

**Veiligheidsfactor voor  
ontwerpen met Steentoets2010  
voor blokken op hun kant**





**Veiligheidsfactor voor  
ontwerpen met Steentoets2010  
voor blokken op hun kant**

Dorothea Kaste  
Mark Klein Breteler

1208045-015



**Titel**

Veiligheidsfactor voor ontwerpen met Steentoets2010 voor blokken op hun kant

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Rijkswaterstaat Waterdienst	1208045-015	1208045-015-HYE-0001	23

**Trefwoorden**

Veiligheidscoëfficiënt, steenzetting, ontwerp

**Samenvatting**

Voor het berekenen van de stabiliteit van steenzettingen is al meer dan een decennium het programma Steentoets beschikbaar. Dit programma wordt gebruikt bij de voorgeschreven toetsing van steenzettingen, maar wordt ook gebruikt voor het ontwerpen van steenzettingen. Voor het toetsen is in 2009 aangetoond dat Steentoets voldoende veilige resultaten oplevert (Klein Breteler, 2009, validatie). Er is echter behoefte aan een realistische veiligheidscoëfficiënt voor de toepassing van Steentoets bij het maken van een ontwerp. Juist bij het ontwerpen is er behoefte aan een extra veiligheidsmarge om te zorgen dat er voldoende rekening wordt gehouden met onzekerheden in de uitvoering.

Bij een eerdere poging om de veiligheidscoëfficiënt te bepalen ('t Hart, 2012) bleek dit erg arbeidsintensief te zijn vanwege de complexiteit van Steentoets in combinatie met de complexiteit van probabilistische berekeningen. Deze problematiek is thans het hoofd geboden door gebruik te maken van de vereenvoudigde formules van Klein Breteler en Mourik (2014b) en een Matlab-programma 'Probabilistic Toolbox' voor het maken van probabilistische berekeningen uit het onderzoeksprogramma SBW-WTI (OET, 2013).

Het huidige onderzoek beperkt zich tot steenzettingen van blokken op hun kant op een talud (niet op een berm) die niet zijn ingegoten met gietasfalt. In een eerder onderzoek is al een veiligheidscoëfficiënt bepaald voor betonzuilen (Kaste en Klein Breteler, 2013). In dit onderzoek is dezelfde aanpak gebruikt voor blokken op hun kant.

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.

# Deltares

## Titel

Veiligheidsfactor voor ontwerpen met Steentoets2010 voor blokken op hun kant





<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Rijkswaterstaat Waterdienst	1208045-015	1208045-015-HYE-0001	23

## Referenties

Waterdienst zaaknummer 31080349 / 4500210457 van 26 maart 2013

Contactpersoon Waterdienst: dhr. K. Saathof

Contactpersoon Projectbureau Zeeweringen van RWS: dhr. Y. Provoost

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	nov. 2013	Dorothea Kaste		Robert 't Hart		Marcel van Gent	
2	feb. 2014	Dorothea Kaste		Robert 't Hart		Marcel van Gent	

## Status

definitief

## Inhoud

<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
<b>2 Opzet van het onderzoek</b>	<b>3</b>
2.1 Rekenmethode	3
2.2 Toelaatbare faalkans	5
2.3 Modelfactor van Steentoets	5
<b>3 Narekenen van de case “blokken op hun kant” van ’t Hart</b>	<b>7</b>
3.1 Inleiding	7
3.2 Invoer	7
3.3 Resultaten	8
<b>4 Aanpassen van waarden door nieuwe kennis</b>	<b>11</b>
4.1 Inleiding	11
4.2 Invoer	11
4.3 Resultaten	14
<b>5 Berekeningen met de nieuw vastgelegde karakteristieke waarde van de spleetbreedte</b>	<b>17</b>
5.1 Inleiding	17
5.2 Invoer	17
5.3 Resultaten	17
<b>6 Conclusie</b>	<b>21</b>
<b>7 Literatuur</b>	<b>23</b>
 <b>Bijlage(n)</b>	
<b>A Details van de berekeningen</b>	<b>A-1</b>
A.1 Input parameters	A-1
A.2 Stabiliteit van de steenzetting uit blokken op hun kant	A-1
A.3 Probabilistische berekeningen	A-5
<b>B Waarden van de correctiefactor</b>	<b>B-1</b>
<b>C Modelfactor voor blokken op hun kant</b>	<b>C-1</b>
C.1 General explanations	C-1
C.1.1 Model factor for Steentoets	C-1
C.1.2 Chosen probability distribution for the model factor	C-2
C.1.3 Lower limit of the probability distribution	C-2
C.2 Model factors for different types of block revetment	C-2
C.2.1 Blocks placed on their side	C-3
C.3 References	C-4





## Lijst van Tabellen

Tabel 3.1	Deterministische invoerparameter en waarden voor het narekenen van 't Hart .	7
Tabel 3.2	Statistische invoerparameter en waarden voor de normaalverdeling voor het narekenen van 't Hart .....	8
Tabel 3.3	Invloedsparameters $\alpha$ en $\alpha^2$ voor de statistische parameters voor het narekenen van 't Hart met de resultaten van 't Hart .....	9
Tabel 4.1	Waarden voor de spleetbreedte van de drie meetlocaties en gemiddeld voor 1 m <sup>2</sup> .....	12
Tabel 4.2	Aangepaste parameter met de nieuwe waarden .....	13
Tabel 4.3	Gevarieerde parameters met waarden voor de berekeningen met de aangepaste waarden.....	13
Tabel 4.4	Resultaten van de berekeningen met de aangepaste waarden .....	14
Tabel 4.5	Invloedsparameter $\alpha$ voor de berekeningen met de aangepaste waarden.....	15
Tabel 4.6	Invloedsparameter $\alpha^2$ voor de berekeningen met de aangepaste waarden.....	16
Tabel 4.7	Gemiddelde $\alpha$ en $\alpha^2$ voor de berekeningen met de aangepaste waarden.....	16
Tabel 5.1	Gevarieerde parameters met waarden voor de berekeningen met de karakteristieke waarde van de spleetbreedte .....	17
Tabel 5.2	Resultaten van de berekeningen met de karakteristieke waarde van de spleetbreedte .....	18
Tabel 5.3	Invloedsparameter $\alpha$ voor de berekeningen met de karakteristieke waarde van de spleetbreedte.....	19
Tabel 5.4	Invloedsparameter $\alpha^2$ voor de berekeningen met de karakteristieke waarde van de spleetbreedte.....	19
Tabel 5.5	Gemiddelde $\alpha$ en $\alpha^2$ voor de berekeningen met de aangepaste waarden.....	20
Tabel A.1	Lijst van alle benodigde input parameters .....	A-2
Table C.1	Values for the determination of the model factor for blocks placed on their side .....	C-3
Table C.2	Parameters of the lognormal distribution of the model factor for blocks placed on their side .....	C-3



## Lijst met Figuren

Figuur 2.1	Volgorde van de berekeningen .....	3
Figuur A.1	Geometrie van de steenzetting met de benodigde input parameters.....	A-1
Figure C.1	Cumulative distribution function of the model factor with the determined values of the tests for blocks placed on their side (x = model factor) .....	C-4



## Lijst met Symbolen

Symbol	Eenheid	Omschrijving
$B$	[m]	Breedte van de blokken
$b_f$	[m]	Dikte van de filterlaag
$\cot\alpha$	[-]	Cotangens van de taludhelling
$D$	[m]	Dikte van de toplaag
$D_{f15}$	[m]	Korrelgrootte filtermateriaal
$D_{i15}$	[m]	Korrelgrootte van het inwassing materiaal
$D_O$	[m]	Ontwerpwaarde van de toplaagdikte
$D_{prob}$	[m]	Toplaagdikte, die tot de toelaatbare faalkans van 5% leidt
$f_c$	[-]	Correctiefactor voor de probabilistische berekeningen
$f_{s,front}$	[-]	Invloed van de belastingduur
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Versnelling van de zwaartekracht
$h$	[m+NAP]	Waterstand
$H_s$	[m]	Significante golfhoogte
$H_{s,stab}$	[m]	Berekende acceptabele golfhoogte
$\left[ \frac{H_s}{\Delta D} \right]$	[-]	Stabiliteitsparameter van de steenzetting
$\left[ \frac{H_s}{\Delta D} \right]_{ST}$	[-]	Stabiliteitsparameter berekend met Steentoets
$\left[ \frac{H_s}{\Delta D} \right]_F$	[-]	Stabiliteitsparameter berekend met de vereenvoudigde formules
$\left[ \frac{H_s}{\Delta D} \right]_{proeven}$	[-]	Stabiliteitsparameter volgens de grootschalige proeven
$\left[ \frac{H_s}{\Delta D} \right]_{Steentoets}$	[-]	Stabiliteitsparameter volgens Steentoets berekeningen
$\left[ \frac{H_s}{\Delta D} \right]_{max}$	[-]	Maximalwaarde van de stabiliteitsparameter
$L$	[m]	Lengte van de blokken
$m$	[-]	Modelfactor voor Steentoets
$N$	[-]	Aantal golven
$N_{calc}$	[-]	Aantal realisaties in de Monte Carlo simulatie

Symbol	Eenheid	Omschrijving
$n_f$	[-]	Porositeit van het filter materiaal
$N_{fail}$	[-]	Aantal falen in de Monte Carlo simulatie
$n_i$	[-]	Porositeit van het inwassing materiaal
$p_f$	[-]	Faalkans
$R$		Weerstand (Resistance)
$S$		Belasting (Solicitation)
$s_l$	[m]	Spleetbreedte van de langsvoeegen
$s_{op}$	[-]	Golfsteilheid
$s_s$	[m]	Spleetbreedte van de stootvoegen
$\tan\alpha_{Bodem}$	[-]	Helling van het voorland
$t_{Belast}$	[h]	Belastingduur
$X_{lim}$	[-]	Ondergrens van de modelfactor
$Z_B$	[m+NAP]	Hoogte van de bovengrens van de steenzetting
$Z_{Berm}$	[m+NAP]	Hoogte van de berm
$Z_{Bodem}$	[m]	Hoogte van de dijkteen
$Z_O$	[m+NAP]	Hoogte van de ondergrens van de steenzetting
$\beta$	[°]	Golfinvalshoek
$\Delta$	[-]	Relatieve soortelijke massa van de blokken
$\gamma$	[-]	Veiligheidscoëfficiënt
$\Lambda$	[-]	Leklengte
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	Kinematische viscositeit
$\mu$		Gemiddelde van de normaalverdeling
$\rho_s$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Soortelijke massa van de blokken
$\rho_w$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Soortelijke massa van het water
$\sigma$		Standaardafwijking van de normaalverdeling
$\mu_{LN}$		$\mu$ van de lognormale verdeling
$\sigma_{LN}$		$\sigma$ van de lognormale verdeling
$\xi_{op}$	[-]	Brekerparameter

## 1 Inleiding

In Nederland zijn veel dijken aan de kust met een steenzetting versterkt. De steenzettingen worden ontworpen en getoetst met het programma Steentoets. Voor het toetsen is in 2009 aangetoond dat Steentoets voldoende veilige resultaten oplevert (Klein Breteler, 2009, validatie). Er is echter behoefte aan een realistische veiligheidscoëfficiënt voor de toepassing van Steentoets bij het maken van een ontwerp. Daarom is nu een veiligheidscoëfficiënt bepaald op basis van probabilistische berekeningen. Een eerste aanpak was gedaan door 't Hart (2012). Maar vanwege de complexiteit van Steentoets in combinatie met de complexiteit van de probabilistische berekeningen was het moeilijk om de veiligheidscoëfficiënt te bepalen.

In het daaropvolgende onderzoek was dit minder moeilijk, omdat er vereenvoudigde formules voor de stabiliteit van steenzettingen zijn opgesteld door Klein Breteler en Mourik (2014b). De vereenvoudigde formules zijn minder complex dan Steentoets en geven voor een beperkt aantal types steenzettingen voldoende nauwkeurige resultaten. Met deze vereenvoudigde formules is het makkelijker om probabilistische berekeningen uit te voeren. Hiermee zijn al berekeningen gedaan om de veiligheidscoëfficiënt voor betonzuilen te bepalen (Kaste en Klein Breteler, 2013).

In het huidige onderzoek is met dezelfde aanpak de veiligheidscoëfficiënt voor blokken op hun kant bepaald als eerder is gedaan voor betonzuilen (Kaste en Klein Breteler, 2013). De vereenvoudigde formules voor blokken op hun kant zijn opgesteld in Klein Breteler en Mourik (2014b). Daarmee zijn probabilistische berekeningen gedaan met de Monte Carlo methode.

De stabiliteitsberekeningen worden in de praktijk doorgaans gebruikt om te bepalen tot welk niveau op de dijk de blokken op hun kant toegepast kunnen worden. De hier afgeleide veiligheidsfactor kan hiervoor uitstekend gebruikt worden.

Nadat de opzet van het onderzoek gegeven is (hoofdstuk 2), is in het eerste deel van het onderzoek (hoofdstuk 3) dezelfde case doorgerekend als die door 't Hart (2012) berekend is. Door nieuw beschikbare proeven en metingen konden sommige parameters beter bepaald worden, waarmee de probabilistische berekeningen zijn uitgevoerd die gebruikt zijn om een veiligheidsfactor af te leiden (hoofdstuk 4). Omdat de veiligheidsfactor sterk afhankelijk blijkt te zijn van de keuze van de rekenwaarde van de spleetbreedte, is i.p.v. de gebruikelijke ontwerpwaarde een karakteristieke waarde voorgesteld voor de spleetbreedte. De berekeningen zijn in hoofdstuk 4 en 5 gepresenteerd. In hoofdstuk 6 is de conclusie gegeven ten aanzien van de geadviseerde karakteristieke waarde voor de spleetbreedte en de veiligheidsfactor.





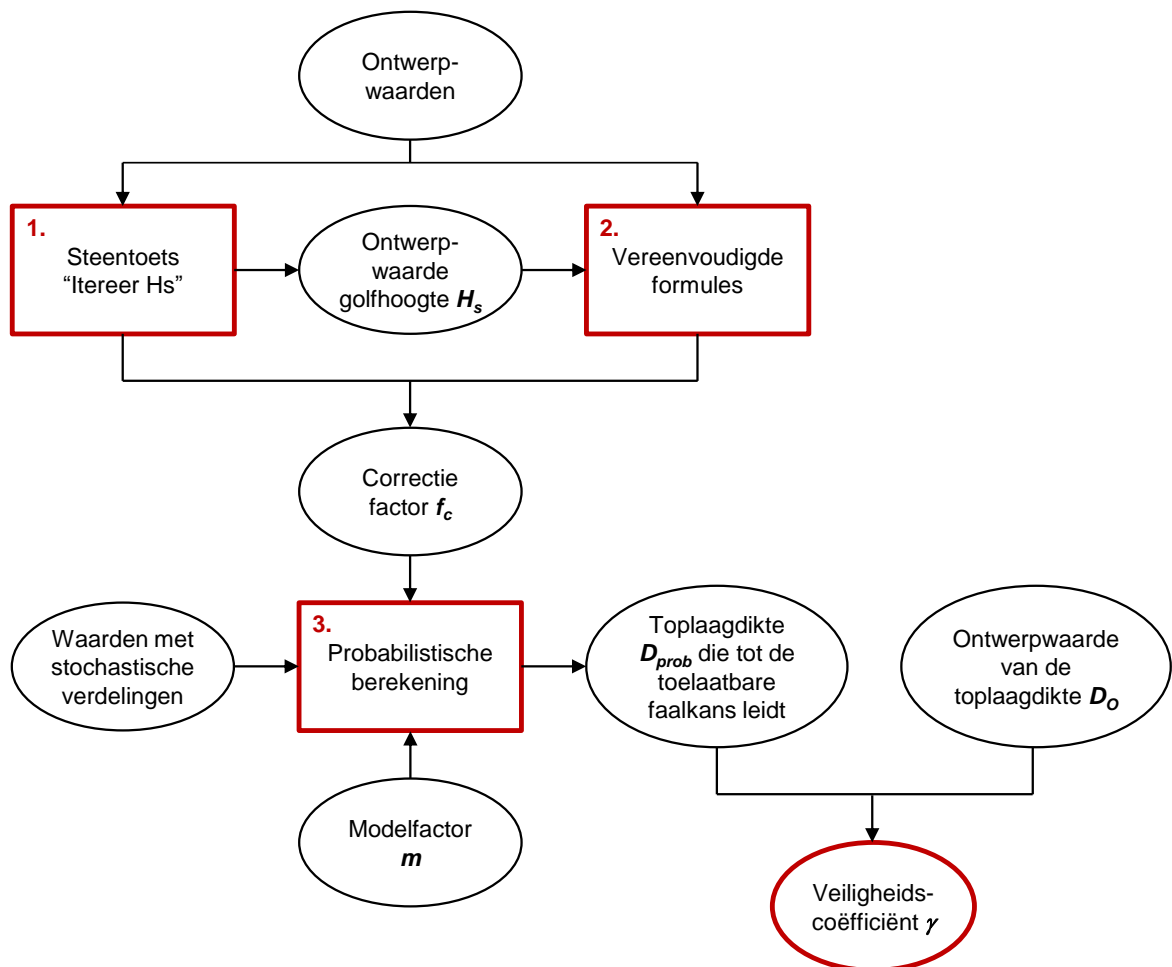
## 2 Opzet van het onderzoek

### 2.1 Rekenmethode

De berekeningen om de veiligheidscoëfficiënt voor blokken op hun kant te bepalen zijn op dezelfde manier uitgevoerd als in het rapport van Kaste en Klein Breteler (2013) voor zuilen. Er worden drie berekeningen uitgevoerd voor elke case, wat in Figuur 2.1 wordt getoond:

- Een deterministische berekening met Steentoets,
- een deterministische berekening met de vereenvoudigde formules en
- de probabilistische berekening, ook met de vereenvoudigde formules (hieronder nader uitgelegd in Figuur 2.1).

Voor de huidige berekeningen is Steentoets2010 versie 1.11 gebruikt, die ook voor het bepalen van de vereenvoudigde formules is gebruikt.



Figuur 2.1 Volgorde van de berekeningen

Ten eerste wordt een deterministische berekening uitgevoerd met Steentoets met de ontwerpwaarden van de parameters. Meer informatie over de invoerwaarden staat in paragraaf 3.2, resp. 4.2 en 5.2. In Steentoets wordt de optie "Itereer Hs" gebruikt om de

golfhoogte te bepalen waarbij de steenzetting net stabiel is. Deze golfhoogte wordt als ontwerpwaarde beschouwd en wordt verder gebruikt in de daaropvolgende berekeningen.

Ten tweede wordt er een deterministische berekening uitgevoerd met de vereenvoudigde formules voor blokken op hun kant met dezelfde invoer als bij Steentoets. De eerder berekende golfhoogte wordt hierbij ook gebruikt.

Beide berekeningen, die met Steentoets en met de vereenvoudigde formules, leveren de stabiliteitsparameter  $H_s/(\Delta D)$  op. Door deze te vergelijken wordt de nauwkeurigheid van de vereenvoudigde formules bepaald. Er wordt een correctiefactor  $f_c$  geïntroduceerd, die in de probabilistische berekeningen wordt gebruikt om de onnauwkeurigheid van de vereenvoudigde formules te compenseren.

$$f_c = \frac{\left[ \frac{H_s}{\Delta D} \right]_{ST}}{\left[ \frac{H_s}{\Delta D} \right]_F} \quad (2.1)$$

met:

$f_c$  = correctiefactor voor de probabilistische berekeningen [-]

$\left[ \frac{H_s}{\Delta D} \right]_{ST}$  = stabiliteitsparameter berekend met Steentoets [-]

$\left[ \frac{H_s}{\Delta D} \right]_F$  = stabiliteitsparameter berekend met de vereenvoudigde formules [-]

Ten slotte wordt een probabilistische berekening uitgevoerd. Daarbij wordt de Monte Carlo methode gebruikt (zie bijlage A.3 voor meer informatie). De probabilistische berekeningen zijn met de scripts vanuit de probabilistic toolbox van de OpenEarth Tools (OET, 2013) in Matlab uitgevoerd. De invoer voor de probabilistische berekeningen bestaat uit de werkelijke waarden, met de onzekerheden van de parameters. Voor de belangrijkste invoerparameters worden statistische verdelingen gebruikt.

In de probabilistische berekeningen wordt de toplaagdikte zodanig gekozen, dat de toelaatbare faalkans (zie paragraaf 2.2) wordt bereikt. Dit is de minimaal toelaatbare toplaagdikte volgens de probabilistische berekeningen.

Met de ontwerpwaarde van de toplaagdikte en de waarde vanuit de probabilistische berekeningen wordt de veiligheidscoëfficiënt bepaald:

$$\gamma = \frac{D_{prob}}{D_O} \quad (2.2)$$

met:

$\gamma$  = veiligheidscoëfficiënt [-]

$D_{prob}$  = toplaagdikte, die tot de toelaatbare faalkans van 5% leidt [m]

$D_O$  = ontwerpwaarde van de toplaagdikte [m]

De veiligheidscoëfficiënt geeft aan hoeveel veiligheid in de Steentoets-berekeningen zit. Als de probabilistisch bepaalde dikte groter is dan de deterministische ontwerpwaarde volgens Steentoets dan is het ontwerp onvoldoende veilig. De veiligheidscoëfficiënt is in dit geval groter dan 1. De toplaagdikte moet bij het ontwerp van een steenzetting met de veiligheidscoëfficiënt vermenigvuldigd worden.

## 2.2 Toelaatbare faalkans

Het criterium waar de steenzetting aan moet voldoen wordt in dit onderzoek uitgedrukt in een faalkans. 't Hart (2012) heeft hiervoor 5% gekozen, gegeven het optreden van de ontwerpcondities. Deze eis volgt uit de diverse TAW/ENW-leidraden en een schatting van de te verwachten reststerkte.

Bijvoorbeeld in de Leidraad Grondslagen voor Waterkeringen (TAW, 1998) staat het volgende vermeld voor de thans geldende overbelastingsbenadering per dijkvak:

Veiligheidseisen:

1. De kans op overschrijden van het debiet  $q_t$  mag voor elk dijkvak niet groter zijn dan de norm die in de Wet op de waterkering voor het betreffende dijkkringgebied is genoemd. Daarbij wordt meestal uitgegaan van een ontwerpwaterstand (MHW), waarbij een golf hoort, waaruit weer een golfploop c.q. golfoverslagdebiet volgt;
2. Bij waterstanden gelijk aan of lager dan MHW mag de kans op falen door andere oorzaken dan overloop/overslag, niet meer dan 10% van de bij punt 1 genoemde norm bedragen.

Voor steenzettingen gaat het om het tweede punt. Daarbij moet meegewogen worden dat er meerdere 'andere oorzaken' (bezwijkmechanismen) zijn, zoals piping, macro-instabiliteit, stabiliteit steenzetting, etc. Daardoor wordt doorgaans per bezwijkmechanisme een faalkans van 1% gehanteerd. Maar gezien het feit dat er een aanzienlijke reststerkte is na de initiële schade aan een steenzetting, kan er een hogere faalkans gehanteerd worden. 't Hart (2012) heeft hiervoor arbitrair 5% gekozen. Het toepassen van een lagere waarde (anticiperen op een kleinere reststerkte) geeft een hogere benodigde veiligheidsfactor. In het kader van het thans lopende WTI2017-onderzoek naar reststerkte wordt onderzocht of deze keuze terecht is.

## 2.3 Modelfactor van Steentoets

De modelfactor geeft de onzekerheid van Steentoets weer met betrekking tot de werkelijkheid. Daarvoor zijn Steentoets-berekeningen vergeleken met proeven, die op grote schaal uitgevoerd zijn. De modelfactor is de verhouding tussen de stabiliteitsparameter  $H_s/(\Delta D)$  volgens de proeven enerzijds en berekend met Steentoets anderzijds:

$$m = \frac{[H_s / (\Delta D)]_{proeven}}{[H_s / (\Delta D)]_{Steentoets}} \quad (2.3)$$

met:

$m$  = modelfactor voor Steentoets [-]

$$\left[ \frac{H_s}{\Delta D} \right]_{\text{proeven}} = \text{stabiliteitsparameter volgens de grootschalige proeven [-]}$$

$$\left[ \frac{H_s}{\Delta D} \right]_{\text{Steentoets}} = \text{stabiliteitsparameter volgens Steentoets berekeningen [-]}$$

In het onderzoek van 't Hart (2012) was de modelfactor al bepaald op basis van een beperkte range van proeven. Voor het huidige onderzoek zijn meer proeven beschikbaar waardoor de modelfactor verbeterd kan worden. Er zijn proeven beschikbaar voor de verschillende typen steenzettingen. De bepaling van de modelfactoren is beschreven in de memo "Model factor for Steentoets" van Dorothea Kaste (april 2013). Deze is in het huidige rapport opgenomen als bijlage C. De nieuwe waarde van de modelfactor is gebruikt in de berekeningen met de aangepaste waarden (hoofdstuk 4, zie paragraaf 4.2).

### 3 Narekenen van de case “blokken op hun kant” van 't Hart

#### 3.1 Inleiding

In het rapport van 't Hart (2012) is al eerder de veiligheid van Steentoets onderzocht. Er zijn toen probabilistische berekeningen met het Steentoets programma gemaakt, wat vrij arbeidsintensief was vanwege de complexiteit van Steentoets in combinatie met de complexiteit van de probabilistische berekeningen. Daarom is slechts één case per type steenzetting berekend.

Met behulp van de vereenvoudigde formules is in het rapport van Kaste en Klein Breteler (2013) het onderzoek herhaald voor betonzuilen. Met de vereenvoudigde formules is het veel makkelijker om de probabilistische berekeningen uit te voeren. In het huidige rapport wordt de veiligheid van Steentoets voor blokken op hun kant onderzocht met de vereenvoudigde formules voor blokken op hun kant. Deze zijn sinds kort beschikbaar (Klein Breteler en Mourik, 2014b).

#### 3.2 Invoer

Voor deze berekeningen zijn dezelfde invoerwaarden gekozen als bij 't Hart (2012). Sommige parameters, die geen grote invloed op het resultaat of geen grote spreiding hebben, hebben deterministische waarden gekregen. Ze zijn gegeven in Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Deterministische invoerparameter en waarden voor het narekenen van 't Hart

Variabele	Symbool	Eenheid	Waarde
Golfinvalshoek	$\beta$	[°]	0
Blokbreedte	$B$	[m]	0,50
Bloklengte	$L$	[m]	0,25
Bovengrens van de steenzetting	$z_B$	[m+NAP]	6,0
Ondergrens van de steenzetting	$z_O$	[m+NAP]	2,0
Versnelling van de zwaartekracht	$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	9,81
Kinematische viscositeit	$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	$1,2 \cdot 10^{-6}$
Soortelijke massa van het water	$\rho_W$	[kg/m <sup>3</sup> ]	1025,0

De parameters met de statistisch verdeelde waarden zijn gegeven in Tabel 3.2. Deze parameters hebben een grotere invloed op de resultaten en zijn dus met een statistische verdeling gekozen. Er is in alle gevallen gekozen voor een normale verdeling. De waarden voor het gemiddelde en de standaardafwijking zijn overgenomen van 't Hart (2012) en meer informatie kan daar worden gevonden. Tevens is de variatiecoëfficiënt  $V$  vermeld, die aangeeft hoe groot de relatieve spreiding is.

Voor de spleetbreedte  $s_s$  is een ondergrens geïntroduceerd ( $x_{lim} = 0$ ) om negatieve waarden te voorkomen.

De significante golfhoogte  $H_s$  is berekend met Steentoets met de optie “Itereer Hs” (zoals bij 't Hart). Daarvoor zijn voor alle invoerparameters de ontwerpwaarden genomen. Deze zijn in dit geval de gemiddelde waarden. De standaardafwijking voor de golfhoogte was door 't Hart

gekozen op 10 cm. De hier bepaalde waarde voor de significante golfhoogte is  $H_s = 2,69$  m. De bij 't Hart bepaalde waarde was  $H_{s,tHart} = 2,71$  m. Dit kleine verschil kan veroorzaakt zijn door de verschillende versies van Steentoets, die gebruikt zijn. Voor de huidige berekeningen is Steentoets2010 versie 1.11 gebruikt.

Tabel 3.2 Statistische invoerparameter en waarden voor de normaalverdeling voor het narekenen van 't Hart

Variabele	Symbol	Eenheid	Gemiddelde $\mu$	Standaard-afwijking $\sigma$	V = $\sigma/\mu$
Belastingduur	$t_{Belast}$	[h]	10,0	1,43	14,3%
Waterstand	$h$	[m+NAP]	5,2	0,1	
Significante golfhoogte	$H_s$	[m]	2,69	0,1	3,9%
Golfsteilheid	$s_{op}$	[-]	0,040	0,002	5,0%
Toplaagdikte	$D$	[m]	0,50	0,015	3,0%
Spleetbreedte	$s_s$	[mm]	3,65	1,34	36,7%
Soortelijke massa van de blokken	$\rho_s$	[kg/m <sup>3</sup> ]	2300,0	46,0	2,0%
Dikte filterlaag	$b_f$	[m]	0,10	0,02	20,0%
Porositeit filterlaag	$n_f$	[-]	0,35	0,05	14,3%
Korrel diameter filterlaag	$D_{f15}$	[mm]	5,20	0,60	11,5%
Taludhelling	$\cot\alpha$	[-]	3,5	0,25	7,1%
Modelfactor	$m$	[-]	1,35	0,31	23,0%

### 3.3 Resultaten

Met de invoerwaarden zijn de berekeningen uitgevoerd zoals beschreven in paragraaf 2.1. De waarde voor het gemiddelde van de toplaagdikte is zo gekozen dat de toelaatbare faalkans van  $p_f = 5\%$  bereikt wordt. De bepaalde toplaagdikte is  $D_{prob} = 0,65$  m. Dit leidt tot de veiligheidscoëfficiënt  $\gamma = D_{prob} / D_{ST} = 1,31$ .

De door 't Hart (2012) berekende veiligheidscoëfficiënt was  $\gamma_{tHart} = 1,30$ . Dit laat zien, dat de methode van 't Hart en de hier gebruikte methode vrijwel hetzelfde resultaat opleveren.

#### Invoersparameters

In het onderzoek van 't Hart (2012) worden partiële veiligheidscoëfficiënten voor elke parameter en de invloedsparameters  $\alpha$  en  $\alpha^2$  bepaald. In dit onderzoek is niet gekozen voor de partiële, maar voor de overall veiligheidscoëfficiënt. Desondanks worden de invloedsparameters bepaald, welke aangeven hoeveel invloed de variatie van de invoerparameters op het resultaat hebben. De invloedsparameters worden met de routine vanuit de probabilistic toolbox van de OpenEarth Tools berekend (OET, 2013). De invloedsparameters zijn in Tabel 3.3 gegeven, gesorteerd naar de relatieve invloed. Aanvullend worden de resultaten van het onderzoek van 't Hart gegeven.

De invloedsparameter  $\alpha$  kan waarden van -1 tot 1 aannemen. Negatieve waarden betekenen in dit geval dat als de parameter toeneemt, de stabiliteit groter wordt, dus de faalkans kleiner. Een positief  $\alpha$ -waarde betekent het tegenovergestelde: als de parameter groter wordt, wordt de stabiliteit kleiner en dus de faalkans groter. Daarom heeft de parameter  $H_s$  bijvoorbeeld een positieve waarde. De parameters  $D$ ,  $\rho_s$  en  $m$  hebben negatieve waarden, omdat de stabiliteit toeneemt bij een toename van de waarde. De golfsteilheid  $s_{op}$  heeft een negatieve waarde, hoewel zij bij de hydraulische belasting hoort. Maar een toename van de waarde

betekent hier ook een toename van de stabiliteit. De eigenschappen van de filterlaag,  $n_f$ ,  $b_f$  en  $D_{f15}$ , tonen positieve  $\alpha$ -waarden. Ze hebben met de lek lengte  $L$  een grote invloed op de stabiliteit.

De invloedsparemet  $\alpha^2$  geeft de invloed van de variatie van de parameters in relatie tot het geheel aan. Hij kan waarden van 0 tot 1 aannemen en kan ook als percentage worden gegeven.

Het blijkt dat de variatie van de modelfactor  $m$  de grootste invloed heeft op de resultaten. Dat is verklaarbaar, omdat de modelfactor direct de stabiliteit beïnvloedt. De spleetbreedte  $s_s$  heeft ook een vrij grote invloed op het resultaat.

Verder hebben nog de golfhoogte  $H_s$ , de soortelijke massa van de steenzetting  $\rho_s$  en de porositeit van de filterlaag  $n_f$  een kleine invloed op het resultaat.

Vergeleken met de resultaten van 't Hart blijken dezelfde parameters een belangrijke invloed te hebben. De procentuele invloed van de modelfactor bij 't Hart is wat kleiner, waardoor ook andere parameters wat meer invloed laten zien. Wat bij 't Hart opvalt is de relatief grote invloed van de porositeit  $n_f$  en de dikte  $b_f$  van de filterlaag. Bij de huidige berekeningen is daarentegen een grotere invloed van de spleetbreedte  $s_s$  te zien.

Tabel 3.3 Invloedsparemeters  $\alpha$  en  $\alpha^2$  voor de statistische paremeters voor het narekenen van 't Hart met de resultaten van 't Hart

Variabele	Symbool	Huidige berekeningen		Berekeningen 't Hart (2012)	
		$\alpha$	$\alpha^2$	$\alpha$	$\alpha^2$
Modelfactor	$m$	-0,90	0,82	-0,89	0,79
Spleetbreedte	$s_s$	-0,39	0,15	-0,12	0,01
Significante golfhoogte	$H_s$	0,09	0,01	0,15	0,02
Soortelijke massa van de blokken	$\rho_s$	-0,08	0,01	-0,09	0,01
Porositeit filterlaag	$n_f$	0,08	0,01	0,28	0,08
Toplaagdikte	$D$	-0,07	0,00	-0,14	0,02
Dikte filterlaag	$b_f$	0,05	0,00	0,22	0,05
Taludhelling	$\cot\alpha$	-0,05	0,00	-0,03	0,00
Korreldiameter filterlaag	$D_{f15}$	0,03	0,00	0,12	0,01
Golfsteilheid	$s_{op}$	-0,03	0,00	-0,07	0,00
Waterstand	$h$	0,00	0,00	-	-
Belastingduur	$t_{Belast}$	0,00	0,00	0,00	0,00





## 4 Aanpassen van waarden door nieuwe kennis

### 4.1 Inleiding

Sinds het onderzoek van 't Hart (2012) is nieuwe kennis beschikbaar gekomen. Er zijn nu meer proeven om de modelfactor mee te bepalen. Verder zijn er nieuwe metingen voor de soortelijke massa. Andere parameters zijn ook aangepast op basis van een nieuwe analyse van de gegevens uit de praktijk.

In dit hoofdstuk is met andere invoerparameters gerekend dan 't Hart (2012). Met de aangepaste waarden zijn meerdere variaties doorgerekend met de voorgestelde rekenmethode. De veiligheidscoëfficiënt is vervolgens voor alle cases bepaald.

### 4.2 Invoer

De meeste invoerparameters zijn overgenomen van de voorgaande berekeningen. Als ze hier niet zijn genoemd, zijn de waarden niet veranderd (zie paragraaf 3.2). De aangepaste waarden zijn in Tabel 4.2 gepresenteerd.

#### *Modelfactor*

Omdat er nieuwe proeven zijn uitgevoerd, was het zinvol om de modelfactor opnieuw te bepalen. Ook is er nu voor de lognormale verdeling gekozen, omdat de modelfactor een lage limiet heeft, en de meetresultaten beter worden weergegeven door deze verdeling dan de standaard normale verdeling. Meer informatie kan gevonden worden in paragraaf 2.3 en bijlage C. Het gemiddelde, de standaardafwijking en de ondergrens voor de modelfactor zijn  $\mu_m = 1,38$ ,  $\sigma_m = 0,24$  en  $x_{lim} = 0,87$ . De waarden moeten als volgt omgerekend worden om in een lognormale verdelingsfunctie gebruikt te kunnen worden:

$$\sigma_{LN} = \sqrt{\ln \left( 1 + \left( \frac{\sigma_m}{\mu_m - x_{lim}} \right)^2 \right)} \quad (4.1)$$

$$\mu_{LN} = \ln(\mu - x_{lim}) - \frac{\sigma^2}{2} \quad (4.2)$$

met:

- $\mu_{LN}$  =  $\mu$  van de lognormale verdeling [-]
- $\sigma_{LN}$  =  $\sigma$  van de lognormale verdeling [-]
- $\mu_m$  =  $\mu$  van de modelfactor [-]
- $\sigma_m$  =  $\sigma$  van de modelfactor [-]
- $x_{lim}$  = ondergrens van de modelfactor [-]

#### *Toplaagdikte*

De toplaagdikte van de blokken op hun kant wordt bepaald door de oorspronkelijke breedte van de blokken en is altijd 50 cm. We gaan er echter van uit dat een veiligheidsfactor groter dan 1 zal moeten worden gebruikt op de Steentoetsresultaten. Daarom zal de ontwerpwaarde zonder veiligheid in de orde van 0,40 à 0,50 m moeten liggen. Daarom zijn de hier doorgevoerde berekeningen eerst met de ontwerpwaarde van 45 cm voor de toplaagdikte

uitgevoerd. Voor de probabilistische berekeningen is de waarde van de standaardafwijking op 1,5 cm aangehouden.

#### Spleetbreedte

In het rapport van 't Hart (2012) waren metingen van de spleetbreedte van Projectbureau Zeeweringen beschikbaar voor drie dijkvakken. Daar zijn de gemeten waarden per blok gemiddeld om een representatieve waarde te verkrijgen. 't Hart heeft al deze waarden van de drie locaties gebruikt voor het gemiddelde en de standaardafwijking.

De stabiliteit van een steenzetting is echter meer afhankelijk van de gemiddelde spleetbreedte over een oppervlakte van orde  $1 \text{ m}^2$ , dan van de spleetbreedte van een afzonderlijke spleet of rondom één blok. Daarom zijn de metingen hier nog een keer beschouwd. Om de waarden van de standaardafwijking voor  $1 \text{ m}^2$  te berekenen, is rekening gehouden met het aantal metingen per  $1 \text{ m}^2$ . Bij de Zimmermanpolder en de Biezelingse Ham zijn de blokken  $20 \times 50 \text{ cm}$  groot en bij de Baarlandpolder  $25 \times 50 \text{ cm}$ . Voor de spleten in langsrichting (50 cm lang) zijn altijd twee metingen gedaan. Dat geeft het aantal van 30, resp. 24 metingen per  $\text{m}^2$ . De standaardafwijking per  $\text{m}^2$  is gelijk aan de standaardafwijking van de afzonderlijke spleten gedeeld door de wortel van het aantal metingen per  $\text{m}^2$ . De waarden van de metingen zijn gegeven in Tabel 4.1, samen met de hier bepaalde waarden voor  $1 \text{ m}^2$ .

Tabel 4.1 Waarden voor de spleetbreedte van de drie meetlocaties en gemiddeld voor  $1 \text{ m}^2$

Locatie van de metingen	Gemiddelde van de locatie (mm)	Standaardafwijking per meting (mm)	Aantal metingen per $\text{m}^2$ (-)	Standaardafwijking per $\text{m}^2$ (mm)	Variatiecoëfficiënt per $\text{m}^2$ (-)
Zimmermanpolder	2,93	2,16	30	0,39	0,13
Baarlandpolder	4,26	3,09	24	0,63	0,15
Biezelingse Ham	3,79	2,79	30	0,51	0,13

Van de variatiecoëfficiënt voor  $1 \text{ m}^2$  wordt het gemiddelde van de drie locaties gebruikt voor de probabilistische berekeningen:  $V = \mu/\sigma = 0,14$ . Dat geeft een lagere waarde voor de standaardafwijking dan bij 't Hart (2012), namelijk  $\sigma_s = 0,5 \text{ mm}$ . De waarde voor het gemiddelde over alle metingen is  $\mu_s = 3,66 \text{ mm}$ . Verder wordt door de middeling per  $\text{m}^2$  dezelfde waarde zowel voor de stoot- als voor de langsvoegen van toepassing.

Vanwege het feit dat de spleetbreedte zo bepalend is voor de stabiliteit van de steenzetting, is het noodzakelijk voor de ontwerpberekeningen met Steentoets (en de vereenvoudigde formules) om hiervoor een rekenwaarde (karakteristieke waarde) toe te passen. Omdat een kleine spleetbreedte een kleine stabiliteit geeft, is een lage waarde een logische keus. Er is daarbij eerst gekozen voor een vrij kleine waarde ten opzichte van de metingen, afgerond op hele millimeters, namelijk een ontwerpwaarde van  $s_0 = 2 \text{ mm}$ . Aan de hand van de resultaten is in de volgende paragraaf bekeken of deze keuze de juiste is.

#### Soortelijke massa

Door Projectbureau Zeeweringen zijn metingen uitgevoerd van de soortelijke massa van betonblokken. De metingen geven een gemiddelde  $\mu_{ps} = 2370 \text{ kg/m}^3$  en standaardafwijking  $\sigma_{ps} = 22 \text{ kg/m}^3$ . Deze waarden zijn gebruikt voor de probabilistische berekeningen.

Voor de ontwerpberekeningen met Steentoets is de gebruikelijke waarde die gehanteerd wordt in de ontwerpen van PBZ gekozen, namelijk  $\rho_{s,0} = 2300 \text{ kg/m}^3$ .

*Taludhelling, filterlaagdikte en porositeit filterlaag*

De waarden voor de standaardafwijking voor de taludhelling, de filterlaagdikte en de porositeit van de filterlaag zijn al eerder in het rapport van Kaste en Klein Breteler (2013) bepaald. De waarden van 't Hart (2012) waren wat te groot en dus zijn ze gewijzigd in respectievelijk  $\sigma_{cot\alpha} = 0,15$ ,  $\sigma_{bf} = 0,01$  m en  $\sigma_{nf} = 0,03$ . De waarden van de gemiddelden zijn hetzelfde gehouden. Meer informatie kan gevonden worden in het genoemde rapport.

Als rekenwaarden is hier weer gekozen voor de gemiddelde waarden, net als in de voorgaande onderzoeken.

Tabel 4.2 Aangepaste parameter met de nieuwe waarden

Variabele	Symbol	Eenheid	Gemiddelde $\mu$	Standaardafwijking $\sigma$	V = $\sigma/\mu$
Toplaagdikte	$D$	[m]	0,45	0,015	3,3%
Spleetbreedte (ontwerp $s_0 = 2$ mm)	$s_s$	[mm]	3,66	0,5	14,0%
Soortelijke massa van de blokken (ontwerp $\rho_{s,0} = 2300$ )	$\rho_s$	[kg/m <sup>3</sup> ]	2370,0	22,0	0,9%
Dikte filterlaag	$b_f$	[m]	0,10	0,01	10,0%
Taludhelling	$cot\alpha$	[-]	3,5	0,15	4,3%
Modelfactor (ondergrens = 0.87)	$m$	[-]	1,38	0,24	17,4%
Porositeit filterlaag	$n_f$	[-]	0,35	0,03	8,6%

*Probabilistische berekeningen*

Met de zo aangepaste waarden zijn de berekeningen op dezelfde manier als in hoofdstuk 3 herhaald. In de eerste berekening zijn de parameters uit Tabel 4.2 gebruikt, namelijk de berekening BK1. Vervolgens zijn diverse variaties hierop doorgerekend. Steeds is er een parameter aangepast en is weer een probabilistische berekening uitgevoerd. De aangepaste parameters, namelijk de belastingduur, de golfsteilheid, de filterlaagdikte, de taludhelling en de waterstand, zijn gegeven in Tabel 4.3. Voor elke berekening is één parameter veranderd, namelijk de vermelde parameter in de tabel, en zijn alle andere parameters hetzelfde als BK1. Op deze wijze kan de invloed van de verandering van de betreffende parameter vastgesteld worden.

De variatiecoëfficiënt  $V$  is van alle parameters steeds constant gehouden.

Tabel 4.3 Gevarieerde parameters met waarden voor de berekeningen met de aangepaste waarden

Variatie	Gevarieerde parameter	Symbol	Gemiddelde $\mu$	Standaardafwijking $\sigma$	V = $\sigma/\mu$
BK1	<i>gebruikte waarden uit Tabel 4.2</i>				
BK2	Belastingduur	$t_{Belast}$	5,0	0,715	14,3%
BK3	Golfsteilheid	$s_{op}$	0,02	0,001	5,0%
BK4	Dikte filterlaag	$b_f$	0,05	0,005	10,0%
BK5	Taludhelling	$cot\alpha$	3,0	0,086	2,9%
BK6	Waterstand	$h$	3,5	0,067	1,9%
BK7	Ontwerpwaarde toplaagdikte	$D_0$	0,50	-	-
BK8	Ontwerpwaarde toplaagdikte	$D_0$	0,55	-	-
BK9	Ontwerpwaarde spleetbreedte	$s_0$	2,8	-	-

Ten slotte zijn ook berekeningen uitgevoerd met een andere ontwerpwaarde van de toplaagdikte en de spleetbreedte (BK7 t/m BK9).

Voor deze probabilistische berekeningen zijn er ook berekeningen uitgevoerd met Steentoets en met de vereenvoudigde parameters (zie paragraaf 2.1) om de correctiefactor te bepalen.. Als invoer zijn steeds de gemiddelde waarden gebruikt, behalve bij de spleetbreedte (2 mm, resp. 2,8 mm) en de soortelijke massa (2300 kg/m<sup>3</sup>).

### 4.3 Resultaten

Bij de probabilistische berekeningen is de toplaagdikte elke keer zo gekozen, dat de toelaatbare faalkans  $p_f = 5\%$  bereikt wordt. De resultaten voor de blokdikte zijn gegeven in Tabel 4.4. Verder is de significante golfhoogte, de toplaagdikte van het ontwerp en de berekende veiligheidsfactor gegeven.

Tabel 4.4 Resultaten van de berekeningen met de aangepaste waarden

	<b>Gevarieerde parameter</b>	<b>Waarde</b>	<b><math>H_s</math></b>	<b><math>D_{prob}</math></b>	<b><math>D_o</math></b>	<b><math>\gamma</math></b>
BK1	-	-	2,15	0,39	0,45	0,87
BK2	$t_{Belast}$	5,0	2,31	0,39	0,45	0,87
BK3	$s_{op}$	0,02	1,63	0,39	0,45	0,87
BK4	$b_f$	0,05	2,77	0,40	0,45	0,89
BK5	$cot\alpha$	3,0	2,10	0,39	0,45	0,87
BK6	$h$	3,5	2,15	0,39	0,45	0,87
BK7	$D_o$	0,50	2,57	0,44	0,50	0,88
BK8	$D_o$	0,55	2,85	0,49	0,55	0,89
BK9	$s_o$	2,8	2,74	0,50	0,50	0,99

Uit de berekeningen blijkt dat de toplaagdikte volgens de probabilistische berekeningen in alle gevallen een stuk lager is dan de ontwerpwaarde, gemiddeld is de veiligheidsfactor 0,89. Dit is een veel kleinere waarde dan die door 't Hart (2012) bepaald was (1,30). Dit verschil komt vooral doordat er veel veiligheid voortkomt uit het grote verschil tussen de ontwerpwaarde van de spleetbreedte ( $s_o = 2$  mm), die is gebruikt in de ontwerpberekeningen met Steentoets, en het gemiddelde vanuit de veldmetingen dat in de probabilistische berekeningen is gebruikt. Daarnaast leidt hetzelfde ook bij de soortelijke massa tot wat additionele veiligheid omdat de ontwerpwaarde ook daar kleiner is dan de gemiddelde waarde in de probabilistische berekeningen.

De variaties van de ontwerpwaarde van de toplaagdikte en de spleetbreedte (BK7 t/m BK9) zijn aanvullend gedaan om verder inzicht te krijgen. Voorafgaand was besloten de ontwerpwaarde van de toplaagdikte op 45 cm te zetten, omdat ervan was uitgegaan dat er een veiligheidsfactor van ca. 1,1 zou uitkomen, wat tot een toplaagdikte van 50 cm voor het ontwerp zou leiden. Nadat de berekeningen BK1 t/m BK6 waren gemaakt, was te zien dat dit niet het geval is: de veiligheidsfactor is veel kleiner dan 1. Daarom zijn ook berekeningen met de ontwerpwaarde van de toplaagdikte van 50 cm en 55 cm gedaan, om de invloed van de waarden te analyseren. Uit berekeningen BK7 en BK8 blijkt nu dat de ontwerpwaarde van de toplaagdikte geen grote invloed heeft op de veiligheidsfactor.

Uit de berekening met een grotere ontwerpwaarde van de spleetbreedte (BK9) is te zien, dat die wel een grote invloed heeft op de veiligheidsfactor. De veiligheidsfactor is in dit geval 0,99. Daarom is aanbevolen, de karakteristieke waarde van de spleetbreedte aan te passen op 2,8 mm voor het ontwerp van een steenzetting. Om het gebruik van de karakteristieke waarde van de spleetbreedte te verifiëren zijn verdere berekeningen gedaan in het volgende hoofdstuk.

#### Invloedsparameters

Verder zijn ook de invloedsparameters  $\alpha$  en  $\alpha^2$  van de statistische invoer bepaald, zoals in paragraaf 3.3 is beschreven. Tabel 4.5 geeft de  $\alpha$ -waarden voor de berekeningen weer, gesorteerd naar de grootte van de invloed bij BK1. De geel gemarkeerde cel geeft aan dat tijdens deze berekening deze parameter gevarieerd was. Door de gevarieerde waarde wordt soms de invloed van de parameters anders verdeeld, zoals te zien in de tabel.

Bij de berekening BK4 was de maximale stabiliteit van toepassing (zie bijlage A, formule (A.2)). In zo'n geval rekent Steentoets met een eenvoudige  $H_s(\Delta D)$ - $\xi_{op}$  relatie, waardoor sommige parameters geen invloed meer hebben. Dit effect is ook te zien in de berekende  $\alpha$ -waarden. Doordat  $n_f$ ,  $D_{f15}$ ,  $b_f$ , en  $s_s$  hierdoor een veel kleinere invloed hebben op het resultaat, is de invloed van de modelfactor groter dan bij de andere berekeningen.

Bij BK9 was dit het geval bij een deel van de probabilistische berekeningen, waardoor de invloed van  $n_f$ ,  $D_{f15}$ ,  $b_f$ , en  $s_s$  kleiner is, maar niet zo klein als bij BK4.

Tabel 4.5 Invloedsparameter  $\alpha$  voor de berekeningen met de aangepaste waarden

Variabele	BK1	BK2	BK3	BK4	BK5	BK6	BK7	BK8	BK9
$m$	-0,69	-0,69	-0,67	-0,86	-0,69	-0,69	-0,69	-0,72	-0,90
$n_f$	0,39	0,40	0,38	0,01	0,39	0,40	0,40	0,36	0,20
$D$	-0,35	-0,34	-0,34	-0,34	-0,35	-0,35	-0,32	-0,29	-0,21
$H_s$	0,29	0,24	0,36	0,31	0,29	0,28	0,24	0,24	0,19
$D_{f15}$	0,26	0,26	0,26	0,01	0,26	0,26	0,27	0,24	0,14
$b_f$	0,24	0,24	0,25	0,01	0,24	0,24	0,26	0,24	0,13
$s_s$	-0,17	-0,16	-0,16	-0,01	-0,16	-0,16	-0,22	-0,26	-0,15
$s_{op}$	-0,11	-0,07	-0,08	-0,07	-0,10	-0,10	-0,11	-0,10	-0,07
$\rho_s$	-0,06	-0,06	-0,05	-0,15	-0,05	-0,06	-0,06	-0,08	-0,06
$\cot\alpha$	-0,05	-0,06	-0,05	-0,12	-0,04	-0,05	-0,05	-0,07	-0,06
$t_{Belast}$	0,00	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$h$	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

In Tabel 4.6 zijn de waarden van de invloedsparameter  $\alpha^2$  voor de berekeningen gegeven. Dat is de relatieve invloed van alle parameters. Het valt hier nog duidelijker op dat de meeste parameters weinig tot geen invloed hebben op de resultaten.

Tabel 4.7 geeft de gemiddelde waarden voor  $\alpha$  en  $\alpha^2$  voor de statistische parameters van de berekeningen. Het valt op dat de modelfactor  $m$  de grootste invloed heeft op de resultaten. De porositeit  $n_f$ , de laagdikte van de filterlaag  $b_f$  en de toplaagdikte  $D$  laten een matige invloed zien. Verder is er een kleine invloed van de significante golfhoogte  $H_s$  en de korrelgrootte van het filtermateriaal  $D_{f15}$ . Een heel kleine invloed hebben nog de spleetbreedte  $s_s$  en de golfsteilheid  $s_{op}$ . De overige parameters hebben geen invloed op de faalkansberekeningen.

Tabel 4.6 Invloedsparameter  $\alpha^2$  voor de berekeningen met de aangepaste waarden

Variabele	BK1	BK2	BK3	BK4	BK5	BK6	BK7	BK8	BK9
$m$	0,47	0,47	0,44	0,74	0,48	0,47	0,47	0,52	0,81
$n_f$	0,15	0,16	0,15	0,00	0,15	0,16	0,16	0,13	0,04
$D$	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,10	0,09	0,04
$H_s$	0,08	0,06	0,13	0,10	0,09	0,08	0,06	0,06	0,04
$D_{f15}$	0,07	0,07	0,07	0,00	0,07	0,07	0,07	0,06	0,02
$b_f$	0,06	0,06	0,06	0,00	0,06	0,06	0,07	0,06	0,02
$s_s$	0,03	0,03	0,03	0,00	0,03	0,03	0,05	0,07	0,02
$s_{op}$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
$\rho_s$	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
$cot\alpha$	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$t_{Belast}$	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$h$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Het is goed verklaarbaar dat de modelfactor de grootste invloed op de resultaten heeft. De modelfactor heeft direct invloed op de stabiliteit van de steenzetting. De toplaagdikte, porositeit en dikte en korrelgrootte van de filterlaag hebben daarnaast ook een vrij grote invloed.

Tabel 4.7 Gemiddelde  $\alpha$  en  $\alpha^2$  voor de berekeningen met de aangepaste waarden

Variabele	Symbool	$\alpha$	$\alpha^2$
Modelfactor	$m$	-0,73	0,54
Porositeit filterlaag	$n_f$	0,33	0,12
Toplaagdikte	$D$	-0,32	0,10
Significante golfhoogte	$H_s$	0,27	0,08
Korrel diameter filterlaag	$D_{f15}$	0,22	0,05
Dikte filterlaag	$b_f$	0,20	0,05
Spleetbreedte	$s_s$	-0,16	0,03
Golfsteilheid	$s_{op}$	-0,09	0,01
Soortelijke massa van de blokken	$\rho_s$	-0,07	0,01
Taludhelling	$cot\alpha$	-0,06	0,00
Belastingduur	$t_{Belast}$	0,02	0,00
Waterstand	$h$	0,00	0,00

## 5 Berekeningen met de nieuw vastgelegde karakteristieke waarde van de spleetbreedte

### 5.1 Inleiding

Uit de berekeningen in het vorige hoofdstuk blijkt dat de ontwerpwaarde van de spleetbreedte een grote invloed heeft op de veiligheidsfactor voor blokken op hun kant. Er is gestart met het hanteren van een zeer veilige waarde voor het ontwerp, namelijk 2 mm. Dit bleek echter een onlogisch lage veiligheidsfactor op te leveren.

Voorgesteld wordt om de karakteristieke waarde van de spleetbreedte, waarmee in het ontwerp gerekend moet worden, te bepalen met de resultaten van de beschikbare veldmetingen. Het gemiddelde van de veldmetingen van de spleetbreedte is 3,66 mm, met een standaardafwijking van 0,5 mm (zie ook paragraaf 4.2). Als karakteristieke waarde wordt in dit hoofdstuk de 5%-onderschrijdingswaarde van de verdeling van de gemeten waarden aangehouden, dus  $\mu - 1,64\sigma$ . Dit is  $s_K = 2,8$  mm.

### 5.2 Invoer

Zoals al genoemd zijn de berekeningen in dit hoofdstuk met de karakteristieke waarde van de spleetbreedte van 2,8 mm uitgevoerd. Verder is een ontwerpwaarde van de toplaagdikte van 50 cm aangehouden. De overige parameters hebben dezelfde waarde als in het vorige hoofdstuk (zie paragraaf 4.2).

Tabel 5.1 toont de lijst van de berekeningen met de waarden van de gevarieerde parameters, vergelijkbaar met de berekeningen in het vorige hoofdstuk.

Tabel 5.1 Gevarieerde parameters met waarden voor de berekeningen met de karakteristieke waarde van de spleetbreedte

Variatie	Gevarieerde parameter	Symbool	Gemiddelde $\mu$	Standaardafwijking $\sigma$	$V = \sigma/\mu$
BK9	- (default met karakteristieke waarde voor de spleetbreedte)				
BK10	Belastingduur	$t_{Belast}$	5,0	0,715	14,3%
BK11	Golfsteilheid	$s_{op}$	0,02	0,001	5,0%
BK12	Dikte filterlaag	$b_f$	0,05	0,005	10,0%
BK13	Taludhelling	$cot\alpha$	3,0	0,086	2,9%
BK14	Waterstand	$h$	3,5	0,067	1,9%

### 5.3 Resultaten

De berekeningen zijn uitgevoerd zoals beschreven in paragraaf 2.1. De resultaten zijn gegeven in Tabel 5.2 voor de toplaagdikte  $D_{prob}$ , die tot de toelaatbare faalkans van 5% leidt. Verder zijn ook de ontwerpwaarden van de significante golfhoogte gegeven en de ontwerpwaarde van de toplaagdikte. De veiligheidscoëfficiënt is berekend met het quotiënt  $D_{prob}/D_0$  en is ook gegeven in onderstaande tabel.

Tabel 5.2 Resultaten van de berekeningen met de karakteristieke waarde van de spleetbreedte

	Gevarieerde parameter	Waarde	$H_s$	$D_{prob}$	$D_o$	$\gamma$
BK9	-	-	2,74	0,50	0,50	0,99
BK10	$t_{Belast}$	5,0	2,98	0,49	0,50	0,98
BK11	$S_{op}$	0,02	2,06	0,52	0,50	1,03
BK12	$b_f$	0,05	3,07	0,47	0,50	0,94
BK13	$cot\alpha$	3,0	2,69	0,49	0,50	0,98
BK14	$h$	3,5	2,74	0,49	0,50	0,99

Het valt op dat de veiligheidsfactor in alle gevallen iets lager dan 1 is, behalve bij berekening BK11, waar hij 1,03 is. Het gemiddelde is 0,99. Dit betekent dat met de gekozen karakteristieke waarde van de spleetbreedte (2,8 mm,  $\mu - 1,64\sigma$ ), de ontwerpwaarde van de soortelijke massa (2300 kg/m<sup>3</sup>) en verder de gemiddelde waarde van de overige parameters meestal een veilig ontwerp kan worden verkregen voor een steenzetting met blokken op hun kant.

#### Geadviseerde veiligheidsfactor

De berekende veiligheidsfactoren blijken een lichte spreiding te geven. De vraag is nu welke waarde in de praktijk gebruikt moet worden.

Om die vraag te beantwoorden moeten we terug naar basis van de huidige veiligheidsfilosofie voor waterkeringen. Deze gaat uit van een beoordeling van de waterkering per dijkvak, waarbij elk dijkvak zo sterk moet zijn dat de maatgevende condities (waterstand en golven) veilig kunnen worden gekeerd.

Het werken met de gemiddelde waarde van de berekende veiligheidsfactoren zou betekenen dat slechts in de helft van de dijkvakken voldoende veiligheid gerealiseerd zal worden. Dat is niet de bedoeling, en dus moet de veiligheidsfactor hoger zijn.

De gehanteerde methode om de veiligheidsfactoren te berekenen is in dit onderzoek vrij grof en simpel gehouden. Een veel verfijndere methode wordt straks in het WTI-2017 gehanteerd. Omdat dit echter enorm veel meer werk met zich meebrengt, en nog technische ontwikkelingen vraagt, is nu de vrij grove en simpele methode gehanteerd. Gegeven deze methode is het niet logisch om heel verfijnd de maatgevende veiligheidsfactor te destilleren uit de range van berekende veiligheidsfactoren. Een eenvoudige keuze op basis van de rekenresultaten volstaat.

Daarnaast kan meegewogen worden dat het gebruikelijk is om steenzettingen niet precies de dikte te geven die met Steentoets berekend is, maar iets dikker. Vaak wordt bijvoorbeeld een steenzetting van 35 cm dikte aangelegd als het volgens Steentoets 32 cm moet zijn.

Gezien het bovenstaande wordt gekozen voor simpelweg de grootste van de berekende veiligheidsfactoren, en die wordt naar boven afgerond op een veelvoud van 0,05. Gezien de berekeningen leidt dit tot een geadviseerde veiligheidsfactor van 1,05.

#### Invloedsparementers

Ook voor deze berekeningen zijn weer de invloedsparementers berekend. De  $\alpha$ -waarden zijn gegeven in Tabel 5.3, gesorteerd naar de invloed in BK9. De gekleurde cel geeft weer aan, dat deze parameter in deze berekening gevarieerd was.



Voor de berekeningen in dit hoofdstuk was bij de ontwerpberoeeningen met de vereenvoudigde formules te zien dat bij alle berekeningen, behalve BK11, de maximum waarde van de stabiliteitsparameter wordt aangehouden. In de formule voor de maximum waarde zijn vele invoerparameters niet opgenomen (zie bijlage A, formule (A.2)). Daarom is hier in alle gevallen de invloed van de modelfactor groter dan bij de berekeningen in het vorige hoofdstuk.

Tabel 5.3 Invloedsparameter  $\alpha$  voor de berekeningen met de karakteristieke waarde van de spleetbreedte

Variabele	BK9	BK10	BK11	BK12	BK13	BK14
$m$	-0,90	-0,91	-0,82	-0,96	-0,91	-0,90
$n_f$	0,20	0,18	0,30	0,00	0,18	0,21
$D$	-0,21	-0,20	-0,21	-0,17	-0,20	-0,21
$H_s$	0,19	0,15	0,23	0,17	0,19	0,19
$s_s$	-0,15	-0,13	-0,23	0,00	-0,13	-0,15
$b_f$	0,13	0,11	0,21	0,00	0,12	0,13
$D_{f15}$	0,14	0,12	0,20	0,00	0,12	0,13
$\rho_s$	-0,06	-0,06	-0,05	-0,09	-0,07	-0,06
$t_{Belast}$	0,00	0,16	0,01	0,00	0,00	0,00
$cot\alpha$	-0,06	-0,06	-0,03	-0,08	-0,04	-0,06
$s_{op}$	-0,07	-0,04	-0,05	-0,04	-0,06	-0,06
$h$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabel 5.4 toont de  $\alpha^2$ -waarden van de berekeningen. Deze geven de relatieve invloed van de parameters weer. Het is goed te zien, dat de modelfactor een heel groot deel van de invloed heeft en dus de overige parameters minder invloed tonen.

Tabel 5.4 Invloedsparameter  $\alpha^2$  voor de berekeningen met de karakteristieke waarde van de spleetbreedte

Variabele	BK9	BK10	BK11	BK12	BK13	BK14
$m$	0,81	0,83	0,67	0,93	0,84	0,81
$n_f$	0,04	0,03	0,09	0,00	0,03	0,04
$D$	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04
$H_s$	0,04	0,02	0,05	0,03	0,04	0,04
$s_s$	0,02	0,02	0,05	0,00	0,02	0,02
$b_f$	0,02	0,01	0,04	0,00	0,01	0,02
$D_{f15}$	0,02	0,01	0,04	0,00	0,01	0,02
$\rho_s$	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
$t_{Belast}$	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
$cot\alpha$	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
$s_{op}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$h$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

In Tabel 5.5 zijn de gemiddelde  $\alpha$ - en  $\alpha^2$ -waarden gegeven. Hieraan is goed te zien dat de modelfactor de meeste invloed heeft (81%). Dat ligt vooral daaraan, dat voor de meeste berekeningen de maximum waarde voor de stabiliteitsparameter is aangehouden.

Vergeleken met de berekeningen in het vorige hoofdstuk, is de volgorde van de invloed van de parameters bijna hetzelfde. Maar omdat hier de modelfactor een veel grotere invloed heeft (81% i.p.v. 54%), is de invloed van de overige parameters kleiner en dus minder goed te vergelijken.

Tabel 5.5 Gemiddelde  $\alpha$  en  $\alpha^2$  voor de berekeningen met de aangepaste waarden

Variabele	Symbool	$\alpha$	$\alpha^2$
Modelfactor	$m$	-0,90	0,81
Porositeit filterlaag	$n_f$	0,18	0,04
Toplaagdikte	$D$	-0,20	0,04
Significante golfhoogte	$H_s$	0,19	0,04
Spleetbreedte	$s_s$	-0,13	0,02
Dikte filterlaag	$b_f$	0,12	0,02
Korrel diameter filterlaag	$D_{f15}$	0,12	0,02
Soortelijke massa van de blokken	$\rho_s$	-0,07	0,00
Belastingduur	$t_{Belast}$	0,03	0,00
Taludhelling	$cot\alpha$	-0,05	0,00
Golfsteilheid	$s_{op}$	-0,05	0,00
Waterstand	$h$	0,00	0,00

## 6 Conclusie

Het doel van dit onderzoek was om een veiligheidscoëfficiënt voor Steentoets voor blokken op hun kant te bepalen. De veiligheidscoëfficiënt is bepaald door de benodigde toplaagdikte die resulteert uit probabilistische berekeningen te delen door die volgens deterministische ontwerpberekeningen met Steentoets met ontwerpvoorwaarden. Deze veiligheidscoëfficiënt zal worden gebruikt om een veilig ontwerp te maken en moet daartoe vermenigvuldigd worden met de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets. Voor deze Steentoets berekeningen moet dan wel gebruik gemaakt worden van goed gekozen rekenwaarden.

In het verleden was er een veiligheidscoëfficiënt van 1,2 voor de blokdikte gekozen, die gebaseerd was op ervaring. Een vorig onderzoek, namelijk die van 't Hart (2012), had met een probabilistische berekening een veiligheidscoëfficiënt opgeleverd voor blokken op hun kant van 1,3. Maar toen waren de probabilistische berekeningen met Steentoets nog erg arbeidsintensief en er konden niet veel variaties uitgevoerd worden. Bovendien kon nu de waarde van de modelfactor verbeterd worden en was de belangrijkste parameter voor de stabiliteit, de spleetbreedte, op een andere manier meegenomen in de berekeningen.

In dit onderzoek zijn de probabilistische berekeningen met vereenvoudigde formules, gebaseerd op Steentoets, uitgevoerd. Daardoor was het makkelijker meerdere cases door te rekenen.

In de eerste berekening zijn dezelfde invoerparameters als bij 't Hart (2012) gebruikt. Dat leverde voor de berekende veiligheidscoëfficiënt dezelfde waarde op: 1,3. Dit laat zien dat de hier gebruikte methode goed vergelijkbaar is met die van 't Hart, als uitgegaan wordt van dezelfde invoer.

Bij de daaropvolgende berekeningen zijn sommige parameters aangepast op basis van nieuwe kennis of metingen. Het verschil tussen de invoer van 't Hart en de aangepaste waarden zit vooral in drie parameters: soortelijke massa van de blokken, spleetbreedte en modelfactor:

- Het gemiddelde van de soortelijke massa van de blokken is volgens metingen groter dan de ontwerpwaarde. In de huidige probabilistische berekeningen is gerekend met deze grotere waarde, en in de daarmee vergeleken ontwerpberekening is gewerkt met de ontwerpwaarde. De standaardafwijking is op basis van de metingen kleiner dan wat 't Hart had aangehouden.
- Hetzelfde geldt voor het gemiddelde van de spleetbreedte, waar de gemiddelde waarde vanuit de metingen (3,66 mm) veel groter is, dan de ontwerpwaarde (2 mm), die gewoonlijk wordt gebruikt. Verder is de standaardafwijking van de spleetbreedte over 1 m<sup>2</sup> gemiddeld, omdat dit gemiddelde veel bepalender is voor de stabiliteit dan de waarde van een afzonderlijke spleet, waardoor deze veel lager werd.
- Een ander verschil zit in de modelfactor, die opnieuw bepaald is. Door meer meetwaarden erin te betrekken en de verdeling te bepalen met een lognormale verdeling, zijn betere waarden voor het gemiddelde en de standaardafwijking verkregen. Verder is er ook een ondergrens voor de modelfactor gehanteerd, om onrealistisch kleine waarden te voorkomen.

Als rekenwaarde voor de spleetbreedte was eerst uitgegaan van 2 mm. De gemiddelde veiligheidscoëfficiënt ging daarmee omlaag naar 0,89. Deze waarde is kleiner dan 1 en

daardoor ongewenst, omdat dit in de praktijk verwarrend kan werken. Daarom is in tweede instantie een veiligheidscoëfficiënt bepaald op basis van een karakteristieke spleetbreedte gelijk aan de 5% onderschrijdingsfrequentie:  $\mu - 1,64\sigma$ . Die waarde is in dit geval 2,8 mm.

Met deze karakteristieke waarde zijn vervolgens een aantal cases doorgerekend waarbij voor elke case de veiligheidsfactor is bepaald. De berekeningen resulteerden in veiligheidsfactoren in de range van 0,94 tot 1,03. Er is beargumenteerd dat de uiteindelijk te adviseren veiligheidsfactor gelijk is aan de bovengrens, die hier is afgerond op 1,05.

Op grond van het hier uitgevoerde onderzoek wordt het volgende aanbevolen voor het ontwerpen van steenzettingen met blokken op hun kant:

- Gebruik een rekenwaarde voor de spleetbreedte. Die is gebaseerd op de karakteristieke waarde met 5% onderschrijdingsfrequentie:  $\mu - 1,64\sigma$ , wat is 2.8 mm. Het rekenen met een lagere waarde geeft een veiliger resultaat. Aanbevolen wordt om deze waarde in de praktijk op halve millimeters naar beneden af te ronden. Dus in dit geval wordt een rekenwaarde voor de spleetbreedte van 2,5 mm aanbevolen.
- Gebruik als rekenwaarde voor de soortelijke massa van de blokken de gebruikelijke ontwerpwaarde, namelijk  $2300 \text{ kg/m}^3$ .
- Gebruik als rekenwaarde van alle overige parameters de gebruikelijke ontwerpwaarde, die de gemiddelde waarde is (verwachtingswaarde).
- Bereken de stabiliteit met Steentoets met de aanbevolen veiligheidsfactor 1,05. Dit kan eenvoudig gerealiseerd worden door in het werkblad 'Algemeen' de veiligheidscoëfficiënt voor de toplaagstabiliteit op 1,05 te zetten.

Deze conclusie gaat uit van normale betonblokken zoals ze in Zeeland worden toegepast. Als er nieuwe betonblokken worden gebruikt, die geproduceerd zijn met een nauwkeurig productieproces, is het denkbaar dat de spleetbreedte kleiner is (zowel het gemiddelde als de standaardafwijking). Het kan dan nodig zijn om met een aangepaste rekenwaarde voor de spleetbreedte te rekenen, omdat  $\mu - 1,64\sigma$  dan een kleinere waarde zal hebben.

De stabiliteitsberekeningen worden in de praktijk doorgaans gebruikt om te bepalen tot welk niveau op de dijk de blokken op hun kant toegepast kunnen worden. Daarbij geldt dat de veiligheid ook in rekening gebracht kan worden door de golfhoogte met 1,05 te vermenigvuldigen.

## 7 Literatuur

Diermanse, F., Hoonhout, B., den Heijer, K. en van Dongeren, A. (2011):  
Probabilistische analyses en belastingmodellen ten behoeve van de toetsing van  
duinwaterkeringen.  
Deltares, rapport 1204206-004, concept rapport, december 2011.

't Hart, R. (2012):  
Veiligheid Steentoets2010 - Aanbeveling betreffende veiligheidscoëfficiënten voor het  
ontwerp.  
Deltares, rapport 1202551-006, januari 2012.

Kaste, D.L. en Klein Breteler, M. (2013):  
Veiligheidsfactor voor ontwerpen met Steentoets2010 voor betonzuilen.  
Deltares, rapport 1206424-010, november 2013.

Klein Breteler, M. (2009):  
Kennisleemtes Steenbekledingen - Validatie Steentoets2008.  
Deltares, rapport H4846, februari 2009.

Klein Breteler, M. en Mourik, G.C. (2014a):  
Validatie van Steentoets2014 – Rekenmodel voor het beoordelen van de stabiliteit van  
steenzettingen.  
Deltares, rapport 1208045-009, februari 2014.

Klein Breteler, M. en Mourik, G.C. (2014b):  
Vereenvoudiging van Steentoets tot enkele eenvoudige formules.  
Deltares, rapport 1208045-015, februari 2014.

OET (2013):  
OpenEarth Tools - Probabilistic Toolbox.  
openearth.eu, augustus 2013.

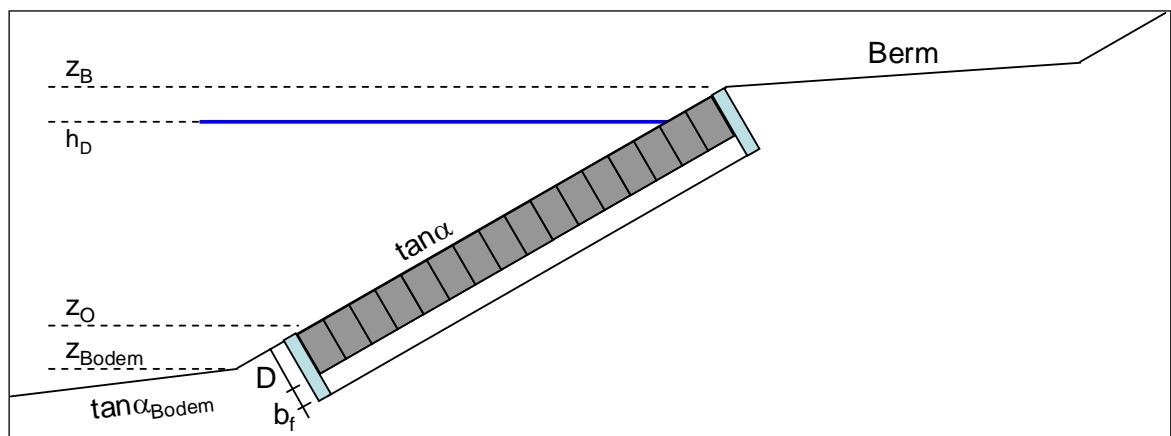


## A Details van de berekeningen

In deze bijlage worden de berekeningen in het detail gepresenteerd. Daarbij wordt ten eerste een overzicht over de input parameters gegeven. Vervolgens worden de vereenvoudigde formules voor de berekening van de stabiliteit gegeven en de probabilistische berekeningen uitgelegd.

### A.1 Input parameters

Hier worden kort alle benodigde input parameters voorgesteld. Een figuur van de geometrie van de steenzetting is getoond in Figuur A.1. Een lijst met alle benodigde input parameters is gegeven in Tabel A.1 met het symbool, de eenheid en een korte toelichting.



Figuur A.1 Geometrie van de steenzetting met de benodigde input parameters

### A.2 Stabiliteit van de steenzetting uit blokken op hun kant

Om de stabiliteit van de steenzetting te berekenen worden de vereenvoudigde formules van Klein Breteler en Mourik (2014b) gebruikt. Met de vereenvoudigde formules kan de stabiliteit met minder moeite en in een kortere tijd berekend worden, dan met de software Steentoets, die gewoonlijk gebruikt wordt. De nauwkeurigheid van de vereenvoudigde formules is iets minder, wat door een correctiefactor wordt gecompenseerd.

De berekeningen voor de stabiliteit van de steenzetting bestaat uit twee stappen:

1. berekening van de leklengte
2. stabiliteit van de steenzetting berekend met de vereenvoudigde formules

In de eerste stap wordt de leklengte berekend. Dit is uitgelegd bijvoorbeeld in Klein Breteler en Mourik (2014a). De leklengte is afhankelijk van de doorlatendheid van de toplaag en het onderliggende filtermateriaal.

Tabel A.1 Lijst van alle benodigde input parameters

<b>Algemene parameters</b>		
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	versnelling zwaartekracht
<b>Parameters voor de hydraulische belasting</b>		
$t_{Belast}$	[h]	belastingduur
$h$	[m+NAP]	waterstand
$H_s$	[m]	significante golfhoogte
$S_{op}$	[-]	golfsteilheid
$\rho_W$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Soortelijke massa van het water
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	kinematische viscositeit van het water
<b>Parameters voor de steenzetting</b>		
$S_s$	[m]	spleetbreedte van de stootvoegen
$S_l$	[m]	spleetbreedte van de langsvvoegen
$B$	[m]	breedte van de blokken
$L$	[m]	lengte van de blokken
$D$	[m]	dikte van de toplaag
$\rho_S$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Soortelijke massa van de blokken
$n_f$	[-]	porositeit van het filter materiaal
$D_{f15}$	[m]	korrelgrootte filtermateriaal
$b_f$	[m]	dikte van de filterlaag
$n_i$	[-]	porositeit van het inwassing materiaal
$D_{i15}$	[m]	korrelgrootte van het inwassing materiaal
$\cot\alpha$	[-]	cotangens van de helling
$Z_{Berm}$	[m+NAP]	hoogte van de berm
$Z_B$	[m+NAP]	hoogte van de bovengrens van de steenzetting
$Z_O$	[m+NAP]	hoogte van de ondergrens van de steenzetting
$\tan\alpha_{Bodem}$	[-]	Helling van het voorland
$Z_{Bodem}$	[m]	hoogte van de dijkteen
<b>Modelfactor voor de berekeningen</b>		
$m$	[-]	modelfactor voor de stabiliteit van de steenzetting

## Stap 2: stabiliteit van de steenzetting berekend met de vereenvoudigde formules

In de tweede stap wordt de stabiliteitsparameter van de steenzetting  $H_s/(\Delta D)$ , waarbij de steenzetting gaat bezwijken, met de vereenvoudigde formules berekend. Omdat de waterstand in het huidige onderzoek niet varieert, kan de hier voorgestelde manier gebruikt worden. In andere gevallen wordt verwezen naar Klein Breteler en Mourik (2014a). Alle formules zijn hier gepresenteerd om de berekeningen uit te leggen, maar zijn ontwikkeld in Klein Breteler en Mourik (2014b). De formules zijn alleen toepasbaar voor blokken op hun kant.

Ten eerste wordt de maximale waarde van de stabiliteit berekend. Daarvoor wordt de invloed van de belastingduur berekend:

$$f_{sfront} = \max \left( 1 - c_1 \cdot \log \left( \frac{N}{1000} \right); c_2 \right) \quad (A.1)$$



met:

$c_1 = 0,35$ ;  $c_2 = 0,80$  (voor blokken op hun kant)

$N$  = aantal golven

$$N = \frac{t_{Belast} \cdot 3600}{T_p / 1,1}$$

$t_{Belast}$  = belastingduur [h]

$$T_p = \sqrt{\frac{H_s}{1,56 \cdot s_{op}}} \text{ [s]}$$

Daarmee kan de maximale waarde van de stabiliteit  $[H_s/(\Delta D)]_{max}$  berekend worden:

$$\left[ \frac{H_s}{\Delta D} \right]_{max} = \frac{\left( 7 \left( \min(\xi_{op}; 2) \right)^{-1/3} + \max\left(0,5 \left( \min(\xi_{op}; 5) - 2 \right); 0 \right) \right)}{\max\left((\cos \beta)^{2/3}; 0,4\right)} \cdot f_{sfront} \quad (\text{A.2})$$

met:

$$\xi_{op} = \text{brekerparameter [-]} \quad \xi_{op} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_{op}}}$$

$\beta$  = golfinvalshoek [°]

Om de stabiliteit van de steenzetting met de vereenvoudigde formules te berekenen, moeten meerdere factoren berekend worden. Daarmee wordt de invloed van de desbetreffende parameters bepaald. De hier presenteerde formules zijn alleen toepasbaar voor blokken op hun kant.

- relatieve soortelijke massa van de blokken  $\Delta$ :

$$p_{\Delta} = \min\left(0,53 \cdot \Delta^{-1,13} + 0,6; 1,02\right) \quad (\text{A.3})$$

met:

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$$

$\rho_s$  = soortelijke massa van de blokken [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_w$  = soortelijke massa van het water [kg/m<sup>3</sup>]

- aantal golven  $N$ :

$$p_N = \max\left(9,5 \cdot (N + 150)^{-0,28}; 0,94\right) \quad (\text{A.4})$$

- taludhelling  $\tan \alpha$ :

$$p_{\tan \alpha} = 0,79 \cdot \tan \alpha^{-0,19} \quad (\text{A.5})$$

- golfinvalshoek  $\beta$ :

$$p_{\beta} = 1,1 \cdot 10^{-28} \cdot (\beta + 130)^{12} + 1 \quad (\text{A.6})$$

- lek lengte  $\Lambda$ :

$$p_{\Lambda} = \min \left[ 0,19 \cdot \left( \frac{\Lambda}{D} \right)^{-2,9} + 0,8; 0,61 \cdot \max \left( \frac{\Lambda}{D} - 1,5; 1 \cdot 10^{-10} \right)^{-0,19} \right] \quad (\text{A.7})$$

- bovengrens van de steenzetting  $z_B$ :

$$p_{z_B} = \max \left[ \begin{array}{l} 1; 11 \cdot b \cdot \left( \min \left\{ \frac{z_B - h_{MWS}}{H_s}; 0,2 - 10 \cdot b^2 \right\} - 0,2 + 10 \cdot b^2 \right)^4 + 1 \\ + \min(0; 0,4 - 0,017 \cdot s_{op}^{-0,97}) \end{array} \right] \quad (\text{A.8})$$

met:

$b$  = filterlaagdikte [m]

- golfsteilheid  $s_{op}$ :

$$p_{s_{op}} = \max \left[ 0,072 \cdot (s_{op} + 0,01)^{-0,6}; 3,32 \cdot (s_{op} + 0,01)^{0,4} \right] \quad (\text{A.9})$$

- spleetbreedte  $s$ :

$$p_s = \frac{1}{0,021 \cdot s^{1,5} + 0,94} \quad (\text{A.10})$$

Met deze parameters kan de stabiliteit van de steenzetting  $H_s/(\Delta D)$  berekend worden. Daarbij wordt de correctiefactor  $f_c$  gebruikt, die de onnauwkeurigheid van de vereenvoudigde formules compenseert (zie paragraaf 2.1).

$$\left[ \frac{H_s}{\Delta D} \right] = \min \left[ 3,57 \cdot p_{\Delta} \cdot p_N \cdot p_{\tan \alpha} \cdot p_{\beta} \cdot p_{\Lambda} \cdot p_{z_B} \cdot p_{s_{op}} \cdot p_s; \left[ \frac{H_s}{\Delta D} \right]_{\max} \right] \cdot f_c \quad (\text{A.11})$$

Met de waarde voor de stabiliteit kan de golfhoogte berekend worden, waarbij de steenzetting net nog stabiel is:

$$H_{s,stab} = \left[ \frac{H_s}{\Delta D} \right] \cdot \Delta \cdot D \quad (\text{A.12})$$

### A.3 Probabilistische berekeningen

Er zijn meerdere methoden om probabilistische berekeningen door te voeren. In Diermanse et al (2012) zijn de meest bekende methodes uitgelegd en vergeleken. Deze zijn: Crude Monte Carlo methode, FORM (First Order Reliability Method), Directional Sampling en Monte Carlo met Importance Sampling. Het wordt gezegd, dat FORM de meest efficiënte methode is, maar als er discontinuïteiten in de berekeningen voorkomen, kan het niet naar de ontwerppunt convergeren. In de berekeningen voor de stabiliteit van de steenzetting zijn wel discontinuïteiten aanwezig, weshalve de FORM methode hier niet gebruikt kan worden.

Er is hier gekozen voor de Crude Monte Carlo methode, omdat het de meest recht-toe-rechtaan methode is. Voor sommige gevallen, waar een heel kleine faalkans verwacht wordt, moet een heel groot aantal realisaties gedaan worden om een nauwkeurig resultaat te krijgen. Daarom is het niet echt efficiënt. In het huidige geval moet voor de faalkans van  $p_f = 5\%$  een acceptabel aantal realisaties gedaan worden, waardoor de Monte Carlo methode voldoet.

Voor de Crude Monte Carlo methode worden voor een bepaald aantal realisaties willekeurige samples getrokken vanuit de verdeling van de parameters. Met de samples wordt de limit state function (LSF) berekend:

$$Z = R - S \quad (\text{A.13})$$

met:

$R$  = weerstand (Resistance)  
 $S$  = belasting (Solicitation)

De LSF geeft de verhouding van de weerstand en de belasting van een realisatie aan. Als de belasting groter is dan de weerstand ( $Z < 0$ ), treedt falen op. Door  $Z = 0$  wordt de grens tussen falen en niet-falen beschreven.

Meestal worden de weerstand en de belasting niet door één getal, maar door meerdere berekeningen bepaald. In het huidige onderzoek wordt de weerstand door de golfhoogte  $H_{s,stab}$  bepaald, die de acceptabele golfhoogte vanuit de stabiliteit van de steenzetting is. Deze wordt met de modelfactor vermenigvuldigd, om het verschil tussen de berekeningen en de werkelijkheid (resultaat Deltagootproeven) te compenseren. De belasting is de optredende golfhoogte  $H_s$  van de realisatie. De hier gebruikte LSF is daarom:

$$Z_{BR} = H_{s,stab} \cdot m - H_s \quad (\text{A.14})$$

met:

$H_{s,stab}$  = berekende acceptabele golfhoogte [m]  
 $H_s$  = optredende golfhoogte [m]  
 $m$  = modelfactor voor het verschil tussen de berekeningen en de werkelijkheid [-]

Het aantal malen dat  $Z < 0$  optreedt in alle realisaties worden geteld, wat het aantal malen falen geeft:  $N_{fail}$ . De faalkans wordt dan berekend, door de verhouding tussen het aantal malen falen en het aantal realisaties te berekenen:

$$P_f = \frac{N_{fail}}{N_{calc}} \quad (A.15)$$

met:

$p_f$  = faalkans [-]

$N_{fail}$  = aantal falen [-]

$N_{calc}$  = aantal realisaties [-]

Er is een groot aantal realisaties nodig, om een betrouwbaar resultaat te krijgen, vooral als een klein faalkans verwacht wordt. Voor de huidige berekeningen zijn 800.000 realisaties gedaan en daarom de resultaten zijn heel nauwkeurig.

De probabilistische berekeningen zijn uitgevoerd met het programma "Matlab" en de probabilistic toolbox van de OpenEarth Tools (OET, 2012, beschreven in Diermanse et al., 2011). De probabilistic toolbox levert de software voor de Monte Carlo methode en de benodigde verdelingen.

## B Waarden van de correctiefactor

Zoals in paragraaf 2.1 vermeld, wordt een correctiefactor aan de probabilistische berekeningen toegevoegd om het verschil tussen de vereenvoudigde formules en Steentoets te corrigeren. De gebruikte waarden zijn in onderstaande tabel gegeven.

		$H_s/(\Delta D)$ vereenvoudigde formules (F)	$H_s/(\Delta D)$ Steentoets (ST)	Correctie factor ST/F
Narekenen 't Hart (hoofdstuk 3)	BK0	4,972	4,318	0,87
Aangepaste waarden (hoofdstuk 4)	BK1	4,104	3,847	0,94
	BK2	4,254	4,125	0,97
	BK3	3,345	2,919	0,87
	BK4	4,972	4,943	0,99
	BK5	3,985	3,750	0,94
	BK6	4,104	3,847	0,94
	BK7	4,377	4,125	0,94
	BK8	4,675	4,166	0,89
	BK9	4,972	4,405	0,89
Berekeningen met karakteristieke waarde voor de spleetbreedte (hoofdstuk 5)	BK10	5,221	4,797	0,92
	BK11	4,430	3,308	0,75
	BK12	4,972	4,943	0,99
	BK13	4,723	4,318	0,91
	BK14	4,972	4,405	0,89
Gemiddeld				0,92



## C Modelfactor voor blokken op hun kant

Deze bijlage geeft een afschrift uit de memo “Model factor for Steentoets” van D. Kaste, april 2013.

### C.1 General explanations

#### C.1.1 Model factor for Steentoets

In order to quantify the model factor for block revetments, the results from physical model tests are compared to the results from Steentoets calculations. This was first done by 't Hart (2012) and later refined by Kaste & Klein Breteler (2012) by including more recent data of physical model tests. During the work for the project WTI2017 the model factor was regarded more closely and is now quantified for several different types of block revetment:

- 1 Basalt
- 2 Hydroblocks
- 3 other concrete columns
- 4 blocks placed flat
- 5 blocks placed flat with spacers and infilling material
- 6 blocks placed on their side
- 7 blocks placed on their side with spacers and infilling material
- 8 Koperslabblokken

The model factor for block revetments  $m$  describes the ratio between results from physical model tests and Steentoets calculations. It is defined with the following equation:

$$m = \frac{\left( H_{s,crit} / \Delta D \right)_{\text{physical model tests}}}{\left( H_{s,crit} / \Delta D \right)_{\text{Steentoets}}} \quad (\text{C.1})$$

The term  $\frac{H_s}{\Delta D}$  characterizes the strength of a block revetment. It includes the wave height  $H_s$

at which the block revetment is just stable. The relative density of the stones  $\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$

and the thickness of the blocks  $D$  are used to obtain a dimensionless factor that gives the ratio of the maximum acceptable load (wave height) and the strength of the revetment (weight per m<sup>2</sup>).

The results from the physical model tests were derived from those tests, where the revetment failed. This matches the calculated maximum wave height at the transition from stable to unstable in Steentoets. The data from those tests were used as input for the Steentoets calculations in the report about the validation of Steentoets (Klein Breteler & Mourik, 2012).

### C.1.2 Chosen probability distribution for the model factor

In the earlier work of Kaste & Klein Breteler (2012) a truncated normal distribution was applied for the model factor. Within the course of the project WTI2017 it was chosen to change it to the lognormal distribution with a lower limit. Both distributions include the lower limit, which was found to be needed to avoid unrealistic values (see section C.1.3).

### C.1.3 Lower limit of the probability distribution

In the probabilistic calculations with the Monte Carlo method with importance sampling or for FORM, it is aimed to find cases of failure of the block revetment, which occur at low values of the model factor. To avoid unrealistically low values of the model factor, a lower limit had to be defined.

For the quantification of the lower limit of the model factor the stability was calculated for a revetment in a very poor condition. In order to analyse these worst cases for the different types of block revetment, several calculations have been performed to have a good estimate of this effect.

The worst case is different for each type of block revetment. For columns it is assumed that the worst condition occurs, when the infilling material is gone and the columns have no clamping. For blocks, the worst condition is assumed to occur with a relatively small joint width, which leads to less permeability and thus higher uplift pressures against the blocks arise.

## C.2 Model factors for different types of block revetment

According to the explanations in chapter C.1 the model factors were derived for different types of block revetment. In the following sections each type of block revetment is described as well as the derivation of the model factor and the values of its distribution.

For all regarded types of block revetment a table is given with the values used for the determination of the model factor. The values were gathered from the report about the validation of Steentoets2010 (Klein Breteler & Mourik, 2012). The ratio of the results from the physical model tests and the Steentoets calculations is given in the last column. The ratio describes the uncertainty of the Steentoets calculations and thus the model factor. Additionally the average and the standard deviation of the ratio are given.

In order to quantify the lognormal distribution for the model factor, the mean value and standard deviation of the ratio were adapted slightly. This was done to gain a good fit between the cumulative distribution function of the lognormal distribution and the determined values for the ratio between the results from the physical model tests and the Steentoets calculations. The focus was thereby on the left tail of the cumulative distribution function. This can be seen in the according figure of the sections.



## C.2.1 Blocks placed on their side

When the blocks of a revetment are reused, they are mostly placed upright on their side to enhance the strength of the revetment. Apart from that, they have similar characteristics as flat placed blocks. They are built without infilling material, clamping or interaction between the blocks.

Several physical model tests were done with blocks placed on their side. The results of the tests as well as the results of the Steentoets calculations are given in Table C.1.

Table C.1 Values for the determination of the model factor for blocks placed on their side

Type	Figure in Validation report	Results Steentoets $H_s/\Delta D$	Result physical model test $H_s/\Delta D$	Ratio physical model / Steentoets
blocks placed on their side	B.11	4.05	5.33	1.32
		3.50	4.84	1.38
		3.10	4.72	1.52
		3.05	3.19	1.05
	B.13	3.55	6.21	1.75
		3.75	6.04	1.61
	B.14	2.95	3.15	1.07
		1.78	3.16	1.78
		1.82	2.50	1.37
		1.80	2.01	1.12
		1.78	2.58	1.45
		1.60	2.01	1.26
	<b>Average</b>			
<b>Standard Deviation</b>				<b>0.25</b>

Table C.2 presents the parameters of the lognormal distribution for the model factor for blocks placed on their side. Figure C.1 presents the cumulative distribution function and the values of the ratio from the table above.

Table C.2 Parameters of the lognormal distribution of the model factor for blocks placed on their side

<b>Mean value</b>	1.38
<b>Standard deviation</b>	0.24
<b>Lower limit</b>	0.87

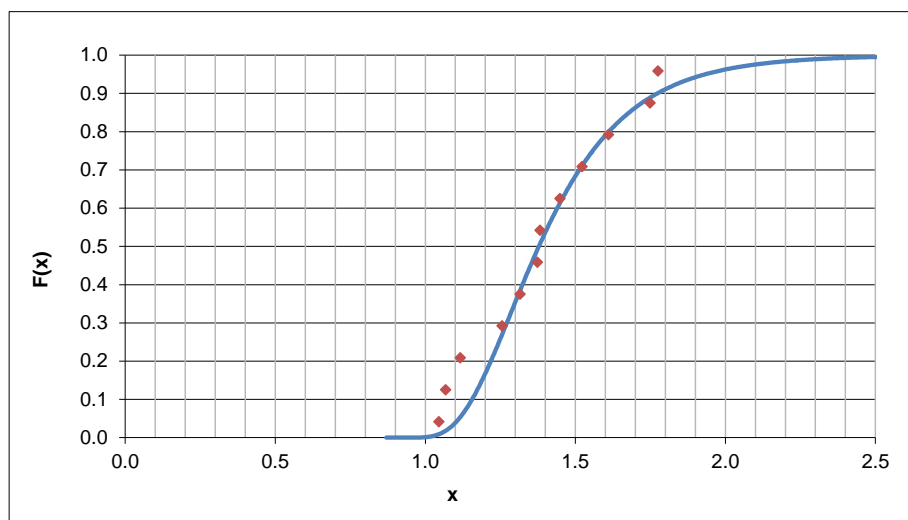


Figure C.1 Cumulative distribution function of the model factor with the determined values of the tests for blocks placed on their side ( $x$  = model factor)

### C.3 References

't Hart, R. (2012):

Veiligheid Steentoets 2010 - Aanbeveling betreffende veiligheidscoëfficiënten voor het ontwerp.

Deltares, Report 1202551-006.

Kaste, D.L. and Klein Breteler, M. (2012):

Veiligheidsfactor voor ontwerpen met Steentoets2010.

Deltares, Report 1206424-010, November 2012.

Klein Breteler, M. and Mourik, G.C. (2012):

Validatie van Steentoets2010 – Stabiliteit van Steenzettingen.

Deltares, Report 1204727-009, preliminary version, May 2012.