

Veiligheid Steentoets2010

**Aanbeveling betreffende veiligheidscoëfficiënten
voor het ontwerp**



Veiligheid Steentoets2010

Aanbeveling betreffende veiligheidscoëfficiënten voor het ontwerp

ir. R. 't Hart

1202551-006

Titel

Veiligheid Steentoets2010

Opdrachtgever

RWS-WD

Project

1202551-006

Kenmerk

1202551-006-HYE-0030

Pagina's

38

Trefwoorden

Ontwerp, steenzetting, Steentoets, veiligheid

Samenvatting

Uitgaande van een dijkvakbenadering is een probabilistische analyse voor het mechanisme toplaagstabiliteit uitgevoerd. Er is een faalfunctie gekozen en er zijn op grond van de beschrijvingen in het Technisch Rapport Steenzettingen (TR) en de huidige ontwerppraktijk verwachtingswaarden en spreidingen voor de invoerparameters van het rekenmodel Steentoets2010 verzameld.

Voor de veiligheid die impliciet in Steentoets2010 als gevolg van de afregeling op de resultaten van Deltagootproeven is opgenomen, is uitgegaan van waarden gevonden bij de validatie.

De onzekerheden vertalen zich voor (geklemd) zuilenzettingen in vrijwel dezelfde waarde voor de veiligheid als voor (niet-geklemd) blokkenzettingen. De voorbeeldberekeningen voor een standaard zuilenzetting en voor de zetting van gekantelde blokken leverde een bezwijkkans van ca. 19%.

Om het ontwerp van zuilenzettingen en blokkenbekledingen voldoende betrouwbaarheid te geven, wordt geadviseerd een overall-veiligheids-coëfficiënt toe te passen van 1,3 in combinatie met het rekenen met gemiddelde waarden voor alle parameters.

Vanwege de grotere variatie in dikte van de toplaagelementen, moet voor een zetting van ongeklemd natuursteen elementen overwogen worden om een extra materiaalfactor voor de toplaagdikte toe te voegen.




Aanpassen van het Technisch Rapport Steenzettingen aan de nieuwe rekenmethodiek is wenselijk, omdat toepassing van Steentoets2010 met de aanbevelingen uit het TR tot een onduidelijke mate van veiligheid van het ontwerp zal leiden.

Het onderhavige onderzoek is uitgevoerd in het kader van het meerjarige project 'Adviesing 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.

Referenties

Contract 31037864, 26 april 2010, kenmerk: RWS/WD-2010/1348 (Contactpersoon RWS: ir. A. Bizzarri).

Contract 31054958 / 4500180616 van 7-06-2011 (Contactpersoon RWS: dhr. K. Saathof).

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
01	feb. 2010	ir. R. 't Hart		ir. M. Klein Breteler		A.T. Aantjes	
02	juni 2010	ir. R. 't Hart		ir. M. Klein Breteler		A.T. Aantjes	
03	aug. 2010	ir. R. 't Hart		ir. M. Klein Breteler		A.T. Aantjes	
04	feb. 2011	ir. R. 't Hart		ir. M. Klein Breteler		A.T. Aantjes	
05	mei 2011	ir. R. 't Hart		ir. M. Klein Breteler		A.T. Aantjes	
06	jan. 2012	ir. R. 't Hart		ir. M. Klein Breteler		L. Voogt	

Status

definitief

Inhoud

Lijst van Tabellen	iv
Lijst van Symbolen	v
1 Inleiding	7
1.1 Normstelling	7
1.2 Aanpak	8
2 Probabilistisch model	9
2.1 Model en modelonzekerheid	9
2.2 Constructieparameters	11
2.3 Hydraulische belastingparameters	17
3 Berekeningen en analyse niveau II	19
3.1 Niveau II klasse 1	19
3.2 Niveau II klasse 2	21
4 Veiligheidscoëfficiënten	25
5 Conclusies en aanbevelingen	29
Literatuur	31
Bijlage(n)	
A Toelichting bij tabellen betreffende niveau II berekeningen	A-1
B Resultaten berekeningen niveau II klasse 1	B-1
C Resultaten berekeningen niveau II klasse 2	C-1
D Afleiding waarden voor de modelfactoren uit metingen	D-1

Lijst van Tabellen

Tabel 2.1	Indeling van berekeningstypen op grond van wijze van omgaan met veiligheid	10
Tabel 2.2	Aanbevolen rekenwaarden volgens TR Steenzettingen	12
Tabel 2.3	Standaardwaarden open ruimte tussen toplaagelementen volgens TR Steenzettingen	12
Tabel 2.4	Standaardwaarden dichtheid toplaagelementen volgens TR Steenzettingen	12
Tabel 2.5	Gehanteerde waarden voor de parameters van de twee cases, verwachtingswaarden (en spreidingen)	13
Tabel 2.6	Spleetbreedtes gemeten aan zetting van gekantelde betonblokken op een drietal locaties in Zeeland	15
Tabel 2.7	Vergelijking werkelijke dichtheid zuilen met de dichtheid volgens het ontwerp[11]	16
Tabel 3.1	Resultaten voor zuilenzetting, waarden van α_j voor de Mean Value Approach (MVA) en de Design Point Method (DPM).	22
Tabel 3.2	Resultaten voor zetting van gekantelde blokken, waarden van α_j voor de Mean Value-benadering (MVB) en de Design Point Method (DPM).	22
Tabel 3.3	Combinaties van betrouwbaarheid β en kans die in deze rapportage een rol spelen.	24
Tabel 4.1	Partiële factoren voor zuilenzetting (* γ uitgaande van het ontwerppunt behorende bij de impliciet al in Steentoets aanwezige veiligheid: $m_0 = 1,22$ en een extra marge van 1,248)	26
Tabel 4.2	Partiële factoren voor blokkenzetting (* γ uitgaande van het ontwerppunt behorende bij de impliciet al in Steentoets aanwezige veiligheid: $m_0 = 1,35$ en een extra marge van 1,3)	27

Lijst van Symbolen

Symbol	Betekenis	Eenheid
a_i	lineaire weerstandsterm (Forchheimer-coëfficiënt)	[s/m]
b_i	kwadratische weerstandsterm (Forchheimer-coëfficiënt)	[s ² /m ²]
b	filterlaagdikte	[m]
D	toplaagdikte	[m]
D_{15}	15%-overschrijdingswaarde van de steendiameter van het inwasmateriaal	[mm]
$D_{\gamma 15}$	15%- overschrijdingswaarde van de steendiameter van het filtermateriaal	[mm]
g	versnelling zwaartekracht	[m/s ²]
i	geheel aantal, teller	[-]
j	aanduiding voor parameter j : geheel aantal, teller	[-]
$H_{s,RVW}$	de golfhoogte volgens de berekende randvoorwaarde, gegeven de normfrequentie	[m]
$H_{s,toelaatbaar}$	de toelaatbare golfhoogte berekend met Steentoets2010	[m]
k_j	vermenigvuldigingsfactor maal de spreiding voor het berekenen van de karakteristieke of representatieve waarde voor parameter j	[-]
m	modelfactor	[-]
m_o	factor tussen de door Steentoets2010 berekende en werkelijke bezwijkgolfhoogte als gevolg van het afregelen op Deltagootproefresultaten	[-]
N	aantal golven (= maat voor de belastingsduur)	[-]
n	taludhelling	[-]
n_i	porositeit inwassing	[-]
n_f	porositeit van het filtermateriaal	[-]
R	sterkte (uitgedrukt in golfhoogte)	[m]
R_j	sterkteparameter j	[divers]
R_j^*	waarde van de sterkteparameter j in het ontwerppunt	[divers]
s	spleetbreedte van blokkenzetting	[mm]
s_{0p}	golfsteilheid op basis van H_s en de diepwatergolflengte behorende bij T_p	[-]
S	belasting (= golfhoogte)	[m]
S_j	belastingsparameter j	[divers]
S_j^*	waarde van de belastingsparameter j in het ontwerppunt	[divers]
T_p	golfperiode behorende bij de piek van het frequentiespectrum	[s]
V	variatiecoëfficiënt ($=\sigma / \mu$)	[-]
$V(R_j)$	variatiecoëfficiënt (in sterkteparameter j)	[-]
Z	faalfunctie	[m]
α_j	importance factor, maat voor de bijdrage van variabele j aan de onzekerheid in Z	[-]
β	betrouwbaarheidsfactor	[-]
δ	(kleine) fractie van de parameter die achter de δ genoemd staat	[-]
Δ	relatieve dichtheid van de toplaag ten opzichte van de dichtheid van water	[-]
γ_m	materiaalfactor	[-]
γ_s	belastingsfactor	[-]

Symbol	Betekenis	Eenheid
Γ_j	relatieve bijdrage van parameter j aan de spreiding in de faalfunctie	[-]
μ_j	verwachtingswaarde van parameter j	[divers]
ν	kinematische viscositeit	[m ² /s]
σ_j	spreiding in parameter j	[divers]
σ_Z	spreiding in de waarde van de faalfunctie Z	[m]
ρ	dichtheid van water	[kg/m ³]
ρ_j	dichtheid van de toplaag	[kg/m ³]
Ω	open oppervlak van de steenzetting (relatief)	[%]

1 Inleiding

Steentoets2008 is het programma dat is ontwikkeld om de stabiliteit van steenzettingen te berekenen. Enerzijds is het programma geschikt om toetsingen zoals bedoeld in het VTV2006 [1] uit te voeren, anderzijds kan het worden gebruikt om steenzettingen te ontwerpen. Bij de toetsing gaat het in principe om bekledingen die primaire waterkeringen categorie a en b beschermen tegen erosie. In feite wordt voor de toetsing momenteel een deterministische berekening uitgevoerd. De veiligheid is impliciet in het rekenmodel opgenomen door de wijze van afregelen van het rekenmodel.

Doel van dit onderzoek is voor het ontwerp te komen tot een semi-probabilistische berekening (Niveau 1) waarbij er dus wordt gewerkt met representatieve waarden van de parameters en met partiële veiligheidsfactoren. In dit rapport wordt geadviseerd over de te hanteren veiligheidscoëfficiënten. Deze zijn afgeleid uit de normstelling ten aanzien van de primaire waterkeringen categorie a en b.

Steenzettingen worden met Steentoets beoordeeld op verschillende bezwijkmechanismen, afschuiving, filterstabiliteit, toplaagstabiliteit onder golfaanval, et cetera.

Dit betekent dat er sprake kan zijn van veiligheidscoëfficiënten per mechanisme.

In deze studie wordt echter alleen aandacht besteed aan de toplaagstabiliteit, vanuit de gedachte dat bezwijken volgens dat mechanisme leidt tot falen van de bekleding. Met andere woorden, door bezwijken als gevolg van toplaaginstabiliteit treedt rampzalige erosie van de ondergrond op. De belasting die tot dit falen leidt, de extreme golfaanval, dient zodanig te zijn dat deze ook tot een serieuze kans op falen van de totale waterkering leidt.

Uiteraard kunnen ook andere mechanismen tot falen leiden. Maar in de Nederlandse praktijk, waar er momenteel slechts weinig dijken van het maaiveld af aan worden opgebouwd, maar het veelal slechts gaat om reconstructie van de bekledingen, is de toplaagstabiliteit voor steenzettingen veruit het belangrijkste mechanisme.

Dit rapport richt zich uitsluitend op **de veiligheid van het ontwerp**. In geval van een toetsing kan een zelfde veiligheid worden bereikt terwijl in de berekening met kleinere marges wordt gewerkt. De specifieke bekleding is in geval van een toetsing namelijk al gerealiseerd, er hoeft dus geen rekening meer te worden gehouden met uitvoeringsonnauwkeurigheden, de geometrie kan immers worden ingemeten; de filterdikte kan worden gemeten; het zuiltype met zijn specifieke open oppervlak en dichtheid ligt al op de dijk. Toepassen van de in dit rapport afgeleide veiligheidsfactoren voor een toetsing kan dus tot onnodig afkeuren leiden.

Recente kennis verkregen uit onderzoek naar de stabiliteit van steenzettingen is verwerkt in de versie Steentoets2010. Omdat dit rapport betrekking heeft op het ontwerp en het voor het ontwerp verstandig is om altijd gebruik te maken van de meest recente kennis, is in deze studie gebruik gemaakt van Steentoets 2010, specifiek versie 1.07 (sept. 2011).

1.1 Normstelling

Steenzettingen die cruciaal zijn voor het functioneren van de primaire waterkering, komen voor in de volgende categorieën (tussen haakjes worden de belangrijkste dijkringgebieden en verbindende waterkeringen en hun normfrequentie genoemd) [2]:

1. Kustlocaties centraal Holland (Noord- en Zuid-Holland: 1/10.000);
2. Overige kustlocaties (Groningen en Friesland, Zeeuwse en (westelijke) Zuid-Hollandse eilanden: 1/4.000);
3. IJsselmeergebied (Noordoostpolder en Flevoland, 1/4.000);

4. Verbindende waterkeringen IJsselmeergebied (Afsluitdijk en Houtribdijk, 1/10.000);
5. Verbindende waterkeringen Zeeuwse en Hollandse eilanden (1/4.000).

Daarnaast komen steenzettingen ook voor op rivierdijken. Maar in die gevallen zal falen van de bekleding veel minder snel tot falen van de waterkering leiden, omdat de reststerkte van de waterkering groot is en/of er tijdig noodmaatregelen kunnen worden getroffen die het erosieproces (aantasting van de reststerkte) kunnen stoppen.

Per saldo moet er voor zwaar aangevallen steenzettingen rekening worden gehouden met één van de twee normfrequenties: 1/4.000 en 1/10.000.

Voor de zwaar aangevallen steenzettingen wordt uitgegaan van de overbelastingsbenadering per dijkvak [4] waarbij als veiligheidseis wordt gesteld dat bij waterstanden gelijk aan of lager dan MHW de kans op falen van de waterkering door andere oorzaken dan overloop/overslag, niet meer dan 10% mag bedragen van de norm. Deze norm is in de Waterwet (voorheen de Wet op de waterkering) voor het betreffende dijkkringgebied vastgelegd.

Verondersteld wordt dat de maatgevende golfhoogte uitgaande van die normfrequentie en de planperiode (50 jaar) bepaald is.

De planperiode voor het ontwerp maakt het verschil met de maatgevende randvoorwaarden voor de toetsing. Voor de toetsing is de zichtperiode immers slechts 6 jaar (voor de eerste tot en met de derde toetsronde was dit 5 jaar).

De overbelastingsbenadering per dijkvak eist dat, bij waterstanden gelijk aan of lager dan MHW, de kans op falen, door andere oorzaken dan overloop/overslag, niet meer dan 10% van de wettelijk vastgestelde norm mag zijn. Dat betekent dat de toplaag uiteraard nog niet instabiel mag worden bij de maatgevende belasting. Al mag aangenomen worden dat de onderlagen en het dijklichaam nog enige reststerkte bieden, zodat toplaaginstabiliteit niet meteen tot falen van de waterkering zal leiden.

Omdat deze reststerkte zich momenteel nog niet laat beschrijven, en ook van geval tot geval zal verschillen, is arbitrair aangenomen dat de toplaag voldoende veilig is als, gegeven de maatgevende belasting, de bezwijkkans ca. 5% bedraagt. Dit komt neer op een betrouwbaarheidsfactor $\beta = 1,64$.

1.2 Aanpak

De methodiek om te komen tot een aanbeveling voor de veiligheidscoëfficiënten is de volgende.

Allereerst is de gebruikte faalfunctie beschreven, waarvan de modelonzekerheid is ontleend aan een eerdere studie [3], zie paragraaf 2.1. Vervolgens is een schatting gemaakt van de onzekerheden in de parameters die bij het ontwerp voor de toplaagstabiliteit een rol spelen. Het gaat daarbij om de constructieparameters (normaliter de sterkte), paragraaf 2.2, en om de hydraulische parameters (normaliter de belasting), paragraaf 2.3.

Voor twee veel voorkomende typen bekledingen is in hoofdstuk 3 met het model en de onzekerheden een probabilistische analyse uitgevoerd: Niveau II, klasse 2. Gekozen is voor een klasse 2 benadering omdat deze betrouwbaarder resultaten geeft dan een benadering uitgaande van de gemiddelde waarde (Mean Value Approach). Op basis van deze bevindingen zijn in hoofdstuk 4 de veiligheidsfactoren voor een semi-probabilistische berekening (Niveau I) bepaald.

2 Probabilistisch model

Voor een aantal problemen is een niveau II klasse 1 berekening (Mean Value Approach) afdoende om de onzekerheden en gevoeligheden goed in kaart te brengen. Er is voor steenzettingen echter sprake van soms sterk niet-lineaire trends. Een berekening uitgaande van de verwachtingswaarden geeft dan minder betrouwbare antwoorden. Daarom wordt de klasse 2 benadering gehanteerd.

2.1 Model en modelonzekerheid

De betrouwbaarheids-, grenstoestands- of faalfunctie wordt veelal gegeven in de volgende vorm:

$$Z = R - S \quad (2.1)$$

Waarin:

Z	de faalfunctie: falen als $Z < 0$ [m];
R	de sterkte [m];
S	de belasting [m].

Omdat voor de bezwijkkansanalyse gebruik wordt gemaakt van het rekenmodel Steentoets, waarin belasting en sterkte direct met elkaar worden vergeleken is de sterkte R [m] in de betrouwbaarheidsfunctie gelijk genomen aan de bezwijkgolffhoogte volgens het rekenmodel. En de belasting S is dan de werkelijk optredende golffhoogte.

Bij de afregeling van Steentoets op de Deltagootresultaten is impliciet veiligheid ingebouwd, er is gemiddeld een marge tussen de berekende bezwijkgolffhoogte (R) en de werkelijke bezwijkgolffhoogte (S). Het is een maat voor de onnauwkeurigheid en de systematische afwijking van het rekenmodel.

De faalfunctie kan in dit geval dus worden gegeven door:

$$Z = R - \frac{S}{m} = H_{s,toelaatbaar} - \frac{H_{s,RVW}}{m} \quad (2.2)$$

Waarin:

$H_{s,toelaatbaar}$	de toelaatbare golffhoogte berekend met Steentoets [m];
$H_{s,RVW}$	de golffhoogte volgens de berekende randvoorwaarde, gegeven de normfrequentie [m];
m	de modelfactor [-].

In Bijlage D, Tabel D.1, is bepaald dat van de geklemde zettingen de berekende waarden $H_{s,toelaatbaar}$ gemiddeld een factor 1,22 onder de gemeten waarden $H_{s,RVW}$ liggen. Voor de niet-geklemden zettingen (zie Tabel D.2) is die factor 1,35. De bepaalde spreidingen bedragen 0,20 en 0,23 voor geklemde, respectievelijk niet-geklemden zettingen. Om de probabilistische berekening helder te houden wordt de systematische afwijking die Steentoets kent als gevolg van het aan de veilige kant afregelen van het rekenmodel op Deltagootproefresultaten beschreven door m_0 . De modelfactor m zelf bevat de onzekerheid van het model. Daarom

wordt in deze studie uitgegaan van de volgende waarden voor de factoren bij de geklemde zuilenzetting $m_0 = 1,22$, $\mu_m = 1,0$ en $\sigma_m = 0,20$; en voor de niet-geklemde blokkenzetting $m_0 = 1,35$, $\mu_m = 1,0$ en $\sigma_m = 0,23$. De m_0 is een parameter die voor de gebruiker van Steentoets2008 (Steentoets2010) niet zichtbaar is.

Type: niveau, klasse	Type aanduiding (Engels)	Toelichting
	Deterministisch	Berekening met een overall veiligheidsfactor gebaseerd op empirie
	Probabilistisch	
Niveau I	Semi-probabilistisch, met probabilistisch onderbouwde rekenwaarden (Load and Resistance Factor Design)	Berekening met (partiële) veiligheidsfactoren die zijn afgeregeld op een probabilistische berekening Niveau II of III
Niveau II,	Probabilistische berekening met benaderingen	
Niveau II, klasse 1	Gemiddelde waarde benadering (Mean Value Approach)	Berekening met linearisatie van de grenstoestandsfunctie in de verwachtingswaarde van alle parameters
Niveau II, klasse 2	Ontwerppunt benadering (Design Point Method = First Order Reliability Method = FORM)	Berekening met linearisatie van de grenstoestandsfunctie in het ontwerppunt (=het punt met de grootste faalkansbijdrage op de grenstoestandsfunctie)
Niveau II, klasse 3	Verfijnde methode (Second Order Reliability Method = SORM)	Berekening met kromlijnige benadering van de grenstoestandsfunctie in het ontwerppunt
Niveau III	Volledig probabilistische berekening	
	Analytische integratie	Exacte bepaling faalkans door analytische integratie van de faalruimte
	Numerieke integratie	Exacte bepaling faalkans door numerieke integratie van de faalruimte
	Monte Carlo simulatie	Simulatie waarbij faalkans wordt bepaald door groot aantal berekeningen waarbij steeds parameters zijn getrokken uit de betreffende kansverdelingen.

Tabel 2.1 Indeling van berekeningstypen op grond van wijze van omgaan met veiligheid

Volgens de theorie zou er een onderscheid moeten worden gemaakt tussen belastingparameters aan de ene zijde en sterkteparameters aan de andere zijde. In deze studie is de indeling in eerste instantie net even anders gemaakt, namelijk in constructieparameters en hydraulische condities.

Het idee daarachter is het volgende. De lek lengte van de bekleding, die direct afhankelijk is van de constructieparameters, bepaalt in sterke mate de feitelijke belasting op de toplaag: de netto opwaartse druk. De dikte van de toplaag, een constructieparameter, speelt bij de toplaagstabiliteit van een steenzetting een dubbelrol. De sterkte wordt groter bij toenemende dikte, omdat het gewicht van de toplaag toeneemt. De belasting wordt echter ook iets groter, omdat de doorlatendheid van de toplaag bij een grotere dikte iets kleiner wordt.

Zo speelt ook de filterlaagdikte, ook een constructieparameter, voor wat betreft de toplaagstabiliteit niet de rol van een sterkte-parameter. Hoe groter de filterlaagdikte is, des te eerder er normaliter instabiliteit van de toplaag optreedt. Voor het mechanisme afschuiving kan de filterlaagdikte echter wel als sterkteparameter worden aangemerkt.

Tegenover de constructieparameters staan de hydraulische condities die gekoppeld zijn aan de uitzonderlijke stormomstandigheden. Maar ook voor die parameter is niet altijd meteen evident of een grotere waarde ook daadwerkelijk een verminderde stabiliteit oplevert. Denk daarbij aan de golfsteilheid.

In de volgende twee paragrafen zal eerst worden ingegaan op de constructieparameters en de hydraulische belastingparameters, waarna in het volgende hoofdstuk de berekeningsresultaten aan de orde komen.

2.2 Constructieparameters

Voor steenzettingen geeft het TR Steenzettingen [8] in *bijlage B, Parameters dimensionering steenzettingen* van het deel *Ontwerp* aan welke representatieve waarden voor de parameters moeten worden aangehouden. In Tabel 2.2 is hiervan een korte samenvatting gegeven.

Naast het TR is er nog de ontwerp praktijk zoals deze in Zeeland bij het Project Bureau Zeeweringen (PBZ) gangbaar is. Die praktijk is vastgelegd in een Handleiding Ontwerpen Dijkbekledingen [10], al zijn veel van de getallen hieronder ontleend aan een nog niet afgeronde aangepaste versie van dit document. De 2 voorbeeldconstructies waarvoor de berekeningen zijn gemaakt, zijn een zuilenzetting en een zetting van gekantelde blokken op een zeedijk. De relevante ontwerp parameters voor de beide cases zijn gegeven in Tabel 2.5.

Volgnr. parameter	Representatieve waarde voor parameter en/of spreiding
1. n , cotan taludhelling	-0,2 ten behoeve van uitvoeringsonnauwkeurigheid; Daarnaast ook nog rekening houden met tonronde.
2. Ω , open oppervlak toplaag	Standaardwaarde volgens Tabel 2.3
3. D [m] dikte toplaag	Karakteristieke waarde (5%) Natuursteen: 2 cm minder dan minimale elementhoogte volgens de sortering
4. ρ_s [kg/m ³] soortelijke massa	Betonelementen: 0,95 x natte dichtheid Natuursteen: karakteristieke waarde voor ΔD . Daarnaast verwijzing naar standaardwaarden Tabel 2.4.
5. D_{15} [mm] korreldiameter inwasmateriaal	Geen richtlijn, werd in ANAMOS feitelijk niet gebruikt
6. n_v [-] porositeit inwasmateriaal	Geen richtlijn, werd in ANAMOS feitelijk niet gebruikt
7. b [m] dikte filterlaag	Voorgeschreven waarde + 0,05 m voor makkelijke werkomstandigheden; voorgeschreven waarde + 0,1 m voor moeilijke werkomstandigheden. Toeslag voor natuursteenelementen met verschillende hoogte: helft van verschillen in toplaagdikte.
8. n_f [-] porositeit filterlaag	0,35
9. D_{f15} [mm]	Nominale waarde + 2 à 3 mm
10. m [-]	Geen richtlijn want modelonzekerheid
11. H_s [m]	Maatgevende golfhoogte
12. s_{0p} [-]	Geen invoer, maar direct een maatgevende golfperiode bepaald
13. N [-]	Geen richtlijn, stormduur werd in ANAMOS niet gebruikt

Tabel 2.2 Aanbevolen rekenwaarden volgens TR Steenzettingen

Toplaagtype	Ω , open oppervlak toplaag / spleetbreedte
Betonzuilen	10-15%
Basaltzuilen	10-15%
Beton of Haringman blokken	1-4 mm
Granietblokken	3-30 mm
Koperslakkblokken	1-5 mm

Tabel 2.3 Standaardwaarden open ruimte tussen toplaagelementen volgens TR Steenzettingen

Toplaagtype	Dichtheid [kg/m ³]
Betonzuilen	2300 – 3000
Betonblokken	2300 – 2500
Haringmanblokken	0,9 à 0,95 maal dichtheid beton
Basaltzuilen	2900 – 3100
Granietblokken	2600 – 2700
Koperslakkblokken	2500 – 2700

Tabel 2.4 Standaardwaarden dichtheid toplaagelementen volgens TR Steenzettingen

Ontwerpparameter	Case 1 zuilenzetting	Case 2 Gekantelde blokken
Taludhelling 1 : n [-]	3,5 (0,25)	3,5 (0,25)
Dikte toplaag [m]	0,35 (0,01)	0,5 (0,015)
Afmetingen $B \times L$ [m ²]	Nvt	0,25 x 0,5 (0)
Open oppervlak [%], spleetbreedte [mm]	$\Omega = 13$ (1,8)	$s = 3,65$ (1,34)
Soortelijke massa toplaagelementen ρ_s [kg/m ³]	2300 (46)	2300 (46)
Inwassing korreldiameter D_{15} [mm] (zie kader)	6 (2)	Nvt
Filterlaag dikte b [m]	0,10 (0,02)	0,10 (0,02)
Porositeit filterlaag n_f [-]	0,35 (0,05)	0,35 (0,05)
Korreldiameter filterlaag D_{f15} [mm]	15,2 (0,9)	5,2 (0,6)
Soortelijke massa van (zee)water ρ [kg/m ³]	1025 (0)	1025 (0)

Tabel 2.5 Gehanteerde waarden voor de parameters van de twee cases, verwachtingswaarden (en spreidingen)

In deze opsomming van parameters is tussen haakjes de schatting van de spreiding in de betreffende parameter gegeven. Die spreidingen zijn inschattingen die o.a. zijn gebaseerd op Tabel 2.2, waarbij is aangenomen dat de aanbevolen rekenwaarde overeenkomt met de verwachtingswaarde + 1,5 à 2 maal de standaard deviatie (=7 à 2%-waarde). Daarnaast is gekeken naar de ontwerp- [10] en uitvoeringspraktijk in Zeeland.

De porositeit van de inwassing bij de zuilenzetting is in Steentoets geen invoerparameter meer, er wordt altijd gerekend met $n_v = 0,7$. Omdat dit getal toch een onzekerheid kent, is die verrekend met die van de korreldiameter van de inwassing, zie tekstkader.

De dikte van de toplaag is bij betonzuilen en gekantelde betonblokken een vrij nauwkeurig bekende maat. Voor de gekantelde blokken is een net iets grotere spreiding 1,5 cm aangenomen omdat de effectieve dikte als gevolg van beschadigingen aan de randen net iets minder kan zijn dan op grond van het productieproces kan worden verwacht.

In geval van een zuilenzetting zal er op basis van de benodigde zuildikte een standaardmaat worden gekozen uit de in 5 cm stappen oplopende reeks leverbare zuillengten. Aldus zal de werkelijke toegepaste bekledingsdikte dus gemiddeld 2,5 cm groter zijn dan die volgens de berekeningen nodig is.

Voor de blokafmetingen is aan de breedte en de lengte geen spreiding toegekend, omdat bekend is dat afwijkingen in deze parameters het rekenresultaat toch nauwelijks beïnvloeden.

Uit metingen aan taludhellingen van redelijk recent uitgevoerde vakken in Zeeland blijkt dat taludhellingen wellicht wat sterker variëren dan in het TR is aangegeven. Over het algemeen is er een trend dat de gerealiseerde tonronde minder is dan de gewenste tonronde: het ondertalud is gemiddeld wat flauwer (μ ca. +0,1 = afwijking op n bij talud 1 : n) en het boventalud gemiddeld wat steiler (μ ca. -0,25). De daarbij behorende spreidingen zijn: ondertalud $\sigma = 0,2$, boventalud $\sigma = 0,3$. Per saldo is gekozen voor een spreiding van 0,25. De offset groot -0,25 (verondersteld wordt dat het boventalud maatgevend is) maakt dat in Zeeland op dit punt aan de onveilige kant wordt gerekend.

Verrekening van de onzekerheid van de porositeit n_v van het inwasmateriaal in de onzekerheid van de korreldiameter D_{15} van het inwasmateriaal

De porositeit n_v van het inwasmateriaal is in Steentoets geen invoerwaarde, terwijl deze in de praktijk wel degelijk een onzekerheid kent. Die onzekerheid in de porositeit werkt door in de toplaagdoorlatendheid. Daarom wordt de onzekerheid in de porositeit n_v verdisconteerd met die van de D_{15} van het inwasmateriaal.

De porositeit wordt gebruikt om de Forchheimer-coëfficiënten te berekenen volgens:

$$a_i = 160 \frac{v(1-n_v)^2}{gn_v^3 D_{15}^2} ; b_i = \frac{0,10}{gn_v^5 D_{15}}$$

Een afwijking δn_v op de porositeit werkt als volgt door:

$$a_i + \delta a_i = 160 \frac{v(1-(n_v + \delta n_v))^2}{g(n_v + \delta n_v)^3 D_{15}^2} = 160 \frac{v(1-n_v)^2 \left(1 - \frac{\delta n_v}{1-n_v}\right)^2}{gn_v^3 \left(1 + \frac{\delta n_v}{n_v}\right)^3 D_{15}^2} \approx a_i \frac{\left(1 - 2 \frac{\delta n_v}{1-n_v}\right)}{\left(1 + 3 \frac{\delta n_v}{n_v}\right)}$$

$$\approx a_i \left(1 - 2 \frac{\delta n_v}{1-n_v} - 3 \frac{\delta n_v}{n_v}\right) \approx a_i (1 - 6,67\delta n_v - 4,29\delta n_v) \approx a_i (1 - 10,95\delta n_v)$$

$$b_i + \delta b_i = \frac{0,10}{g(n_v + \delta n_v)^5 D_{15}} = \frac{0,10}{gn_v^5 (1 + \frac{\delta n_v}{n_v})^5 D_{15}} \approx b_i \left(1 - 5 \frac{\delta n_v}{n_v}\right) \approx b_i (1 - 7,14\delta n_v)$$

En een verstoring δD_{15} van de D_{15} levert:

$$a_i + \delta a_i = 160 \frac{v(1-n_v)^2}{gn_v^3 (D_{15} + \delta D_{15})^2} \approx a_i \left(1 - 2 \frac{\delta D_{15}}{D_{15}}\right)$$

$$b_i + \delta b_i = \frac{0,10}{gn_v^5 (D_{15} + \delta D_{15})} \approx b_i \left(1 - \frac{\delta D_{15}}{D_{15}}\right)$$

Uitgaande van een $D_{15} = 6$ mm resulteert dit in: $a_i + \delta a_i \approx a_i (1 - 0,333\delta D_{15})$;

$$b_i + \delta b_i \approx b_i (1 - 0,167\delta D_{15})$$

Bij benadering kan worden gesteld dat een onzekerheid van 0,05 in de porositeit kan worden vertaald als een extra onzekerheid in de D_{15} van $(10,95/0,333 + 7,14/0,167)/2 \cdot 0,05 = 1,9$ mm. Daarbij moet voor de D_{15} zelf een onzekerheid van 0,6 mm worden toegevoegd. Aangezien de onzekerheid in de porositeit veel groter is, komt deze optelling neer op een afronding van de grootste waarde naar 2 mm.

Aan het (open)oppervlak van zuilenzettingen zijn door het Projectbureau Zeeweringen enige metingen gedaan, maar doordat het standaard oppervlak van een pakket stenen niet al te nauwkeurig bekend is, zijn daaruit maar moeilijk harde waarden af te leiden. Meest concreet is dat de variatiecoëfficiënt binnen een dijkvak ca. 0,1 bedraagt. Dit is een maat die voor een toetsing relevant is, maar in het ontwerp moet ook rekening worden gehouden met variatie over de verschillende dijkvakken. Op grond van de gegevens is gekomen tot de volgende schatting: $\mu = 13\%$ en een variatiecoëfficiënt van 0,14 oftewel $\sigma = 1,8\%$. Uitgaan van die waarden komt de range standaardwaarden voor het open oppervlak van zuilenzettingen van

10 – 15% als genoemd in het TR overeen met $\mu - 1,67\sigma$ tot $\mu + 1,11\sigma$. De range loopt dan dus van 5% onderschrijdingswaarde tot 13% overschrijdingswaarde. Voor het ontwerp wordt in Zeeland voor alle zuilenzettingen de veilige waarde van 10% voor het open oppervlak aangehouden.

Voor de spleetbreedte zijn de metingen aan een gekantelde zetting in de Deltagoot [12] opnieuw geanalyseerd: voor de tabellen A3 en A4 en A5 uit [12] zijn per steen gemiddelde spleetbreedtes (gemiddeld over 6 spleten rond een blok) bepaald. Middelen over de spleetbreedtes is geoorloofd omdat een bijdrage aan de doorlatendheid die uit de spleetbreedte wordt berekend vrijwel lineair is met de spleetbreedte. Deze analyse leverde een gemiddelde van 2,30 mm en een σ van 1,007 mm.

Op grond van een drietal metingen in Zeeland lijkt de gemiddelde spleetbreedte op 3,65 mm uit te komen met een spreiding van 1,34. De gemiddelde spreiding is niet het gemiddelde van de drie spreidingen. Maar de gemiddelde spreiding is bepaald over alle (=3 x 45 blokken) blokgemiddelde spleetbreedtes, zodat ook rekening is gehouden met het feit dat de ene locatie mogelijk systematisch afwijkt van de andere.

Spleetbreedtes [mm]	Zimmerman-polder	Baarland-polder	Biezelingse Ham	Gemiddeld
Gemiddelde spleetbreedte per blok	2,96	4,26	3,73	3,65
Standaarddeviatie van gemiddelde spleetbreedte per blok	0,94	1,45	1,26	1,34

Tabel 2.6 Spleetbreedtes gemeten aan zetting van gekantelde betonblokken op een drietal locaties in Zeeland

Vergelijken we deze waarden met de metingen in de Deltagoot dan blijken in de praktijk over het algemeen zowel het gemiddelde als de spreiding hoger te liggen. Alleen de Zimmermanpolder laat een marginaal kleinere spreiding zien, terwijl de gemiddelde spleetbreedte wel iets groter is. Het lijkt niet onaannemelijk dat de bekleding in de Deltagoot net iets strakker is gezet dan in de praktijk. Per saldo blijkt het praktijkgemiddelde 1,6 maal hoger dan in de Deltagoot en de spreiding in de praktijk 1,33 maal hoger. Voor de berekening is uitgegaan van de op de praktijk gebaseerde waarden $\mu = 3,65$ mm en $\sigma = 1,34$ mm.

Uitgaan van die waarden komt de range standaardwaarden voor de spleetbreedte bij betonblokken van 1 – 4 mm als genoemd in het TR overeen met $\mu - 1,98\sigma$ tot $\mu + 0,26\sigma$. De range loopt dan dus van 2,4% onderschrijdingswaarde tot 40% overschrijdingswaarde.

In Zeeland wordt momenteel voor koud tegen elkaar geplaatste blokken uitgegaan van 2 mm, wat uitgaande van de meetwaarden uit de praktijk overeenkomt met $\mu - 1,23\sigma$ oftewel een 10% onderschrijdingswaarde.

De soortelijke massa van water zou wellicht beter als hydraulische parameter in plaats van als constructieparameter kunnen worden aangemerkt. Maar hij is niet aan uitzonderlijke stormomstandigheden gekoppeld en wat wellicht nog belangrijker is: hij bepaalt hoeveel sterkte er kan worden gemobiliseerd. Daarom wordt hij toch hier behandeld, bij de constructie-parameters.

De soortelijke massa van water heeft in de invoer van Steentoets ook een andere plaats dan de constructieparameters, hij wordt ingevoerd via het tabblad algemeen. De variatie in deze parameter is daardoor wat lastig in te passen. Maar omdat die variatie, naar schatting ca. 5 kg/m³ een factor 10 kleiner is dan die in de soortelijke massa van de steen en in de berekening ongeveer eenzelfde rol speelt als de soortelijke massa van steen (complementair), mag deze variatie worden verwaarloosd. De variatie in de soortelijke massa van water blijft daarom verder buiten deze probabilistische analyse. Uiteraard moet er altijd

worden gerekend met de werkelijke waarden: 1000 kg/m³ voor zoet water en 1025 kg/m³ voor zeewater.

De spreiding in de soortelijke massa van de steen wordt onderbouwd door bevindingen van PBZ [11] waar voor de dichtheid van de zuilen toegepast op de dijk van de Margarethapolder de volgende gegevens worden gepresenteerd:

Dichtheid volgens Ontwerp [kg/m ³]	Gemiddeld gemeten dichtheid [kg/m ³]	Hoeveelheid metingen onder de ontwerpdichtheid [%]	Hoeveelheid metingen boven 2800 kg/m ³ [%]
2700	2754	13,6	17,3

Tabel 2.7 Vergelijking werkelijke dichtheid zuilen met de dichtheid volgens het ontwerp[11]

Als een normale verdeling wordt verondersteld van de gemeten dichtheden en op basis van het overschrijdingspercentage voor 2700 kg/m³ en het overschrijdingspercentage voor 2800 kg/m³ het gemiddelde en de spreiding worden berekend, dan levert dit voor de ρ_s een $\mu = 2753$ kg/m³ en $\sigma = 49$ kg/m³. De aldus berekende verwachtingswaarde komt goed overeen met de gepresenteerde waarde, dus de verdeling is kennelijk niet erg scheef. De spreiding voor deze locatie komt opmerkelijk goed overeen met de veronderstelde spreiding.

De veronderstelde waarde is gebaseerd op recentere metingen. Deze laten zien dat de variatiecoëfficiënt zich meestal tussen 0,01 en 0,02 bevindt, terwijl de gemiddelde waarde grofweg 2% hoger ligt dan de volgens het bestek vereiste waarden. Het gaat hierbij steeds om de natte dichtheid. De dichtheid in het veld bij stormomstandigheden wijkt hier in ongunstige zin wellicht iets vanaf. Als de variatie in de dichtheid een dominante rol blijkt te spelen moet op dit punt wellicht nog een aanpassing worden gedaan.

Het inwasmateriaal toegepast in zuilenzettingen (sortering 4/32) heeft volgens gegevens van een leverancier een verwachtingswaarde van 6 mm en een bandbreedte van ruim 2 mm. In deze wordt daarom gerekend met $\mu = 6$ mm en $\sigma = 0,6$ mm. Feitelijk wordt in de berekening overigens de onzekerheid in de porositeit van de inwassing verdisconteerd met die van de korreldiameter van de inwassing, zie tekstkader.

Met betrekking tot de dikte van de filterlaag zijn geen gegevens geregistreerd, maar door de uitvoering in Zeeland wordt deze geschat als 0,08 à 0,12 met een gemiddelde van 0,10 m, de bestekswaarde. In het ontwerp wordt momenteel standaard deze verwachtingswaarde 0,10 m in rekening gebracht, ongeacht of de toplaag uit betonzuilen of gekantelde blokken bestaat. In deze studie is 0,10 m als verwachtingswaarde aangenomen en 0,02 m als spreiding.

Voor de korreldiameter van het filter onder een zuilenzetting wordt een sortering 14/32 gebruikt. In het ontwerp wordt in Zeeland een D_{f15} van 17 mm in rekening gebracht. De verwachtingswaarde volgens een opgave van een fabrikant is 15,2 mm met een bandbreedte van 2,6 mm. Op grond daarvan is een spreiding 0,9 mm aangenomen, zodat de rekenwaarde voor het ontwerp overeenkomt met $\mu + 2 \sigma$ oftewel een veilige waarde die in 2% van de gevallen wordt overschreden.

Voor de korreldiameter van het filter onder een blokkenzetting waarbij de blokken zonder afstandhouders worden geplaatst, wordt een sortering 4/20 gebruikt. In het ontwerp wordt in Zeeland een D_{f15} van 5 mm in rekening gebracht. De verwachtingswaarde volgens een opgave van een fabrikant is voor deze sortering 5,2 mm. Aangenomen is eenzelfde spreiding als voor de sortering 4/32: $\sigma = 0,6$ mm. De rekenwaarde voor het ontwerp komt dus overeen met de op hele mm's afgeronde verwachtingswaarde.

2.3 Hydraulische belastingparameters

De hydraulische parameters in deze studie betreffen in feite de randvoorwaarden gegeven de maatgevende storm. Steentoets berekent, als gebruik wordt gemaakt van de optie "itereer H_s ", de toelaatbare golfhoogte H_s . In deze studie wordt verondersteld dat de bekleding scherp gedimensioneerd wordt, zodat de toelaatbare golfhoogte op tenminste één punt van de bekleding daadwerkelijk overeenkomt met de golfhoogte volgens de maatgevende condities.

De (maatgevende) golfhoogte kent ook een onzekerheid. Voor deze spreiding zijn geen vaste gegevens voor handen, geschat is dat de spreiding 0,1 m bedraagt.

Naast de golfhoogte is er nog een tweede parameter nodig om een stationair golfveld dat de bekleding belast, te beschrijven. Veelal wordt hiervoor een maat voor de golfperiode, bijvoorbeeld T_p , gehanteerd. De relatie tussen golfperiode en golfperiode wordt beschreven door de volgende vergelijking:

$$T_p = \sqrt{\frac{2\pi H_{s0}}{g \cdot S_{0p}}} \quad (2.3)$$

Gegeven een (extreme) storm, waarbij een (verloop van de) golfsteilheid hoort, is de golfperiode dus gekoppeld aan de golfhoogte. Voor onze probleemstelling, waarbij ook de golfhoogte een stochast is, zijn golfperiode en golfhoogte dus geen onafhankelijke parameters. Aangezien het lastig is om een onderlinge afhankelijkheid van parameters in de analyse mee te nemen, is niet gekozen voor de golfperiode, maar is de golfsteilheid als stochast in de probabilistische analyse gekozen.

Verondersteld wordt dat waarden voor de golfsteilheid tijdens stormen grofweg tussen 0,03 en 0,05 liggen, daarom is uitgegaan van de volgende kentallen: $\mu = 0,04$; $\sigma = 0,002$.

Omdat tegenwoordig ook de belastingsduur een parameter is die mede de stabiliteit van een steenzetting bepaalt, is ook de stormduur een parameter waarvan de onzekerheid in rekening moet worden gebracht. De standaard waarde in toetsing en ontwerp van bekledingen op kustlocaties is een stormduur van 35 of 45 uur, die laatste waarde geldt voor de Waddenzee. Over spreidingen in stormduren zijn standaard geen harde getallen beschikbaar. Uit de vrij grove indeling, 35 en 45 uur, kan worden afgeleid dat de nauwkeurigheid van de stormduur beperkt is. Lopend onderzoek naar de stormduur geeft ook aan dat de standaard stormduur van 35 uur eigenlijk te kort is en 46 uur een veiliger keuze zou zijn. In deze studie is aangenomen dat de spreiding in de stormduur gelijk is aan 5 uur. De stormduur, uitgedrukt in aantallen golven (N), volgt uit de feitelijke stormduur gedeeld door de gemiddelde golfperiode. Nu wordt voor de berekeningen met de optie "itereer H_s " de stormduur geen invoer, er wordt gerekend met een opgegeven aantal golven. De belasting grijpt slechts een deel van de volledige stormduur aan op de maatgevende plek. Voor deze studie is daarom uitgegaan van een belastingsduur van 10 uur (= verwachtingswaarde stormduur / 3,5) en een spreiding van 1,43 uur (= spreiding stormduur / 3,5). Aangezien bekend is dat de invloed van de belastingsduur niet al te groot is, is de omzetting van belastingsduur naar aantal golven grofstoffelijk gedaan. De stormduur en de spreiding daarin zijn gedeeld door de golfperiode T_p die maatgevend is bij de berekening uitgaande van de verwachtingswaarde voor alle parameters.

3 Berekeningen en analyse niveau II

Vanwege de wat hogere nauwkeurigheid is een “niveau II klasse 2”-berekening uitgevoerd. Als eerste stap daar naar toe, wordt echter de “niveau II klasse 1”-berekening gerapporteerd. Deze wordt ook wel aangeduid als de “gemiddelde waarde benadering”.

3.1 Niveau II klasse 1

Met het model zoals beschreven in hoofdstuk 2 is in eerste instantie een Niveau II, klasse 1 berekening uitgevoerd.

Bedacht dient te worden dat er bij de Steentoetsberekeningen gebruik is gemaakt van de optie “Itereer H_s ”, zodat er sprake is van discrete stappen, waardoor de antwoorden geen perfect continu verloop hebben als functie van een bepaalde parameter. Daardoor kunnen er hier en daar wat onverwachte resultaten uitkomen. Deze onregelmatigheden dienen echter altijd slechts een beperkt effect op de berekeningen te hebben.

Als voorbeeld zijn de resultaten van de case met de zuilenbekleding weergegeven in Tabel B.1. In deze case is, naast de impliciet in Steentoets opgenomen veiligheid, een extra veiligheid opgenomen (1,25).

Met de verwachtingswaarde en de spreiding van de Z -functie kan de betrouwbaarheid β worden bepaald. De belasting (H_s) die bij de case is gebruikt is gebaseerd op de belasting waarbij de bekleding volgens het rekenmodel nog juist stabiel is. Deze belasting is met een factor 1,25 gereduceerd. Voor deze case levert dat $\beta = 2,74$ wat overeenkomt met een overschrijdingskans van 0,3%.

Merk op dat de normstelling voor het dijkvak daardoor in deze exercitie geen rol lijkt te spelen. De normstelling (1:4.000 of 1:10.000 jaar) bepaalt met welke golfrandvoorwaarde (en waterstand) moet worden gerekend. Aangezien in deze analyse de golfrandvoorwaarde het uitgangspunt is, resteert slechts het bepalen van de betrouwbaarheid van de bekleding gegeven de extreme golfrandvoorwaarde.

Deze klasse 1 berekening levert ook een schatting voor de gevoeligheid voor de onzekerheid in de verschillende parameters. Het blijkt dat de bezwijkkans feitelijk maar door een beperkt aantal parameters wordt bepaald.

Het gaat om de volgende parameters, in volgorde van belang:

- de modelonzekerheid m ($\alpha_m = 0,87$),
- de dichtheid steen ρ_s ($\alpha_{\rho_s} = 0,28$),
- de golfhoogte H_s ($\alpha_{H_s} = -0,27$),
- de bekledingsdikte D ($\alpha_D = 0,23$),
- de taludhelling n ($\alpha_n = 0,16$),
- en de stormduur N ($\alpha_N = -0,08$).

Het effect van een variatie van de overige paramaters is nihil. De case betreft een dusdanig uitgekende praktijksituatie dat de toplaagstabiliteit niet wordt bepaald door de leklengte-

theorie, maar door de begrenzing die in Steentoets is ingebouwd om een te extreme $H_s / \Delta D$ -verhouding te voorkomen.

Doordat de leklengte geen rol meer speelt in deze case doen het open oppervlak, de inwassing en de filtereigenschappen er niet meer toe.

Betekenis van de coëfficiënt α_j

Stel dat de veiligheid in een situatie afhankelijk is van slechts één sterkteparameter (R_1) en dat voor die parameter wordt gerekend met een karakteristieke waarde $R_1 = \mu_1 - k\sigma_1$. Voor de bezwijk- danwel faalfunctie Z geldt: $Z = 0$ voor $\mu_t - \beta\sigma_t$. Daarin is β de zogenaamde betrouwbaarheid. Als er sprake is van een normale verdeling dan kan de bezwijk- danwel faalkans in een tabel worden teruggezocht bij de betreffende β -waarde. Als de faalfunctie evenredig is met de betreffende parameter dan is k dus gelijk aan β . Het ontwerppunt voor de betreffende parameter is in geval van een enkele parameter dus simpel: $\mu - \beta\sigma = \mu - k\sigma$.

Voor problemen waar meerdere (j) parameters een rol spelen, wordt het ontwerppunt gegeven door $[\mu_1 + \alpha_1\beta\sigma_1; \dots; \mu_j + \alpha_j\beta\sigma_j]$. Idealiter komen de karakteristieke waarden voor de verschillende sterkteparameters dus overeen met $\mu_j + \alpha_j\beta\sigma_j$. Oftewel $k_j = -\alpha_j\beta$. De β -waarde wordt ontleend aan de vereiste faalkans, de α_j -waarde volgt uit de iteratieve procedure die tot het ontwerppunt leidt.

De coëfficiënt α_j staat in feite voor het belang van de spreiding in verhouding tot de ligging van parameter j voor de faalfunctie: een parameter die de gevoeligheid beschrijft. De coëfficiënt α_j kan waarden aannemen van -1 tot +1. Een positief teken betekent, dat een toename van deze parameter leidt tot een hogere waarde van de faalfunctie; een negatief teken betekent dat een toename van deze parameter leidt tot een lagere waarde van de faalfunctie. Hoe groter de absolute waarde van α_j des te groter de invloed van de betreffende parameter: $\alpha_j = 1$ of -1 , betekent dat parameter j alles bepalend is; $\alpha_j = 0$ betekent dat de exacte waarde van parameter j er niet toe doet.

In Tabel B.2 zijn de resultaten voor de klasse 1 berekening voor de zetting met gekantelde blokken gegeven. Opmerkelijke punten naar aanleiding van de uitkomst van de mean-value-berekening voor deze zetting zijn:

- Het belang van de onzekerheid in de spleetbreedte blijkt beperkt ($\alpha_s = 0,15$), veel minder dominant dan verwacht. Uit eerdere verkenningen, waarbij is uitgegaan van lagere waarden voor de spleetbreedte (rond 1 mm), was bekend dat de uitkomst extreem gevoelig is voor de spleetbreedte. In de huidige berekeningen is gerekend met veel hogere waarden voor de spleetbreedte ($\mu_s = 3,65$ mm), waarden die zijn gebaseerd op praktijkmetingen (zie paragraaf 2.2). Bij de huidige berekening moet worden opgemerkt dat de berekeningen voor de spleetbreedte net iets anders zijn uitgevoerd dan voor de andere parameters. Omdat bekend is dat de gevoeligheid voor de spleetbreedte groter wordt naarmate de spleetbreedte kleiner is, is voor de variatieberekening (die de gevoeligheid voor de verandering van een parameter bepaalt) van de spleetbreedte een variatie van $-\sigma$ gebruikt.
- Naast de modelonzekerheid ($\alpha_m = 0,54$) lijkt de filterlaag vrijwel volledig de onzekerheid in de berekening te bepalen, met de dikte van de filterlaag en de porositeit van de filterlaag als twee parameters die een zeer belangrijke bijdrage aan de onzekerheid leveren ($\alpha_b = -0,46$ en $\alpha_n = -0,55$).

- De onzekerheid in de golfhoogte lijkt een relatief onbelangrijke rol te spelen ($\alpha_{H_s} = -0,12$).

Uit de verwachtingswaarde en de spreiding van de Z -functie volgt de betrouwbaarheid β . Deze is voor de zetting van de gekantelde blokken $\beta = 2,17$ wat overeenkomt met een overschrijdingskans van ca. 1,5 %.

3.2 Niveau II klasse 2

Uitgaande van de klasse 1 berekening is een iteratieprocedure gevolgd om te komen tot het ontwerppunt: de "niveau II, klasse 2-berekening".

Daarbij moet worden opgemerkt dat het rekenmodel Steentoets enkele discontinuïteiten kent. Een voorbeeld hiervan is de omslag van turbulente naar laminaire stroming als de spleetbreedte tussen de elementen steeds smaller wordt gekozen. Als bij de variatieberekeningen de twee berekeningen ter weerszijde van een dergelijke discontinuïteit liggen, dan wordt een verkeerde trend (de afgeleide $\delta Z / \delta x_j$) berekend en daardoor kan het iteratieproces ontsporen. In die gevallen moet de afgeleide worden bepaald door de parameters van de twee variatieberekeningen zodanig te kiezen dat beide punten aan dezelfde kant van de discontinuïteit liggen. En dan bij voorkeur de kant waar het iteratieproces heen beweegt. De discontinuïteiten maken dat de convergentie van het iteratieproces niet vanzelfsprekend is, maar moet worden bewaakt.

Tabel C.1 toont voor de zuilenzetting naast de uiteindelijke uitkomst ook de tussenresultaten van de laatste iteratieslag. In Tabel C.2 is eenzelfde tabel gegeven voor de case met de toplaag van gekantelde betonblokken.

Voor zowel de zuilenzetting als voor de blokkenzetting kan op basis van de berekende verwachtingswaarde en spreiding de factor β worden berekend: ca. 1,64. Die waarde komt overeen met een bezwijkkans van 5%. Dat is geen toeval. De opgelegde golfrandvoorwaarde is met behulp van trial and error zodanig gekozen dat uiteindelijk ca. $\beta = 1,64$ werd berekend. Als we die uitkomst vergelijken met de kans volgens de mean value-benadering (ca. 0,3% en 1,5%) dan blijkt, zoals mocht worden verwacht, de klasse 2 berekening een grotere bezwijkkans op te leveren. Maar die bezwijkkans blijkt zelfs een orde groter te zijn. De berekeningsresultaten die in de vorige paragraaf (3.1) zijn gepresenteerd, zijn die met de randvoorwaarde die na het iteratieproces uiteindelijk tot de gewenste faalkans van 5% leiden. Deze resultaten zijn verkregen door de opgelegde golfhoogte (de verwachtingswaarde voor S) gelijk te kiezen aan "1 / factor" maal de golfhoogte waarbij de gekozen constructie volgens Steentoets nog juist stabiel is.

Voor de zuilenzetting bedroeg deze factor 1,25; voor de zetting van de op hun kant geplaatste blokken bedroeg de factor 1,3. Deze factor kan worden beschouwd als een overall-veiligheidsfactor aangezien voor alle overige parameters is gerekend met de verwachtingswaarden.

Als voor de opgelegde belasting (H_s) dezelfde wordt gehanteerd als die door Steentoets wordt berekend, dan wordt in feite de veiligheid bepaald die impliciet bij de afregeling van Steentoets is opgenomen. Dat resulteert in een betrouwbaarheid van 0,83 voor de zuilenzetting (faalkans 20%) en 0,93 voor de zetting van gekantelde blokken (faalkans 18%). De veiligheid die impliciet in het rekenmodel als gevolg van de afregeling aanwezig is, leidt voor de twee constructies dus tot een bezwijkkans, gegeven de maatgevende omstandigheden, van ca. 19%.

Als we de relatieve bijdragen aan de spreiding van Z volgens de Design Point Method (DPM) voor de zuilenzetting vergelijken met die volgens de Mean Value Approach (MVA), zie Tabel 3.1, dan blijken de verschillen niet echt groot te zijn. De parameters, die er volgens de MVA nauwelijks toe doen, hebben ook volgens de DPM geen invloed. De modelonzekerheid blijft veruit de belangrijkste onzekerheid opleveren.

Alle parameters die tezamen de leklengte bepalen (open oppervlak, inwassing, filterlaagdikte, porositeit filter en korreldiameter van het filter) hebben met elkaar gemeen dat zij geen invloed blijken te hebben.

α_j : de bijdrage van een variabele aan de onzekerheid van Z		
Parameter	MVA	DPM
Taludhelling	0,16	0,09
Open oppervlak	0,00	0,00
Dikte toplaag	0,23	0,12
Soortelijk gewicht steen	0,28	0,15
Korreldiameter inwassing	0,00	0,00
Filterlaagdikte	0,00	0,00
Porositeit filterlaag	0,00	0,00
Korreldiameter filterlaag	0,00	0,00
Modelfactor	0,87	0,95
Golfhoogte	-0,27	-0,22
Golfsteilheid	0,00	0,04
Stormduur	-0,08	-0,04

Tabel 3.1 Resultaten voor zuilenzetting, waarden van α_j voor de Mean Value Approach (MVA) en de Design Point Method (DPM).

Als we voor de zetting van gekantelde blokken de relatieve bijdragen aan de spreiding volgens de Design Point Method (DPM) vergelijken met die volgens de Mean Value Approach (MVA), zie Tabel 3.2, dan blijkt er een flinke verschuiving op te treden tussen het aandeel geleverd door parameters die betrekking hebben op de constructie en de modelfactor. De modelfactor, die al erg groot was, wint aan belang ten koste van de overige parameters, met uitzondering van de golfhoogte.

α_j : de bijdrage van een variabele aan de onzekerheid van Z		
Parameter	MVA	DPM
Taludhelling	0,05	0,03
Spleetbreedte	0,15	0,12
Dikte toplaag	0,20	0,14
Soortelijk gewicht steen	0,18	0,09
Filterlaagdikte	-0,46	-0,22
Porositeit filterlaag	-0,55	-0,28
Korreldiameter filterlaag	-0,27	-0,12
Modelfactor	0,54	0,89
Golfhoogte	-0,12	-0,15
Golfsteilheid	0,10	0,07
Stormduur	-0,00	0,00

Tabel 3.2 Resultaten voor zetting van gekantelde blokken, waarden van α_j voor de Mean Value-benadering (MVB) en de Design Point Method (DPM).

In Tabel 3.1 en Tabel 3.2 is te zien dat de α_j 's verschillende tekens hebben. Normaliter zou je voor constructie parameters verwachten dat zij bijdragen aan de sterkte en dus een positieve α_j opleveren. Maar het is ook bekend dat voor het filter niet geldt dat "meer" ook per se "beter" is: een dikker, doorlatender filter verhoogt de opwaartse druk op de toplaag. De hydraulische parameters zijn uiteraard een maat voor de belasting. Maar zij blijken op hun beurt niet allemaal een negatieve α_j op te leveren. De uitzondering betreft de golfsteilheid. Daarbij moet worden aangetekend dat het teken voor de golfsteilheid wordt bepaald door de case. Afhankelijk van de ξ -waarde van de case (groter of juist kleiner dan 2,0) zal het teken positief of negatief zijn.

Opmerkelijk lijkt de rol van het recent geïntroduceerde effect van de duurbelasting. De belastingduur heeft op de toelaatbare golfbelasting een aanzienlijk reducerend effect. In deze studie blijkt echter dat ondanks de forse onzekerheid in de stormduur ($V = 0,14$), deze onzekerheid geen of beperkte gevolgen heeft voor de veiligheid van de blokkenzetting. Het is dus wel belangrijk dat er met de belastingduur rekening wordt gehouden, maar de nauwkeurigheid van de stormduur is op zich niet zo relevant. Wat er in een specifieke case voor zorgt dat de invloed van de belastingduur niet alleen vrij klein is, maar mogelijk zelfs nihil is, is een maatgevende belastingduur die vrij lang is (bijvoorbeeld 6.000 golven). In Steentoets wordt de invloed van de belastingduur door twee factoren in rekening gebracht. Allereerst een factor waarmee de afname van de sterkte als functie van de belastingduur wordt beschreven. En ook nog een factor waarmee in rekening wordt gebracht dat bij een langere belastingduur iets hogere piekbelastingen in het golfveld voorkomen. Bij een belastingduur van ca. 6.000 golven, is de reductie van de sterkte al maximaal, waardoor een variatie in stormduur er voor de sterkte niet meer toe doet. Wat resteert, is de verandering van de grootte van de belasting door de langere belastingduur. Maar de factor die dat in rekening brengt, wijzigt bij dergelijke grote belastingduren ook nauwelijks meer.

Dit geeft aan dat als er effecten buiten beschouwing gelaten zijn bij het onderzoek en de modellering, dat dan de berekende waarden toch mogelijk niet, dan wel minder, veilig zijn dan gedacht. De probabilistische berekeningswijze is weliswaar een geavanceerde methode, maar hij weegt slechts de invloeden die deel uitmaken van de modellering. Niet gemodelleerde zaken worden slechts meegenomen voor zover zij zorgen voor verschillen tussen de metingen in de Deltagoot en berekende sterkte. Deze verschillen hebben de hoogte van de onzekerheid in de modelfactor bepaald.

Overigens dient bedacht te worden dat ook in de modelfactor al een deel van de uitvoeringsnauwkeurigheid van de constructies in de Deltagoot is opgenomen. In beperkte mate kan er dus sprake zijn van het dubbel in rekening brengen van bepaalde onzekerheden. Namelijk éénmaal expliciet voor de betreffende parameter en éénmaal impliciet in de modelfactor. Per saldo hoeft hier niet al te zwaar aan te worden getild, en wel om de volgende redenen. De onzekerheid in het merendeel van de parameters speelt niet echt een grote rol, terwijl de onzekerheid in de ontwerpfase over hoe de constructie zal worden uitgevoerd een ook niet onbelangrijke bijdrage aan de diverse parameters levert. De constructies gerealiseerd in de Deltagoot zijn toch in het laboratorium gemaakt, al is de schaal vrij groot. De uitvoeringsnauwkeurigheid zal daarom naar verwachting wat groter zijn dan die in de praktijk gebruikelijk is.

Het feit dat de modelfactor verreweg de grootste bijdrage aan de onzekerheid van de Z -functie levert, geeft te denken. De schematisatie waarop het rekenmodel is gebaseerd beschrijft kennelijk niet al te nauwkeurig de situatie waarbij uiteindelijk bezwijken optreedt. Op

zich valt daar wat voor te zeggen. Er wordt bijvoorbeeld gerekend met een bepaalde inwassing gekarakteriseerd door een karakteristieke korreldiameter en een porositeit. Deze waarden zijn gebaseerd op een normale ingewassen voeg. In de loop van een bezwijkproef blijkt echter een (groot) deel van de inwassing uit de voegen te spoelen. De waarden waarmee voor de inwassing wordt gerekend, zijn dus in ieder geval niet representatief voor de fase net voor falen. Iets vergelijkbaars geldt voor het filter: toplaaginstabiliteit treedt veelal pas op nadat de toplaag in een eerder stadium al wat in beweging is gekomen. De eigenschappen van het filter zullen daardoor mogelijk al wezenlijk veranderd zijn.

De aanpak die is gevolgd voor het vaststellen van de modelonzekerheid is wetenschappelijk gezien uiterst zwak: alle proefresultaten zijn gebruikt voor het afregelen van het rekenmodel. Wetenschappelijk gezien zou het juist zijn geweest om slechts een deel te gebruiken voor het afregelen, waarna op basis van het nog niet gebruikte deel de kwaliteit (onzekerheid) van het rekenmodel kan worden vastgesteld. Aangezien de grootschalige bezwijkproeven relatief duur zijn, is het niet verkoopbaar meer proeven te doen, of een groot deel van de proeven feitelijk niet te gebruiken om goede trends vast te stellen.

Nu is de modelonzekerheid gebaseerd op dezelfde set gegevens als waarop het rekenmodel is afgeregeld. Het feit dat de invloed van de aldus gekwantificeerde modelonzekerheid nog verhoudingsgewijs groot is ten opzichte van de andere onzekerheden, geeft aan dat in ieder geval het aantal vrijheidsgraden bij de fit van het rekenmodel groot was ten opzichte van het aantal fitparameters.

β	Kans [%]	Oorsprong
1,64	5	Referentie, blokken DPM, zuilen DPM
2,17	1,5	blokken MVA
2,74	0,3	zuilen MVA

Tabel 3.3 Combinaties van betrouwbaarheid β en kans die in deze rapportage een rol spelen.

4 Veiligheidscoëfficiënten

Volgens de regels die in de bouw al de nodige jaren van kracht zijn (van TGB 1985 tot Eurocodes) is het gebruikelijk om sterkteberekeningen uit te voeren met partiële veiligheidsfactoren. Bij die aanpak worden karakteristieke of representatieve waarden voor de belastingsparameters met partiële veiligheidsfactoren vermenigvuldigd, de zogenaamde belastingsfactoren, en de sterkte parameters door de partiële veiligheidsfactoren gedeeld, de zogenaamde materiaalfactoren. Die methodiek is in feite een niveau I berekening, waarvan de niveaus van de partiële veiligheidsfactoren meestal zijn onderbouwd met de resultaten van niveau II berekeningen.

Voor steenzettingen op waterkeringen is tot op heden nooit zo expliciet rekening gehouden met onzekerheden. Een veiligheidsfactor, laat staan materiaal- en belastingsfactoren zijn tot op heden nooit gebruikt. Tot voor kort werd er conform het TR Steenzettingen altijd gerekend met “veilige waarden”, terwijl in het rekenmodel ook wat veiligheid besloten zat.

Veiligheidscoëfficiënten voor een niveau I berekening kunnen worden bepaald als het design point uit een niveau II berekening bekend is. Voor een sterktecomponent R_j is de redenering daarbij de volgende. De sterkte in de niveau I berekening wordt gegeven door:

$$R_{kar,j} = \mu(R_j) - k_j \sigma(R_j) \quad (4.1)$$

Waarin:

k_j de vermenigvuldigingsfactor voor de spreiding in gebruik bij het berekenen van de karakteristieke of representatieve waarde voor parameter j [-].

Deze sterkte wordt, voordat deze wordt vergeleken met de belasting, gedeeld door de partiële veiligheidscoëfficiënt $\gamma_{m,j}$, de materiaalfactor. Bedenken we dat het design point wordt beschreven met: $R_j^* = \mu(R_j) - \alpha_{R_j} \beta \sigma(R_j)$, dan volgt de materiaalfactor uit:

$$\gamma_{m,j} = \frac{\mu(R_j) - k_j \sigma(R_j)}{\mu(R_j) - \alpha_{R_j} \beta \sigma(R_j)} = \frac{1 - k_j V(R_j)}{1 - \alpha_{R_j} \beta V(R_j)} \quad (4.2)$$

Op vergelijkbare wijze kan de belastingfactor worden bepaald. Aangezien er altijd met de belastingfactor wordt vermenigvuldigd, is deze in formulevorm de reciproque van een materiaalfactor. Maar als voor belastingparameters wordt gerekend met een karakteristieke bovengrens is k_j voor de belastingparameters kleiner dan 0. De belastingfactor wordt gegeven door:

$$\gamma_{s,j} = \frac{\mu(S_j) - \alpha_{S_j} \beta \sigma(S_j)}{\mu(S_j) - k_j \sigma(S_j)} = \frac{1 - \alpha_{S_j} \beta V(S_j)}{1 - k_j V(S_j)} \quad (4.3)$$

Daarnaast bestaat er nog de modelfactor, waarmee (extra) veiligheid in het rekenmodel kan worden gebracht. Een modelfactor (m) gelijk aan 1,0 betekent dat het rekenmodel de verwachtingswaarde van de bezwijkgolffhoogte met 22% voor zuilen of 35% voor blokken

overschat, uitgaande van verwachtingswaarden van de relevante parameters. Dit komt omdat in Steentoets momenteel, als gevolg van de wijze van afregelen, al een marge aanwezig is tussen de berekende golfhoogte en de gemiddelde bezwijkhoogte: m_0 met de waarde 1,22 voor geklemde zettingen en 1,35 voor niet-geklemde zettingen.

Omdat deze m_0 geen stochastische invoerwaarde of modelfactor is en voor alle parameters in de berekeningen wordt uitgegaan van de verwachtingswaarden, geldt dus $k_j = 0$ voor alle stochasten j .

Sterkteparameter	$\beta^* = 1,64$ γ_m	+/-	Belastingparameter	$\beta^* = 1,64$ γ_s	+/-
Taludhelling	1,010	+	Stormduur	1,010	-
Open oppervlak	1,000	0	Golfhoogte	1,018	-
Dikte toplaag	1,006	+			
Soortelijk gewicht steen	1,005	+	Korrel diameter inwassing	1,000	0
			Filterlaagdikte	1,000	0
Golfsteilheid	1,004	+	Porositeit filterlaag	1,000	0
Modelfactor*	1,191	+	Korrel diameter filter	1,000	0

Tabel 4.1 Partiële factoren voor zuilenzetting (* γ uitgaande van het ontwerppunt behorende bij de impliciet al in Steentoets aanwezige veiligheid: $m_0 = 1,22$ en een extra marge van 1,248)

In Tabel 4.1 worden **voor de zuilenzetting** de partiële factoren γ_m en γ_s gegeven behorende bij het ontwerppunt gebaseerd op Steentoets uitgaande van verwachtingswaarden voor alle parameters behalve de golfhoogte (H_s), die is zodanig gekozen dat de kans op bezwijken 5% is ($\beta = 1,64$). Afgezien van de modelfactor, zijn daar geen factoren voor nodig die significant van 1 afwijken.

Op zich is dat niet onlogisch omdat eerder is geconstateerd dat voor de zuilenzetting de onzekerheid van de modelfactor veruit dominant is (zie Tabel 3.1). Het ligt dus voor de hand om voor deze case alles in één en dezelfde factor onder te brengen. In het vorige hoofdstuk is al geconstateerd dat door een veiligheidsfactor van 1,25 te hanteren naast de impliciet in Steentoets aanwezige veiligheid dat een faalkans van ca. 5% wordt verkregen. Voor alle overige parameters wordt daarbij uitgegaan van de gemiddelde waarden.

In Tabel 4.2 worden **voor de blokkenzetting** de partiële factoren γ_m en γ_s gegeven behorende bij het ontwerppunt met een faalkans van 5% ($\beta = 1,64$). Daarbij is uitgegaan van de verwachtingswaarden voor alle parameters. Het valt op dat voor dit type constructie, waarvan bekend was dat de spleetbreedte een heel belangrijke rol speelt, dat de onzekerheid in de modelfactor toch veruit de grootste partiële factor vereist.

Als we net als bij de zuilenzettingen alles in één overall veiligheidsfactor (modelfactor m) willen verdisconteren, dan kan dat door, naast de impliciet in Steentoets aanwezige veiligheid, een veiligheidsfactor van 1,30 te hanteren (zie vorige hoofdstuk). Concreet betekent dit dat, om een faalkans van ca. 5% te verkrijgen, dat de met Steentoets2010 berekende toelaatbare golfhoogte gedeeld moet worden door 1,3 als wordt uitgegaan van gemiddelde waarden voor alle parameters.

Sterkteparameter	$\beta^* = 1,64$ γ_m	+/-	Belastingparameter	$\beta^* = 1,64$ γ_s	+/-
Taludhelling	1,004	+	Stormduur	1,000	-
Spleetbreedte	1,079	+	Golfhoogte	1,010	-
Dikte toplaag	1,007	+			
Soortelijk gewicht steen	1,003	+	Filterlaagdikte	1,072	-
			Porositeit filterlaag	1,066	-
Golfsteilheid	1,006	+	Korrel diameter filter	1,023	-
Modelfactor*	1,116	+			

Tabel 4.2 Partiële factoren voor blokkenzetting (* γ uitgaande van het ontwerp punt behorende bij de impliciet al in Steentoets aanwezige veiligheid: $m_0 = 1,35$ en een extra marge van 1,3)

Opgemerkt dient te worden dat voor de spleetbreedte, zoals voor alle parameters, is uitgegaan van een normale verdeling. Aangezien een spleetbreedte kleiner dan 0,0 uiteraard niet mogelijk is, zou het in ieder geval theoretisch correcter geweest zijn om een andere verdeling te kiezen. Maar aangezien de waarde 0,0 pas wordt bereikt bij een $\mu - 2,72 \sigma$ (0,33% overschrijdingskans) blijven de waarden gezien de gewenste kansen nog een flink stuk van de 0,0. De benadering met de normale verdeling is dus zondermeer acceptabel. Het ontwerp punt bij $\beta = 1,64$ ligt voor de spleetbreedte op ca. 3,4 mm wat neerkomt op een $\mu - 0,20 \sigma$ -waarde.

Omdat er bij de afregeling van Steentoets al onderscheid is gemaakt tussen geklemde zettingen (zuilenzetting) en niet-geklemd zettingen (blokken op hun kant gezet) blijkt er slechts een gering verschil tussen de benodigde veiligheid voor blokken (1,3) en zuilen (1,25). Omdat er slechts een beperkt aantal voorbeeldconstructies is geëvalueerd is het verstandig de grootste gevonden factor naar boven toe af te ronden. Het ligt daarom voor de hand om, naast de impliciet al in Steentoets aanwezige veiligheid, slechts een enkele overall veiligheidfactor te hanteren: 1,3. Er kan dan worden gerekend met de verwachtingswaarden voor alle parameters.

5 Conclusies en aanbevelingen

Uitgaande van een dijkvakbenadering is het mogelijk gebleken door een probabilistische aanpak de conditionele bezwijkkans van steenzettingen vast te stellen.

Bij de bepaling van de representatieve invoerparameters is specifiek voor de case met de op hun kant geplaatste betonblokken de nodige aandacht geweest voor reële waarden voor de spleetbreedte. Die spleetbreedtes bleken in de praktijk aanzienlijk groter dan waar tot op heden mee werd gerekend (ontwerpen in Zeeland). Door uit te gaan van de minder conservatieve waarden voor de spleetbreedtes blijkt de extreme gevoeligheid voor variaties in de spleetbreedte niet meer dominant. De modelonzekerheid blijkt bepalend voor de totale onzekerheid.

De probabilistische analyse volgens de gemiddelde waarde benadering (Mean Value Approach: niveau II, klasse 1) geeft voor een standaard zuilenzetting voor wat betreft de gevoeligheden nauwelijks een vertekend beeld: de resultaten wijken maar in beperkte mate af van de waarden verkregen met de nauwkeuriger methode die het ontwerppunt bepaalt (Design Point Method: niveau II, klasse 2). De berekende faalkans gaat wel van 0,3 % voor de MVA omhoog naar 5% voor de nauwkeuriger DPM.

De vergelijking tussen de klasse 1 en de klasse 2 berekening voor een zetting van gekantelde blokken laat een grotere verschuiving in gevoeligheden zien.

De veiligheid die impliciet in Steentoets is opgenomen als gevolg van de afregeling op de resultaten van Deltagootproeven, vertaalt zich voor de (geklemde) zuilenzettingen vrijwel hetzelfde als voor de (niet-geklemde) blokkenzettingen. Voorbeeldberekeningen voor een standaard zuilenzetting leverde vrijwel dezelfde bezwijkkans (ca. 19%) als voor de zetting van gekantelde blokken (klasse 2 berekening).

De impliciete veiligheid, die opgenomen is in Steentoets bij de afregeling op de Deltagoot-resultaten, blijkt dus niet voldoende om aan de gebruikelijke eisen te voldoen.

Doordat meer berekeningen zijn uitgevoerd dan gerapporteerd is duidelijk geworden dat de aannamen voor onzekerheden de antwoorden in absolute zin kunnen laten verschuiven. De waarden voor de faalkans die zijn berekend, moeten daarom niet als absolute waarden worden opgevat. De keuze van voorbeeldconstructies en aannamen van de spreidingen van de cruciale parameters (hoge α_j -waarden) zijn mede bepalend voor het eindantwoord.

Om het ontwerp van betonzuilenzettingen en betonblokkenbekledingen een voldoende hoog veiligheidsniveau te geven, kan in Steentoets2010 worden gerekend met verwachtingswaarden voor alle parameters in combinatie met een overall-veiligheidscoëfficiënt op de belasting (golfhoogte). De aanbevolen veiligheidscoëfficiënt bedraagt 1,3.

Beide gebruikte cases betreffen betonelementen. Die klasse bekledingen kennen een relatief geringe variatie in toplaagdikte.

Vanwege de grotere variatie in dikte van de toplaagelementen, moet overwogen worden om voor zettingen van natuursteenelementen een extra materiaalfactor voor de toplaagdikte op te nemen. Dit geldt vooral voor slecht geklemde bekledingstypen. Bij andere materialen dan beton van één en dezelfde partij, waarvoor deze studie is uitgevoerd, dient ook te worden gecontroleerd of de spreiding in de dichtheid in grote lijnen overeenkomt met de in deze studie aangenomen waarde.

Het dient overwogen te worden om de werkelijke veiligheid van het ontwerp van steenzettingen met Steentoets2010 in Zeeland vast te stellen met de klasse 2 methode. Daarbij kan worden meegewogen dat er gemiddeld een extra toplaagdikte van ca. 2,5 cm wordt aangebracht doordat de benodigde laagdikte wordt afgerond naar de eerst grotere standaard zuillengte (relatief veilig), en dat de gerealiseerde taludhellingen afwijken van de in het ontwerp aangehouden taludhellingen (relatief onveilig).

Als Steentoets opnieuw wordt afgeregeld op de Deltagootproeven verdient het aanbeveling de modelonzekerheid opnieuw vast te stellen en na te gaan of de in dit rapport geadviseerde veiligheidsfactor moet worden bijgesteld.

Overwogen moet worden om de volgende Steentoets-versie af te regelen zodanig dat het gemiddelde correct wordt beschreven (geen impliciet in Steentoets opgenomen veiligheid). Voor zowel Toetsing als voor het ontwerp dient er dan een (hogere) veiligheidsfactor te worden gebruikt.

Vervangen dan wel aanpassen van het Technisch Rapport Steenzettingen aan de nieuwe rekenmethodiek is wenselijk, omdat toepassing van Steentoets met de aanbevelingen uit het TR tot een onduidelijke mate van veiligheid van het ontwerp leidt.

Literatuur

- [1] Ministerie van Verkeer en Waterstaat: *Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen, (VTV2006)*. (ISBN 978-90-396-5762-5), Den Haag, september 2007.
- [2] Ministerie van Verkeer en Waterstaat: *Hydraulische Randvoorwaarden 2006 voor het toetsen van primaire waterkeringen, (VTV2006)* (ISBN 978-90-396-5761-8), Den Haag, september 2007.
- [3] D.J. Peters: *Veiligheidsbeschouwing Steentoets2008, Bepaling veiligheidsfactoren*. Opgenomen als Bijlage C in: M. Klein Breteler, *Validatie Steentoets2008, Onderzoeksprogramma Kennis-leemtes Steenbekledingen*. Rapport. Deltares, H4846, februari 2009.
- [4] TAW: *Grondslagen voor waterkeren*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (ISBN 90396-373-5-3), A.A. Balkema Uitgevers b.v., Rotterdam, januari 1998.
- [5] TAW: *Leidraad Kunstwerken*. (ISBN 90-396-5544-0), Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Delft, Mei 2003.
- [6] M. Klein Breteler, W.G. de Rijke: *Taludbekledingen van gezette steen, veiligheidsfilosofie*. Waterloopkundig laboratorium|WL, H0192, oktober 1991.
- [7] M. Klein Breteler, *Documentatie Steentoets2008, Kennisleemtes Steenbekledingen*. Rapport v64. Deltares, H4846, juni 2009.
- [8] TAW: *Technisch Rapport Steenzettingen*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen In 3 delen: Ontwerp, Toetsing en Achtergronden, (ISBN 90-369-5551-3), RWS-DWW-2003-097, december 2003.
- [9] A.C.W.M. Vrouwenvelder, J.K. Vrijling: *Probabilistisch ontwerpen. Collegedictaat b3*. Faculteit der Civiele Techniek, 5e herdruk 1987.
- [10] RWS-DZ-PBZ: *Handleiding Ontwerpen Dijkbekledingen, Technische werkwijze van het Projectbureau Zeeweringen*. Versie 19 december 2006.
- [11] W. van Beijen: *Marges in het ontwerpproces*. Memo nr. PZDT-M-04-020 ONTW. RWS-PBZ, 18 februari 2004.
- [12] G. Wolters, M Klein Breteler: *Stabiliteit van steenzetting met blokken op hun kant, grootschalig onderzoek in Deltagoot*. Rapport H4941, w|delft hydraulics, oktober 2007.

A Toelichting bij tabellen betreffende niveau II berekeningen

De in liggend-formaat opgenomen tabellen met niveau II berekeningen (tabellen in bijlage B en C) illustreren welke berekeningen er met Steentoets2010 zijn uitgevoerd. Welke invoerparameters er zijn gebruikt en wat de uitkomst van de verschillende berekeningen is. En ten slotte laten zij zien hoe uit die resultaten een verwachtingswaarde en spreiding is afgeleid. In totaal presenteert zo een tabel de resultaten van een flink aantal afzonderlijke Steentoets2010-berekeningen. Voor de klasse 1-berekening gaat het om ca. 10 ($= j - 1$) berekeningen, voor de klasse 2 berekeningen met 5 à 6 iteraties om ca. 50 tot 60 berekeningen.

Als voorbeeld voor een Niveau II, **klasse 1-berekening** wordt Tabel B.1 behandeld. In de tabel zijn de relevante parameters 1 t/m 13 in de kop van de tabel weergegeven. Zoals uitgelegd is in het tekstkader op pagina 14, is de invloed van de porositeit van het inwasmateriaal verwerkt in de D_{15} van het inwasmateriaal waardoor deze parameter in de tabel (kolom met nummer 6) achterwege is gelaten. In totaal zijn er dus 12 relevante parameters opgenomen in de tabel.

De tabel opent met een kolom genummerd "0", waarin de resultaten staan van de berekening zonder afwijking op een van de parameters. Voor de klasse 1 berekening (Tabel B.1) betreft dit een berekening met verwachtingswaarden voor de betreffende parameters, voor de klasse 2 berekening (Tabel C1) is het een berekening voor het zogenaamde "ontwerppunt".

De rij genummerd 1 vermeldt voor alle parameters de verwachtingswaarde die in de Steentoets2010-berekeningen is gebruikt. Voor de modelfactor ($j = 10$) is dit eigenlijk een wat triviale waarde (1,0), omdat de offset als gevolg van het afregelen van Steentoets is opgenomen in een aparte parameter m_0 (geen stochast). In de rij 2 geeft elke kolom een spreiding die is gebruikt in de berekening die in die kolom is gerapporteerd. De berekening in kolom j is namelijk uitgevoerd met de $\mu_j + \sigma_j$ -waarde, die in rij 3 vermeld staat, voor parameter j en voor alle overige parameters de verwachtingswaarde. Het Steentoets2010-resultaat staat voor alle berekeningen vermeldt in rij 4. Dit resultaat betreft de significante golfhoogte waarbij de bekleding volgens de berekening bezwijkt. Alleen in kolom 10 (modelfactor m), en kolom 11 (significante golfhoogte H_s), wordt geen berekeningsresultaat vermeldt. Hiervoor zijn namelijk geen Steentoets berekeningen uitgevoerd, omdat de waarde van de faalfunctie direct, uit de invoer en het resultaat in kolom 0, kan worden bepaald.

Rij 5 vermeldt de waarde van de faalfunctie die bij die berekening hoort. Voor kolom 0 volgt die uit het erboven vermelde Steentoets-resultaat en de waarde van de factor m_0 : $Z_0 = R_0 \{1 - 1 / (m \cdot m_0)\}$. Het is immers de factor m_0 die aangeeft hoeveel het Steentoets-resultaat boven de verwachtingswaarde voor de bezwijkgolffoogte ligt.

Voor de meeste ander kolommen volgt die waarde uit de som van enerzijds de Z -waarde uit kolom 0 en anderzijds het verschil tussen het berekeningsresultaat R in kolom i en kolom 0. Uitzonderingen daarop zijn kolom 10 en 11. Voor kolom 10 wordt de Z -waarde bepaald door de $\mu + \sigma$ -waarde van de modelfactor: $Z_{10} = R_0 \{1 - 1 / [m_0 (\mu_m + \sigma_m)]\}$. De Z -waarde voor kolom 11 is de berekende verwachtingswaarde van de bezwijkgolffoogte (R_0) minus het quotiënt van de $\mu + \sigma$ -waarde van de belasting en de verwachtingswaarde van de modelfactor maal de afregelfactor $Z_{10} = R_0 - (R_0 + \sigma_{R_0}) / [m_0 (\mu_m + \sigma_m)]$.

Rij 6 geeft de numerieke benadering van de partiële afgeleide van de Z -functie. Deze wordt verkregen door de verandering van de Z -waarde ($Z_j - Z_0$) te delen door de verandering van de

parameter j : σ_j (in een aantal van de berekeningen met gekantelde blokken is als afwijking van de spleetbreedte $-\sigma_s$ gebruikt, omdat bekend is dat de gevoeligheid toeneemt bij kleinere waarden van de spleetbreedte).

Opvallend is dat er diverse malen een waarde 0,000 is berekend. Dat kan betekenen dat de betreffende parameter volgens de berekening totaal geen invloed heeft, bijvoorbeeld omdat de berekende stabiliteit zodanig hoog is dat het afkapcriterium maatgevend is. Als de invloed van een parameters relatief gering is, is het echter ook mogelijk dat exact dezelfde waarde wordt berekend omdat de iteraties binnen Steentoets discrete stappen kennen. De resolutie van de berekeningen is dan te grof om kleine invloeden zichtbaar te maken.

De verwachtingswaarde van de Z -functie (rij 7: μ_Z) is voor de klasse 1 berekening niets anders dan de Z -functie berekend uitgaande van Steentoets-uitkomst gebaseerd op verwachtingswaarden voor alle parameters (Z_0).

In rij 8 wordt in kolom 0 de spreiding in de waarde van de Z -functie gegeven (σ_Z), die berekend is met de opgenomen formule. In de overige kolommen is de waarde gegeven voor de zogenaamde "importance factor", een maat voor de bijdrage van de onzekerheid in die variabele aan de onzekerheid in Z . In formulevorm: $\alpha_j = \frac{\delta Z}{\delta x_j} \cdot \frac{\sigma_j}{\sigma_Z}$ (A.1)

In het tekstblok op pagina 20 van de hoofdtekst wordt nader ingegaan op de importance factor. Deze factor dient niet te worden verward met de in rij 9 gepresenteerde factor Γ_j die staat voor de relatieve bijdrage aan de spreiding. In formulevorm:

$$\Gamma_j = \left(\frac{\delta Z}{\delta x_j} \right)^2 \cdot \frac{\sigma_j^2}{\sigma_Z^2} = \alpha_j^2 \quad (\text{A.2})$$

Voor de **klasse 2 berekeningen**, zie bijvoorbeeld Tabel C.1, worden alleen de gegevens van de laatste iteratiestap gepresenteerd. Veelal gaat er aan die laatste stap 5 of 6 iteraties vooraf, waarvan een klasse 1 berekening de eerst stap is. Rij 1 presenteert de waarden voor de verschillende parameters in het iteratief bepaalde ontwerppunt. Rij 2 geeft de spreiding voor de in de kop van de kolom genoemde parameters. Rij 3 geeft voor de betreffende parameters de waarde in het ontwerppunt + $1 \cdot \sigma_j$. Rij 4 geeft in kolom 0 de volgens Steentoets2010 toelaatbare golfhoogte in het ontwerppunt; in de overige kolommen $j = 1 \dots 13$ staan de met Steentoets berekende waarden behorende bij de variatieberekening uitgaande van het ontwerppunt maar met voor parameter j de in rij 3 gegeven parameterwaarde. De waarden in rij 5 en 6 worden berekend als bij de klasse 1 berekening.

In tegenstelling tot de klasse 1 berekening wordt de verwachtingswaarde voor de Z -functie (rij 7) nu gegeven door:

$$\mu_Z = Z_0 + \sum_{j=1}^{13} \left(\frac{\delta Z}{\delta x_j} \cdot (\mu_j - \{\mu_j + (1 - \alpha_j \beta) \sigma_j\}) \right) \quad (\text{A.3})$$

Zoals bekend is, moet het ontwerppunt op de bezwijkgrens liggen. Eigenlijk moet de Z -functie in het ontwerppunt dus gelijk zijn aan 0,0. In Tabel C.1 (kolom 0, rij 5) blijkt de Z -functie in het iteratief bepaalde ontwerppunt gelijk te zijn aan 0,009. Dat is nihil gezien de rekennauwkeurigheid van Steentoets2010.

De resultaten opgenomen in rij 8 en 9 worden bij de klasse 2 berekening op dezelfde manier berekend uit de eerdere resultaten als bij een klasse 1 berekening.

B Resultaten berekeningen niveau II klasse 1

j Parameter Eenheid Volgnummer, symbool	0	1 n [-]	2 Ω [%]	3 D [m]	4 ρ_s [kg/m ³]	5 D_{15} [mm]	7 b [m]	8 n_f [-]	9 D_{f15} [mm]	10 m [-]	11 H_s [m]	12 s_{0p} [-]	13 N [-]
1 μ_j		3,5	13	0,35	2300	6,0	0,10	0,35	15,2	1,0	1,926	0,04	5467
2 σ_j		0,25	1,8	0,01	46	2,0	0,02	0,05	0,9	0,154	0,1	$2 \cdot 10^{-3}$	782
3 $\mu_j + \sigma_j$		3,75	14,8	0,36	2346	8	0,12	0,40	16,1	1,154	2,026	0,042	6249
4 $R(\mu_i, \mu_j + \sigma_j)$ [m]	2,404	2,453	2,404	2,473	2,489	2,404	2,404	2,404	2,404			2,404	2,380
5 Z [m]	0,825	0,874	0,825	0,894	0,910	0,825	0,825	0,825	0,825	1,088	0,743	0,825	0,801
6 $\frac{\delta Z}{\delta x_j}$		0,195	0,000	6,87	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	1,32	-0,82	0,00	0,000
7 μ_z [m]	0,825												
8 $\sigma_z = \sqrt{\sum_{j=1}^{13} \left(\left(\frac{\delta Z}{\delta x_j} \right)^2 \cdot \sigma_j^2 \right)}$ (α_j)	0,30	(0,16)	(0,0)	(0,23)	(0,28)	(0,00)	(0,00)	(0,00)	(0,00)	(0,87)	(-0,27)	(0,00)	(-0,08)
9 Γ_j		0,03	0,00	0,05	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,76	0,07	0,00	0,01

Tabel B.1 Resultaten van de niveau II klasse 1 berekening (MVA), case betonzuilenzetting op zeedijk

Uitgaande is van de impliciet in Steentoets2010 aanwezige onzekerheid ($m_0 = 1,22$) en een extra factor (1,248) tussen de opgelegde randvoorwaarde en toelaatbare randvoorwaarde volgens de Steentoetsberekening (voor een toelichting op symbolen en de berekening zie Bijlage A) $\beta = \mu_z / \sigma_z = 2,74$

j	0	1	2	3	4	7	8	9	10	11	12	13
Parameter		n	s	D	ρ_s	b	n_f	D_{f15}	m	H_s	s_{0p}	N
Eenheid		[-]	[mm]	[m]	[kg/m ³]	[m]	[-]	[mm]	[-]	[m]	[-]	[-]
Volgnummer, symbool												
1 μ_j		3,5	3,65	0,50	2300	0,10	0,35	5,2	1,0	2,341	0,04	5441
2 σ_j		0,25	-1,34*	0,015	46	0,02	0,05	0,6	0,231	0,1	$2 \cdot 10^{-3}$	777
3 $\mu_j + \sigma_j$		3,75	2,31	0,515	2346	0,12	0,40	5,8	1,231	2,441	0,042	6218
4 $R(\mu_i, \mu_j + \sigma_j)$ [m]	3,044	3,074	2,954	3,166	3,151	2,767	2,712	2,879			3,105	3,044
5 Z [m]	1,309	1,340	1,220	1,432	1,417	1,032	0,978	1,145	1,635	1,235	1,371	1,309
6 $\frac{\delta Z}{\delta x_j}$		0,122	0,067	8,2	0,002	-13,8	-6,6	-0,27	1,41	-0,74	30,6	0,000
7 μ_z [m]	1,31											
8 $\sigma_z = \sqrt{\sum_{j=1}^{13} \left(\left(\frac{\delta Z}{\delta x_j} \right)^2 \sigma_j^2 \right)}$ (α_j)	0,60	(0,05)	(0,15)	(0,20)	(0,18)	(-0,46)	(-0,55)	(-0,27)	(0,54)	(-0,12)	(0,10)	(-0,00)
9 Γ_j		0,00	0,02	0,04	0,03	0,21	0,30	0,07	0,29	0,02	0,01	0,00

Tabel B.2 Resultaten van de niveau II klasse 1 berekening (MVA), case zetting van gekantelde blokken op zeedijk

Uitgegaan is van de impliciet in Steentoets aanwezige onzekerheid ($m = 1,35$) en een extra factor (1,3) tussen de opgelegde randvoorwaarde en toelaatbare randvoorwaarde volgens de Steentoetsberekening (voor een toelichting op symbolen en de berekening zie Bijlage A) $\beta = \mu_z / \sigma_z = 2,17$

* Voor de spleetbreedte is voor de variatie-berekening gewerkt met $-\sigma_s$.

C Resultaten berekeningen niveau II klasse 2

j	0	1	2	3	4	5	7	8	9	10	11	12	13
Parameter		<i>n</i>	Ω	<i>D</i>	ρ_s	<i>D</i> ₁₅	<i>b</i>	<i>n_f</i>	<i>D</i> _{f15}	<i>m</i>	<i>H_s</i>	<i>s</i> _{0p}	<i>N</i>
Eenheid		[-]	[%]	[m]	[kg/m ³]	[mm]	[m]	[-]	[mm]	[-]	[m]	[-]	[-]
Volgnummer, symbool													
1 $\mu_j - \alpha_j \beta \sigma_j$		3,46	13,0	0,348	2289	6,00	0,10	0,350	15,2	0,688	1,96	0,040	5521
2 σ_j		0,25	1,8	0,01	46	2,0	0,02	0,05	0,9	0,2	0,1	2.10 ⁻³	782
3 $\mu_j + (1 - \alpha_j \beta) \sigma_j$		3,71	14,8	0,358	2334	8,00	0,12	0,400	16,1	0,888	2,06	0,042	6303
4 $R(\mu_i - \alpha_i \beta, \mu_j + (1 - \alpha_j \beta) \sigma_j)$ [m]	2,345	2,393	2,345	2,413	2,429	2,345	2,345	2,345	2,345			2,369	2,322
5 <i>Z</i> [m]	0,009	0,056	0,009	0,076	0,092	0,009	0,009	0,009	0,009	0,535	-0,111	0,032	-0,015
6 $\frac{\delta Z}{\delta x_j}$		0,19	0,000	6,740	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	2,63	-1,19	11,8	0,00
7 μ_z [m]	0,909												
8 $\sigma_z = \sqrt{\sum_{j=1}^{13} \left(\left(\frac{\delta Z}{\delta x_j} \right)^2 \cdot \sigma_j^2 \right)}$ (α_j)	0,553	(0,09)	(0,00)	(0,12)	(0,15)	(0,00)	(0,00)	(0,00)	(0,00)	(0,95)	(-0,22)	(0,04)	(-0,04)
9 Γ_j		0,01	0,0	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,90	0,05	0,00	0,00

Tabel C.1 Resultaten van de niveau II klasse 2 berekening (DPM), case betonzuilenzetting op zeedijk.

Uitgaan is van de impliciet in Steentoets aanwezige onzekerheid ($m_0 = 1,22$) en een extra factor (1,248) tussen de opgelegde randvoorwaarde en toelaatbare randvoorwaarde volgens de Steentoetsberekening (voor een toelichting op symbolen en de berekening zie Bijlage A) $\beta = \mu_z / \sigma_z = 1,64$

Volgnummer, symbol	0	1 <i>n</i> [-]	2 <i>s</i> [mm]	3 <i>D</i> [m]	4 ρ_s [kg/m ³]	7 <i>b</i> [m]	8 <i>n_f</i> [-]	9 <i>D_{f15}</i> [mm]	10 <i>m</i> [-]	11 <i>H_s</i> [m]	12 <i>s_{0p}</i> [-]	13 <i>N</i> [-]
1 $\mu_j - \alpha_j \beta \sigma_j$		3,49	3,38	0,497	2293	0,108	0,373	5,35	0,667	2,37	0,040	5441
2 σ_j		0,25	-1,34*	0,015	46	0,02	0,05	0,6	0,231	0,1	2.10 ⁻³	777
3 $\mu_j + (1 - \alpha_j \beta) \sigma_j$		3,74	2,04	0,512	2339	0,128	0,423	5,95	0,898	2,47	0,042	6218
4 $R(\mu_i - \alpha_i \beta, \mu_j + (1 - \alpha_j \beta) \sigma_j)$ [m]	2,632	2,658	2,540	2,738	2,698	2,465	2,416	2,540			2,685	2,632
5 <i>Z</i> [m]	0,004	0,03	-0,09	0,11	0,07	-0,16	-0,21	-0,09	0,68	-0,11	0,06	0,004
6 $\frac{\delta Z}{\delta x_j}$		0,11	0,07	7,1	0,001	-8,4	-4,3	-0,15	2,9	-1,11	26,5	0,000
7 μ_z [m]	1,25											
8 $\sigma_z = \sqrt{\sum_{j=1}^{13} \left(\left(\frac{\delta Z}{\delta x_j} \right)^2 \sigma_j^2 \right)}$ (α_j)	0,762	(0,03)	(0,12)	(0,14)	(0,09)	(-0,22)	(-0,28)	(-0,12)	(0,89)	(-0,15)	(0,07)	(0,00)
9 Γ_j		0,00	0,01	0,02	0,01	0,05	0,08	0,01	0,79	0,02	0,00	0,00

Tabel C.2 Resultaten van de Niveau II klasse 2 berekening (DPM), case zetting van gekantelde blokken op zeedijk

Uitgegaan van de impliciet in Steentoets aanwezige onzekerheid ($m = 1,35$) en een extra factor (1,3) tussen de opgelegde randvoorwaarde en toelaatbare randvoorwaarde volgens de Steentoetsberekening (voor een toelichting op symbolen en tabel zie Bijlage A) $\beta = \mu_z / \sigma_z = 1,64$

* Voor de spleetbreedte is voor de variatie-berekening gewerkt met $-\sigma_s$.

D Afleiding waarden voor de modelfactoren uit metingen

Aan tabel 19 en 20 uit [3] ontleende gegevens zijn voor niet-gekleemde zettingen (blokken) en goed gekleemde zettingen (ingewassen zuilenzettingen) overgenomen in onderstaande tabellen. Het gemiddelde en de spreiding van de verhouding tussen "Schade in de proef" en "Schade volgens het rekenmodel" zijn bepaald. Deze waarden karakteriseren de modelfactor voor de twee cases: de zuilenzetting en de zetting van op hun kant geplaatste betonblokken.

Schade volgens rekenmodel	Schade in de proef	Verhouding proefresultaat / resultaat rekenmodel
4,45	4,72	1,061
6,12	7,35	1,201
5,11	6,29	1,231
3,81	4,08	1,071
4,94	5,04	1,020
4,69	6,10	1,301
5,00	6,10	1,22
3,93	6,48	1,649
Gemiddelde van de verhouding		1,22
Spreiding van de verhouding		0,199

Tabel D.1 $H_s/\Delta D$ -waarde bij bezwijken volgens rekenmodel en volgens bezwijkproeven voor gekleemde zettingen

Schade volgens rekenmodel	Schade in de proef	Verhouding proefresultaat / resultaat rekenmodel
3,78	4,38	1,159
3,89	5,60	1,440
3,07	4,64	1,511
2,80	5,54	1,979
3,13	5,82	1,859
3,89	6,11	1,571
1,92	2,78	1,448
1,79	2,67	1,492
1,74	2,82	1,621
2,80	3,72	1,329
2,78	3,61	1,299
2,29	3,37	1,472
2,39	3,06	1,280
2,92	3,24	1,110
2,74	3,64	1,328
2,41	3,57	1,481
4,30	5,33	1,240
3,75	4,84	1,291
3,28	4,72	1,439
3,25	3,19	0,982
6,13	5,95	0,971

Vervolg van tabel		
Schade volgens rekenmodel	Schade in de proef	Verhouding
4,87	6,18	1,269
4,70	6,25	1,330
4,60	5,47	1,189
5,17	6,05	1,170
4,29	5,83	1,359
4,61	5,76	1,249
3,81	6,21	1,630
3,87	6,04	1,561
3,21	3,15	0,981
1,88	3,16	1,681
1,97	2,50	1,269
1,93	2,01	1,041
1,87	2,58	1,380
1,75	2,01	1,149
3,15	3,94	1,251
3,55	3,12	0,879
2,85	4,08	1,432
2,65	3,95	1,491
2,57	3,32	1,292
2,41	3,25	1,349
Gemiddelde van de verhouding		1,35
Spreiding van de verhouding		0,231

Tabel D.2 $H_s/\Delta D$ -waarde bij bezwijken volgens rekenmodel en volgens bezwijkproeven voor niet-geklemde zettingen