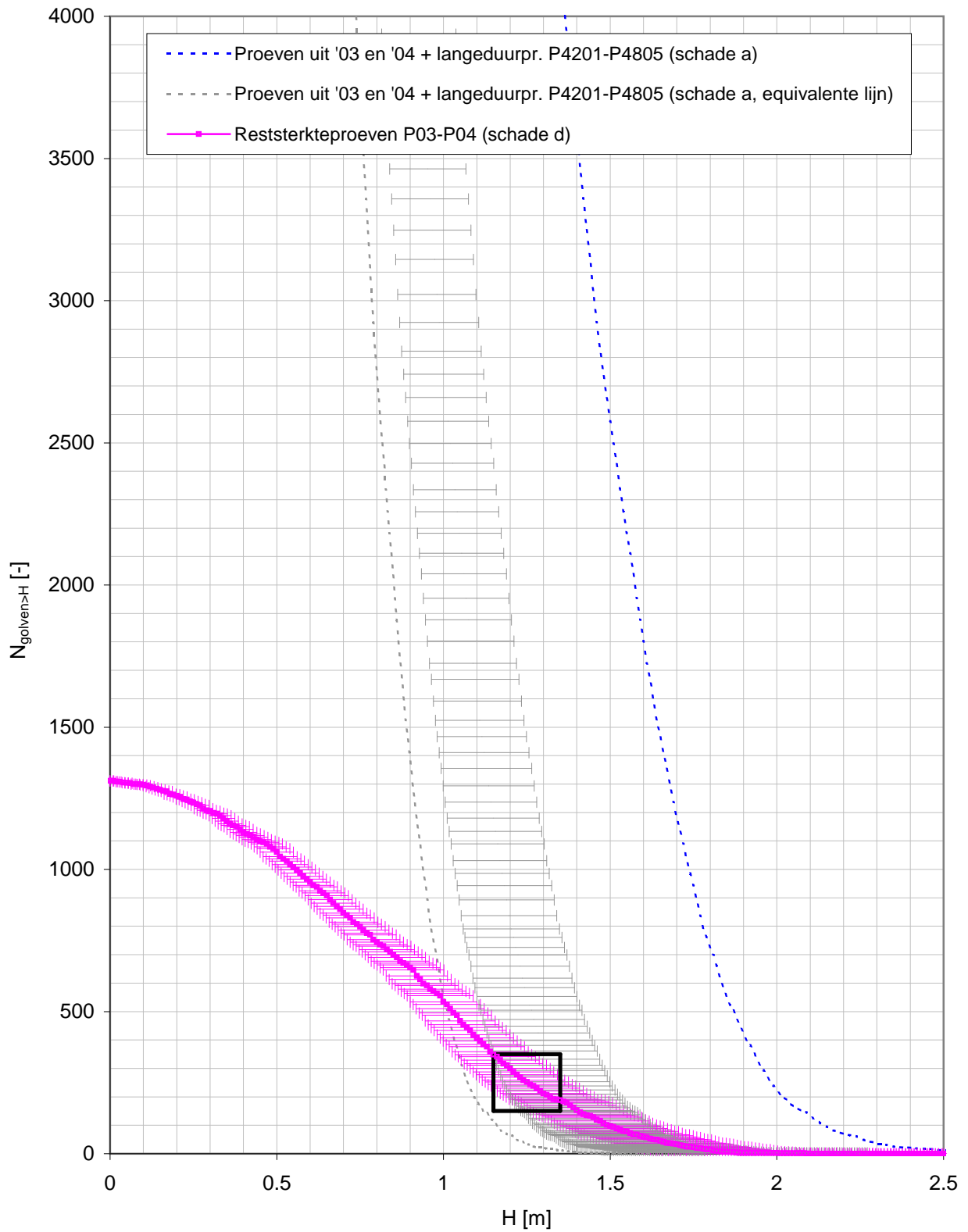
Tabel A.8

## **B Figuren**





# Basalton



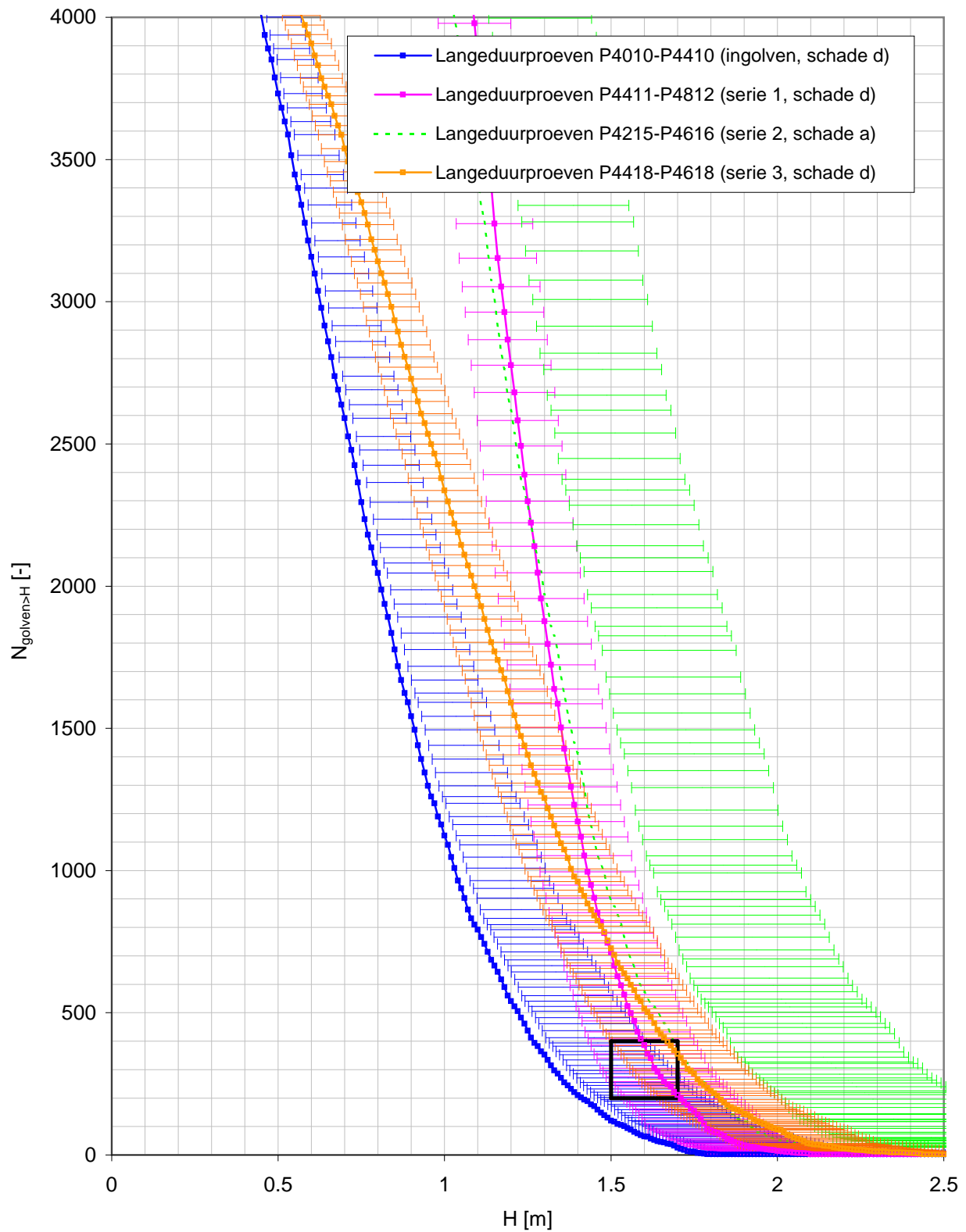
Golfhoogteoverschrijdingskrommen tot moment van schade  
Basalton

**Deltares**

1206424-015

Fig. B.1

# Basalt



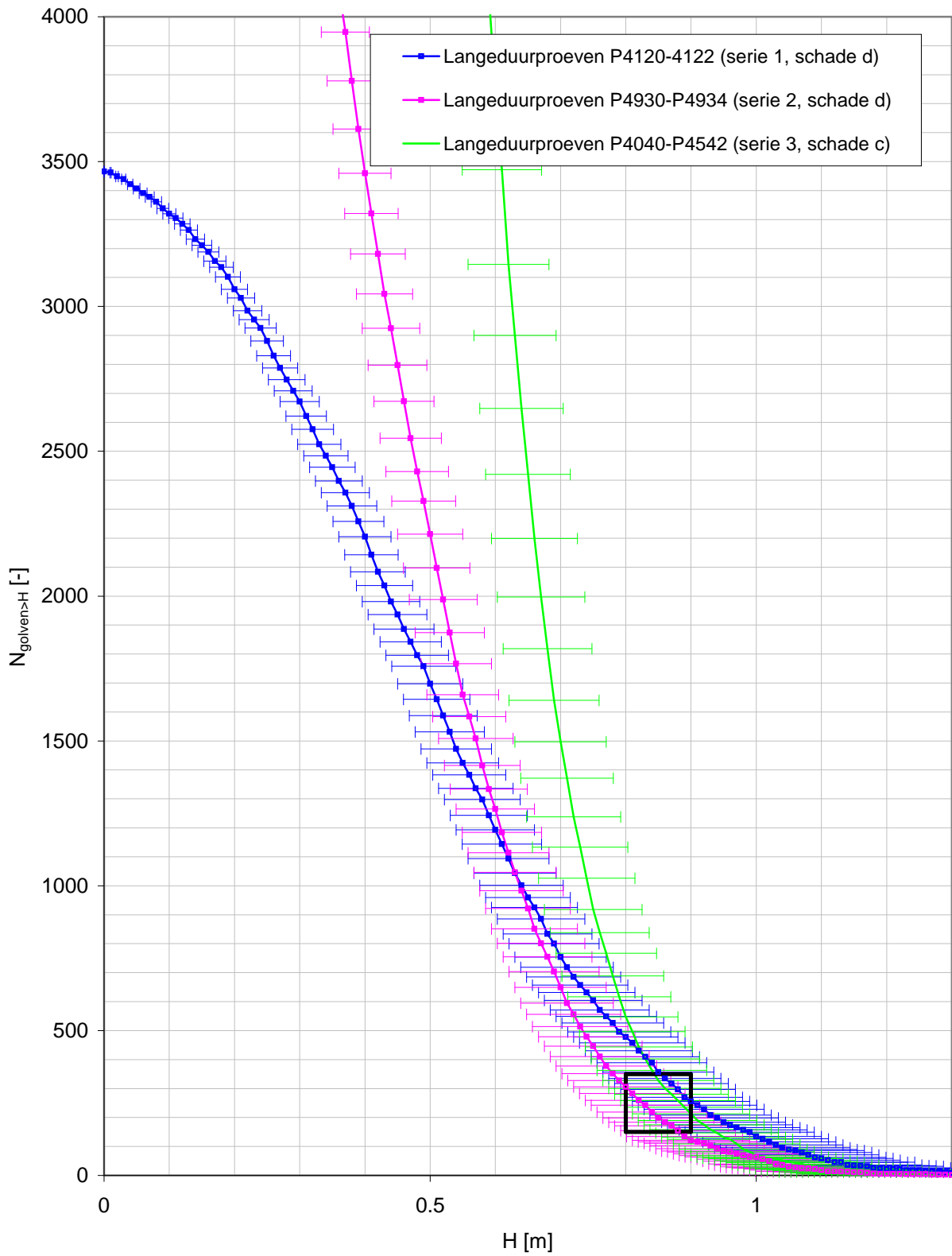
Golfhoogteoverschrijdingskrommen tot moment van schade  
Basalt

**Deltares**

1206424-015

Fig. B.2

### Blokken op hun kant



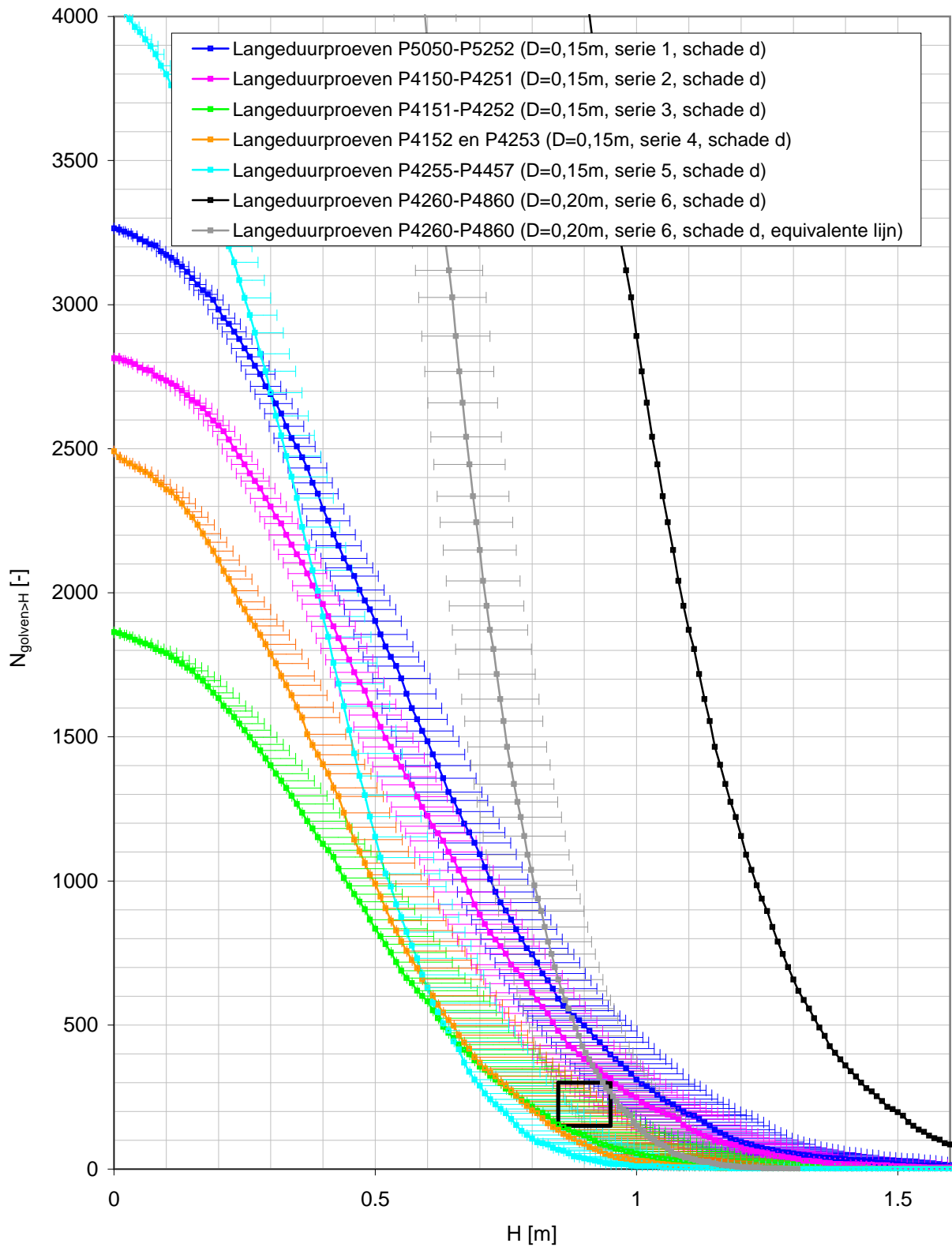
Golfhoogteoverschrijdingskrommen tot moment van schade  
Blokken op hun kant

**Deltares**

1206424-015

Fig. B.3

## Hydroblocks



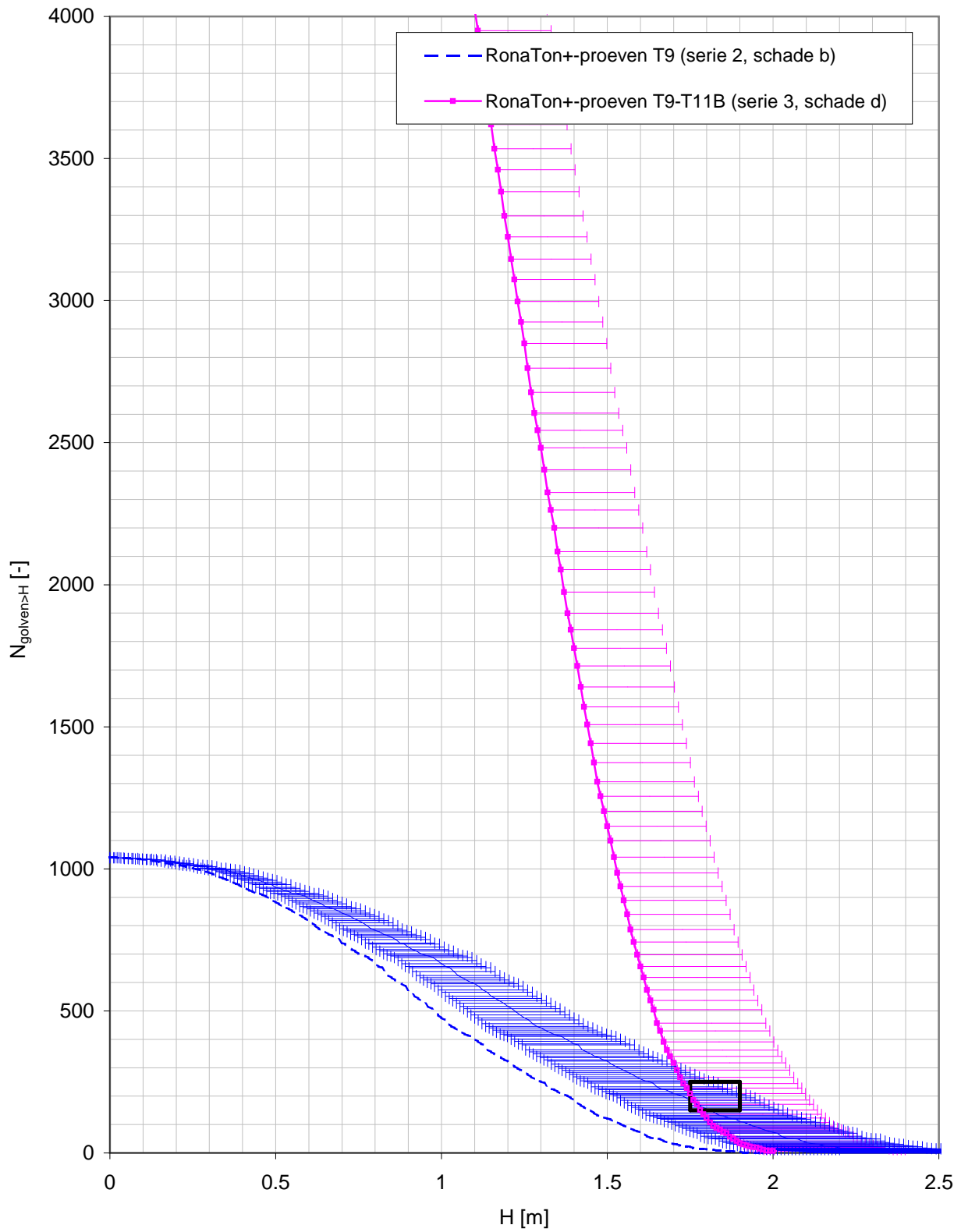
Golfhoogteoverschrijdingskrommen tot moment van schade  
Hydroblocks

**Deltares**

1206424-015

Fig. B.4

# RonaTon+



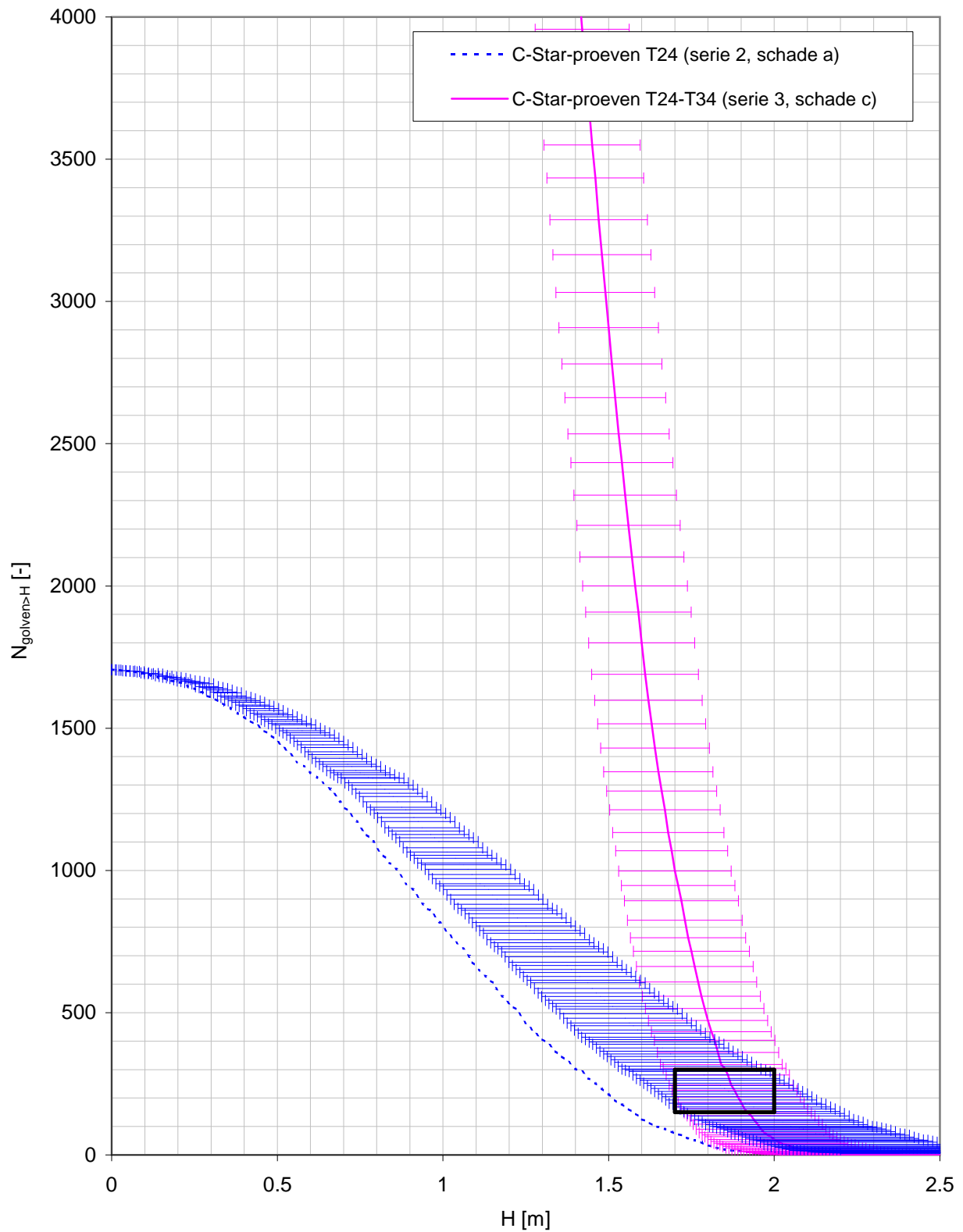
Golfhoogteoverschrijdingskrommen tot moment van schade  
RonaTon+

**Deltares**

1206424-015

Fig. B.5

### C-Star



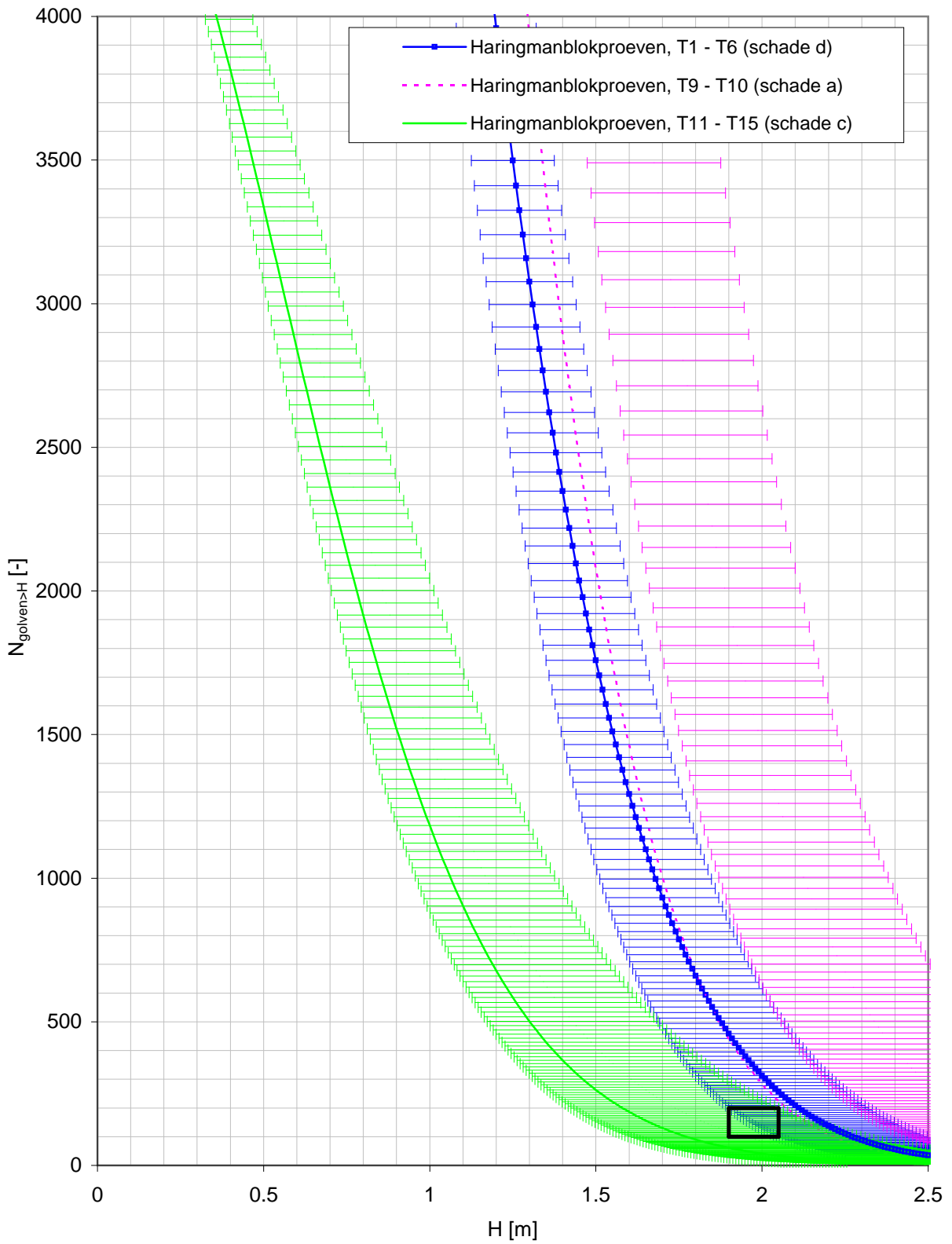
Golfhoogteoverschrijdingskrommen tot moment van schade  
C-Star

**Deltares**

1206424-015

Fig. B.6

### Haringmanblokken

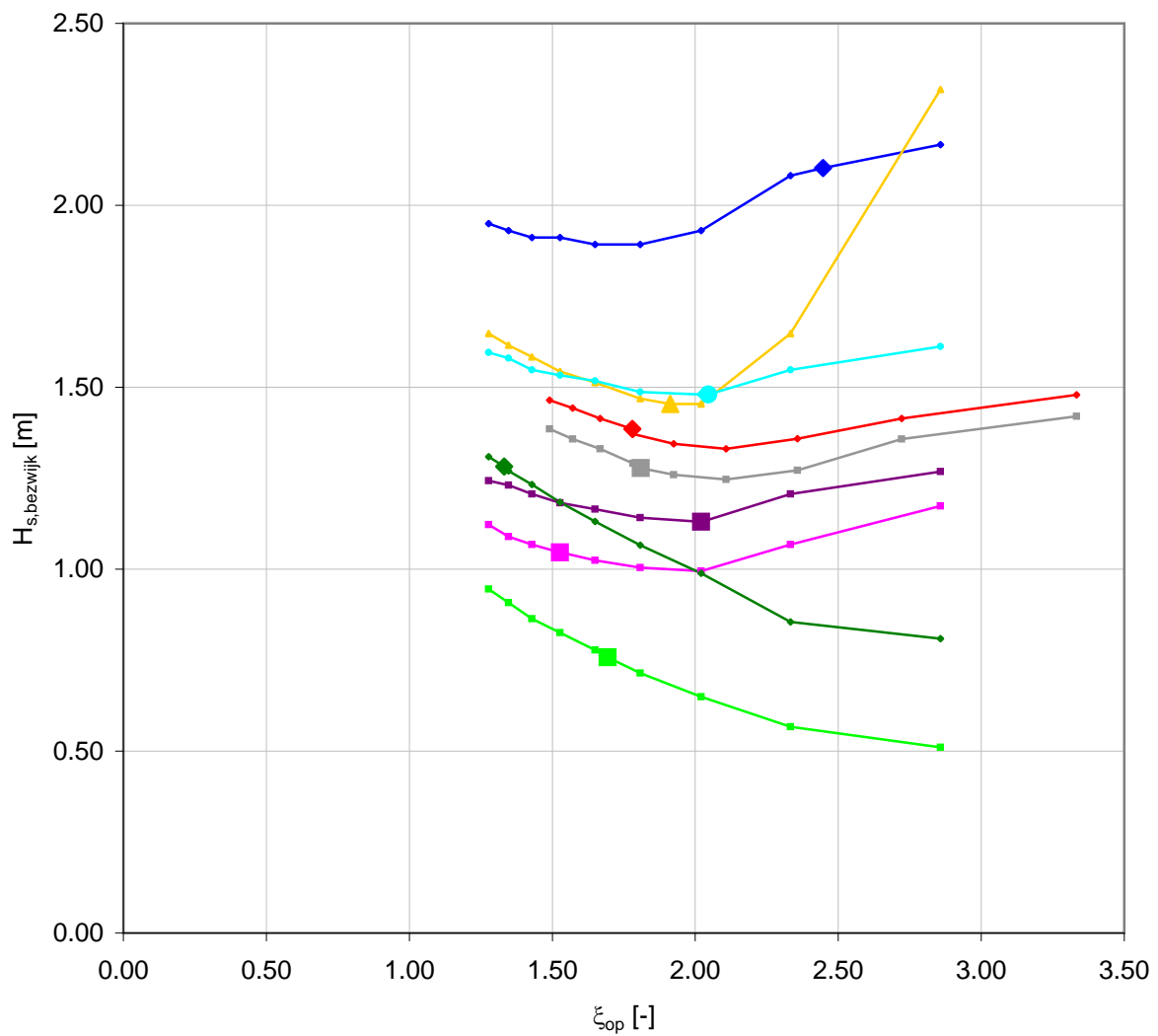


Golfhoogteoverschrijdingskrommen tot moment van schade  
Haringmanblokken

**Deltares**

1206424-015

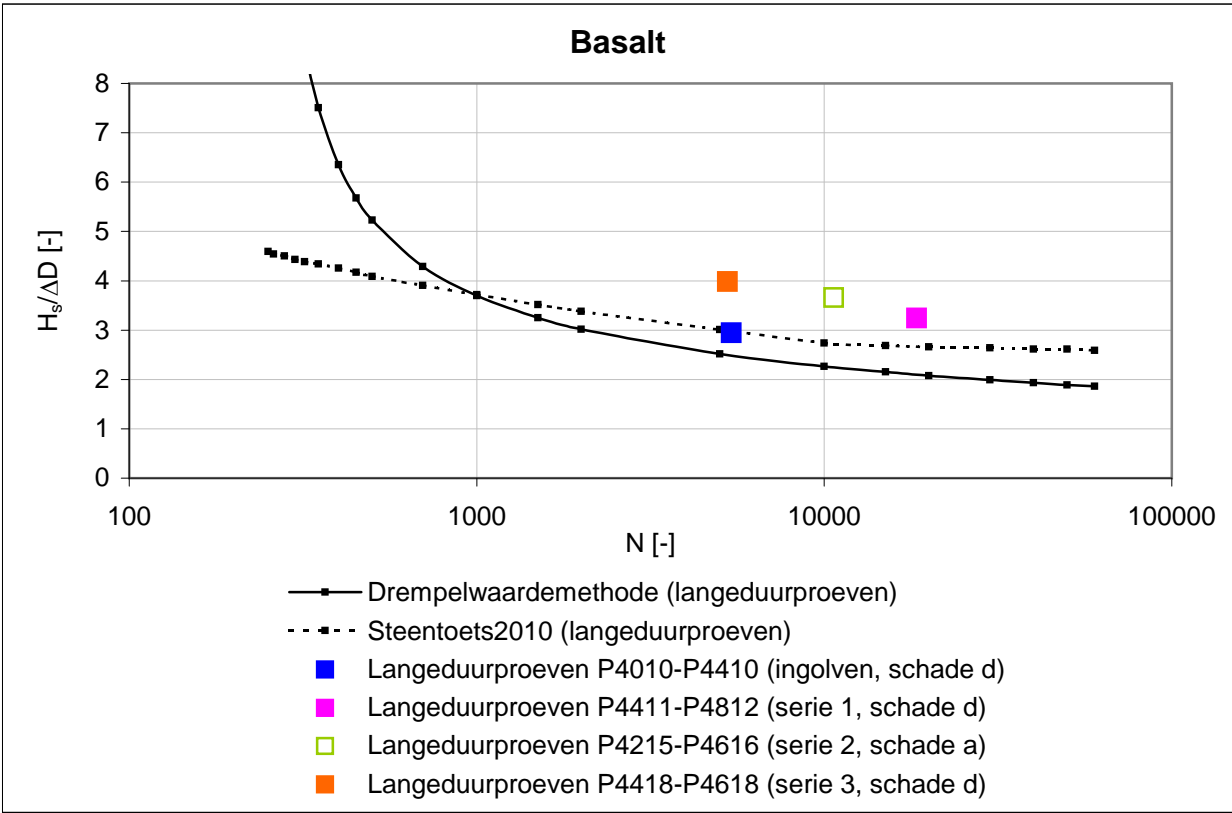
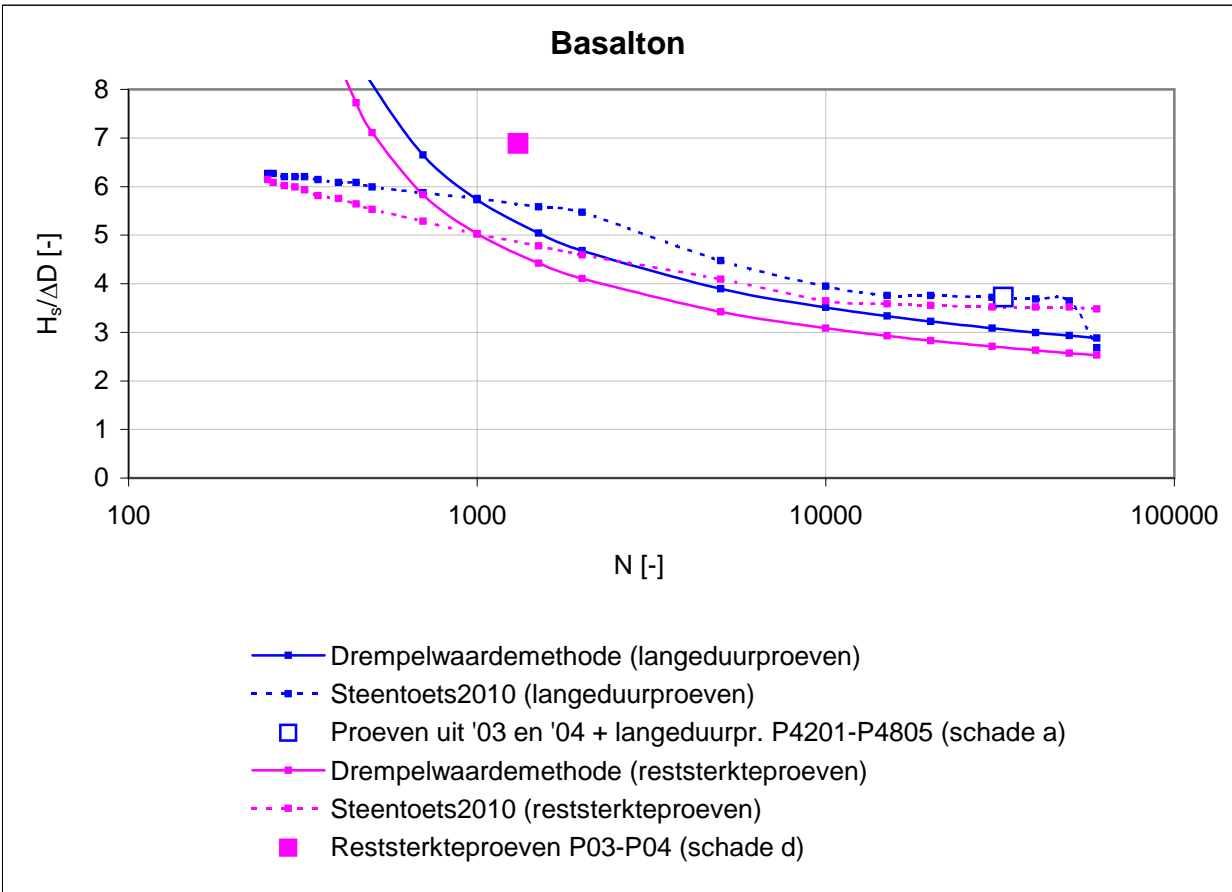
Fig. B.7



- Basalton (proeven '03 en '04 + langeduurproeven)
- Basalton (reststerkteproeven)
- ▲— Basalt (langeduurproeven)
- Blokken op hun kant (langeduurproeven)
- Hydroblocks D = 15 cm (langeduurproeven)
- Hydroblocks D = 20 cm (langeduurproeven)
- RonaTon+ (RonaTon+-proeven)
- C-Star (C-star-proeven)
- Haringmanblokken; niet ingewassen (Haringmanblokproeven)

Bezwijkgolffhoogte  $H_{s,bezwijk}$  [m] als functie van brekerparameter  $\xi_{op}$  [m] voor alle modelopstellingen volgens Steentoets2010 (N = 1000 golven)





Vergelijking drempelwaardemethode met meetresultaten  
Deltagootproeven en rekenresultaten Steentoets2010

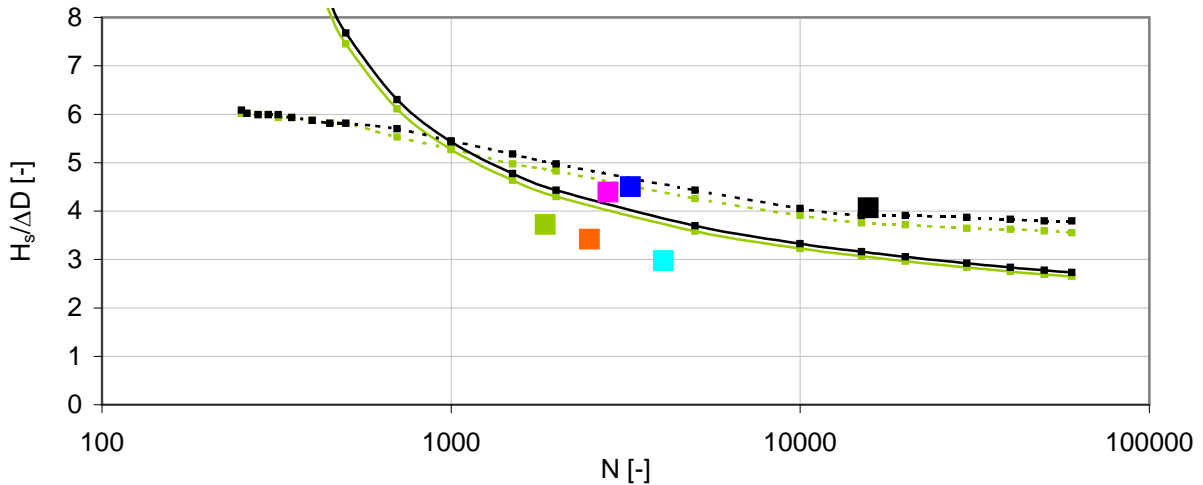
Basalton en Basalt

**Deltares**

1206424-015

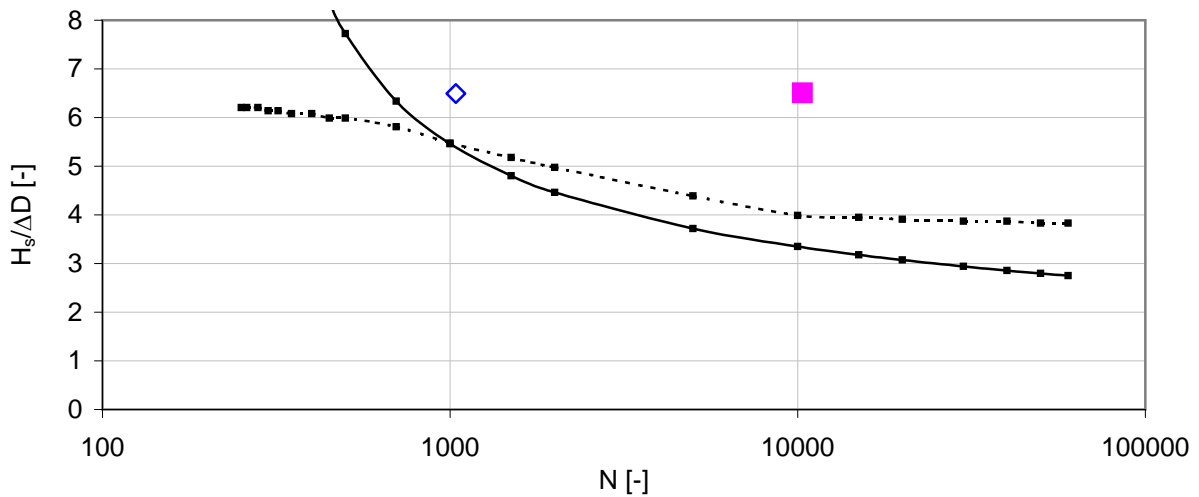
Fig. B.9

### Hydroblocks



- Drempelwaardemethode (langeduurproeven; D = 15 cm)
- - -■- Steentoets2010 (langeduurproeven; D = 15 cm)
- Langeduurproeven P5050-P5252 (D=0,15m, serie 1, schade d)
- Langeduurproeven P4150-P4251 (D=0,15m, serie 2, schade d)
- Langeduurproeven P4151-P4252 (D=0,15m, serie 3, schade d)
- Langeduurproeven P4152 en P4253 (D=0,15m, serie 4, schade d)
- Langeduurproeven P4255-P4457 (D=0,15m, serie 5, schade d)
- Drempelwaardemethode (langeduurproeven; D = 20 cm)
- - -■- Steentoets2010 (langeduurproeven; D = 20 cm)
- Langeduurproeven P4260-P4860 (D=0,20m, serie 6, schade d)

### RonaTon+



- Drempelwaardemethode (RonaTon+-proeven)
- - -■- Steentoets2010 (RonaTon+-proeven)
- ◇ RonaTon+-proeven T9 (serie 2, schade b)
- RonaTon+-proeven T9-T11B (serie 3, schade d)

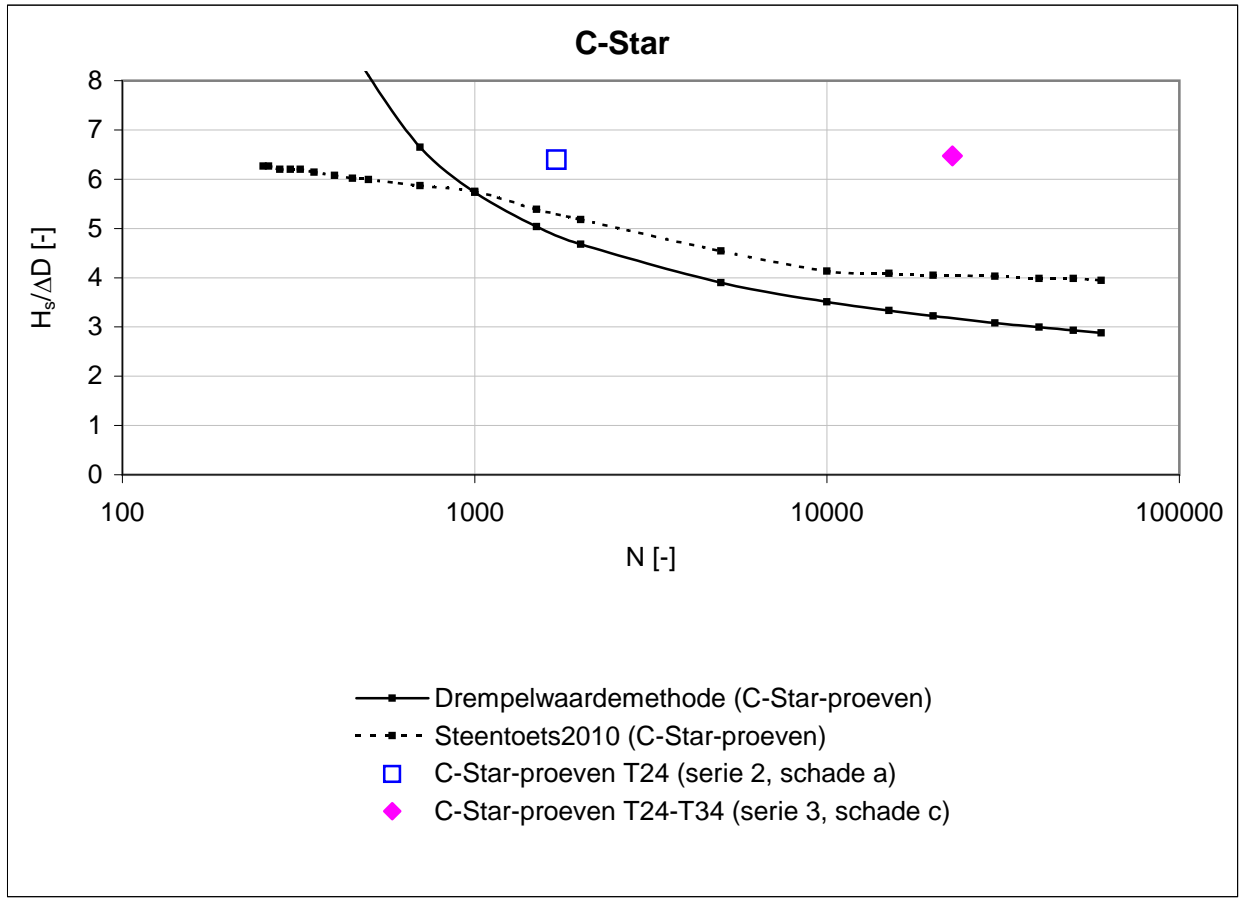
Vergelijking drempelwaardemethode met meetresultaten  
Deltagootproeven en rekenresultaten Steentoets2010

Hydroblocks en RonaTon+

Deltares

1206424-015

Fig. B.10



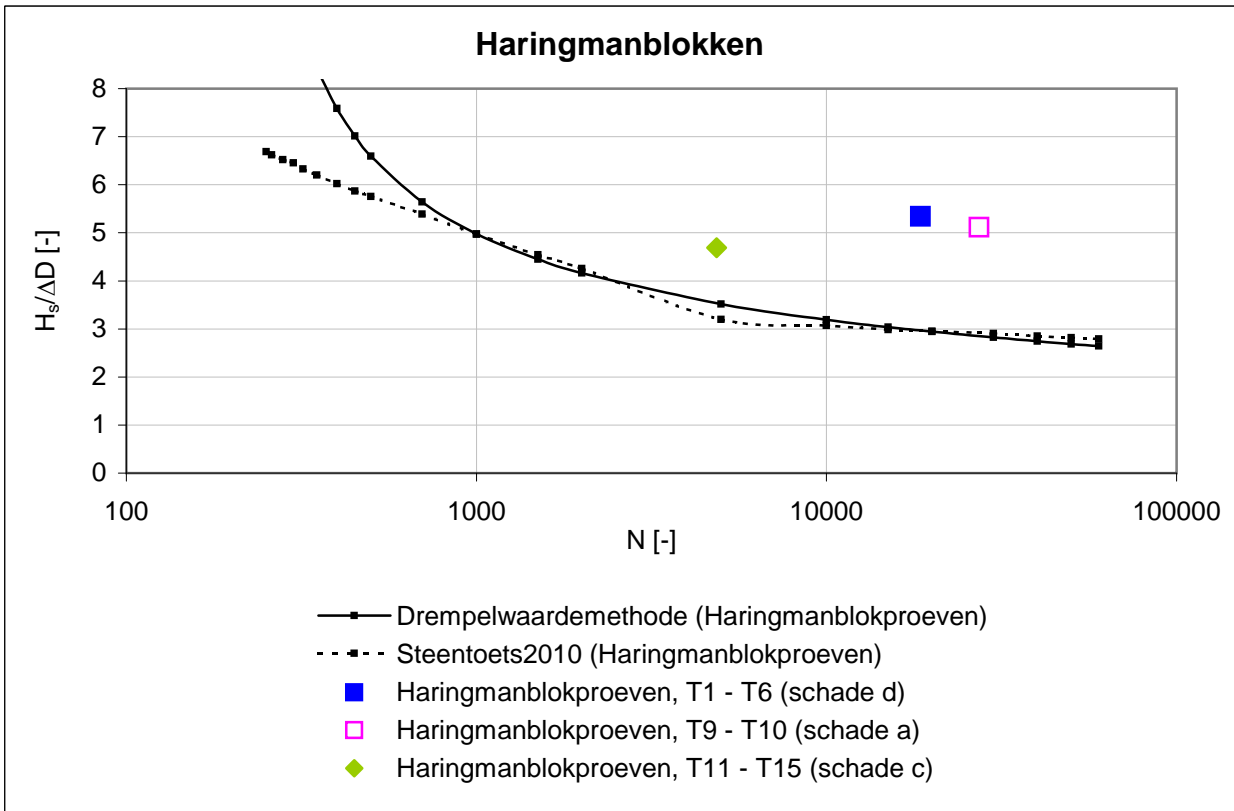
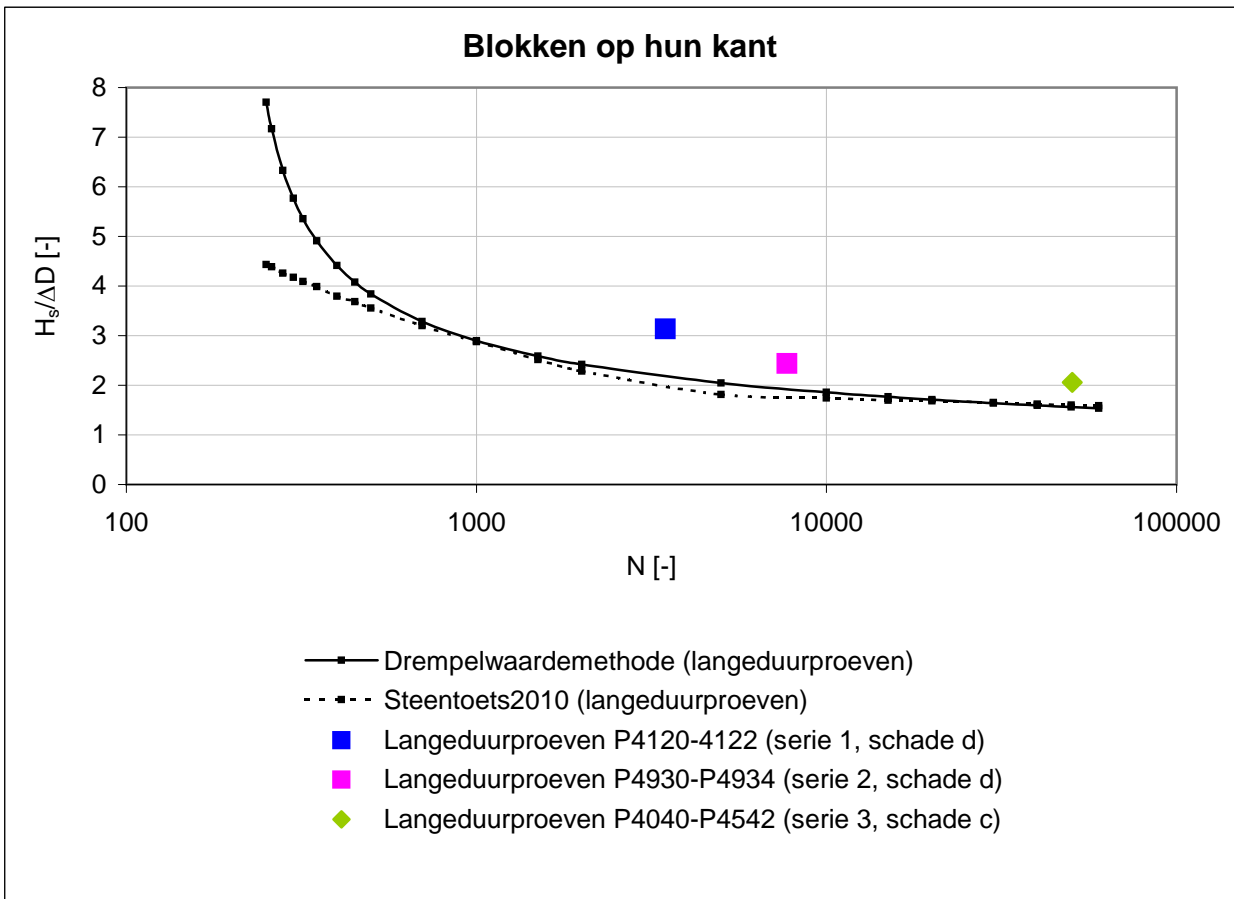
Vergelijking drempelwaardemethode met meetresultaten  
Deltagootproeven en rekenresultaten Steentoets2010

C-Star

**Deltares**

1206424-015

Fig. B.11



Vergelijking drempelwaardemethode met meetresultaten  
Deltagootproeven en rekenresultaten Steentoets2010

Blokken o.h. kant en Haringmanbl.

**Deltares**

1206424-015

Fig. B.12