

## Kwantificeren onzekerheden voor de stabiliteit van steenzettingen

Voor los-blok-falen in blokkensteenzettingen



**Kwantificeren onzekerheden voor de stabiliteit van steenzettingen**  
Voor los-blok-falen in blokkensteenzettingen

**Auteur(s)**

Gijsbert Mourik

Nova Huppes

## Kwantificeren onzekerheden voor de stabiliteit van steenzettingen

Voor los-blok-falen in blokkensteenzettingen

<b>Opdrachtgever</b>	DGWB Directie WOM - Afdeling Bodem en Ondergrond
<b>Contactpersoon</b>	Helmus van de Langenheem (DGWB) Marieke Hazelhoff (RWS-WVL)
<b>Projectreferenties</b>	SITO-PS 2025 WWH09 BOI-Steenbekleding - Plan vernieuwing software steenzettingen SITO-PS 2025 WWH08 KvK-Factsheet Steenzettingen in DiKErnel, versie 6
<b>Trefwoorden</b>	Steenzetting, rekenmodel, rekenkernel, modelkalibratie, modelonzekerheid

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	24-02-2026
<b>Projectnummer</b>	11211573-004
<b>Document ID</b>	11211573-004-GEO-0001
<b>Pagina's</b>	60
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	Definitief

### Auteur(s)

	Gijsbert Mourik Nova Huppes	

# Samenvatting

Voor het doorrekenen van steenzettingen wordt inmiddels circa 20 jaar gebruikgemaakt van het rekenmodel Steentoets ([2] en [3]). Eén van de nadelen van Steentoets is echter dat het niet geschikt is voor het uitvoeren van tijdsafhankelijke berekeningen, waardoor het niet goed meer aansluit op de huidige wensen ten aanzien van het beoordelen en ontwerpen van steenzettingen. In combinatie met andere belangrijke nadelen op het gebied van onder andere cybersecurity en onderhoudbaarheid van de code is besloten nieuwe software te ontwikkelen voor het tijdsafhankelijk doorrekenen van steenzettingen.

De ontwikkeling van de nieuwe software is onderdeel van de werkzaamheden rondom BOI 2035 op het gebied van de software voor steenzettingen. Het doel is het ontwikkelen van een nieuwe, toekomstgerichte rekenkernel voor steenzettingen, die onderdeel wordt van het BOI. Dit gebeurt in een aantal fases:

- Fase 0: Structureren van kennis ten behoeve van nieuwe softwarestructuur
- Fase 1: Softwareontwikkeling (rekenkern, softwaredocumenten)
- Fase 2: User-interface (GUI)
- Fase 3: Beheer en onderhoud

Het voorliggende rapport heeft betrekking op fase 0 en beschrijft de kalibratie van het rekenmodel en de kwantificering van de modelonzekerheden rondom één van de initiële mechanismen van steenzettingen, namelijk ZTG (toplaaginstabiliteit onder golfaanval). In het rekenmodel zijn de nodige aannames gemaakt, hetgeen de uitkomsten van het rekenmodel per definitie onzeker maakt. Om een realistische schatting van de faalkans van steenzettingen te kunnen maken is het noodzakelijk om de onzekerheden te kwantificeren en in het BOI toe te passen. Dit draagt bij aan de doelstelling van het programma Kennis voor Keringen (KvK). De studie die heeft geleid tot voorliggend rapport is gefinancierd vanuit KvK en BOI (project "Vernieuwing Software Steenzettingen").

Een eerste opzet voor het rekenmodel voor het bepalen van de stabiliteit van steenzettingen is uitgewerkt in het in 2024 opgestelde rapport 'Tijdsafhankelijk rekenmodel voor steenzettingen' ([1]). Het in [1] opgezette rekenmodel vormt, inclusief enkele kleine aanpassingen op basis van paragraaf 4.4, het uitgangspunt voor de analyse in het voorliggende rapport. Om het rekenmodel bruikbaar te maken, is in het voorliggende rapport het rekenmodel gekalibreerd en is de modelonzekerheid gekwantificeerd. Zoals toegelicht in Hoofdstuk 2 is niet de onzekerheid van afzonderlijke deelprocessen, maar de globale modelonzekerheid gekwantificeerd. Deze globale onzekerheid is afgeleid door de eindresultaten van het rekenmodel te vergelijken met de resultaten van Deltagootproeven. Daarbij zijn de volgende stappen doorlopen:

Kalibratie van het rekenmodel:

- Stap 1. Vergelijking van de *gemeten* maximale opwaartse verplaatsing van afzonderlijke zetstenen in de Deltagoot ( $Y_{\text{Deltagoot}}$ ) met de door het rekenmodel *berekende* opwaartse verplaatsingen ( $Y_{\text{rekenmodel}}$ ). Daarbij is in het rekenmodel gebruikgemaakt van de gemeten hydraulische condities, belastingduur en steenzettingeigenschappen in de Deltagoot. Er is gebruikgemaakt van tientallen Deltagootproeven uit drie verschillende Deltagootonderzoeken in 1997-1998, 2005 en 2007.
- Stap 2. Kalibratie van het rekenmodel op basis van de verhouding tussen  $Y_{\text{Deltagoot}}$  en  $Y_{\text{rekenmodel}}$  van de nagerekende Deltagootproeven. De verhouding tussen  $Y_{\text{Deltagoot}}$  en  $Y_{\text{rekenmodel}}$  heeft een gemiddelde en een spreiding. De gemiddelde verhouding

tussen  $Y_{\text{Deltagoot}}$  en  $Y_{\text{rekenmodel}}$ , ook wel de bias van het model, is als kalibratiefactor opgenomen in het rekenmodel, waarna het rekenmodel de maximale opwaartse verplaatsing gedurende een Deltagootproef voorspelt, afhankelijk van de opgetreden belastingduur.

Kwantificering van de globale modelonzekerheid:

Stap 3. Kwantificeren van de globale modelonzekerheid op basis van de spreiding in de resultaten van Deltagootproeven ten opzichte van de (deterministische) resultaten van het rekenmodel. De globale modelonzekerheid betreft de standaardafwijking van de verhouding tussen  $Y_{\text{Deltagoot}}$  en  $Y_{\text{rekenmodel}}$ .

Dit rapport heeft uitsluitend betrekking op zogenoemd *los-blok-falen* in blokkensteenzettingen, zoals plat gezette betonblokken en blokken op hun kant. Los-blok-falen betreft de opwaartse verplaatsing van afzonderlijke zetstenen ten opzichte van omringende zetstenen. In een blokkensteenzetting gebeurt dat vaak zonder dat significante vervorming van het omringende taludoppervlak optreedt, doordat dit type steenzetting relatief weinig samenhang heeft. Er is wel *wrijving*, maar een relatief groot deel van de zetstenen ondervindt slechts weinig *klemming*. Dit in tegenstelling tot zuilensteenzettingen, waarin de onderlinge samenhang gewoonlijk veel groter is en er gewoonlijk wel eerst significante vervorming van het omringende talud optreedt, voordat één of meer zetstenen uit het talud komen. Een blokkensteenzetting wordt doorgaans aangeduid als een *niet geklemde* steenzetting en een zuilensteenzetting als een *geklemde* steenzetting.

De analyse heeft voor los-blok-falen geresulteerd in modelfactor  $m$  met verwachtingswaarde  $\mu(m) = 5,10$  en standaardafwijking  $\sigma(m) = 4,05$ . Daaruit volgt dat variatiecoëfficiënt  $V(m) = \sigma(m)/\mu(m) = 0,79$ . De onzekerheid is fors. De modelfactor  $m$  is toegevoegd in de in Paragraaf 4.4.3 verbeterde formule voor  $Y_{\text{top},1000}$  ( $Y_{\text{top},1000}$  = totale opwaartse verplaatsing van de zetsteen ten opzichte van de omliggende zetstenen, na een belastingduur van 1000 golven ( $m$ )).

In de analyse is gebruikgemaakt van de zetsteen, die in de Deltagoot het verst uit het talud stak, omdat dit de maatgevende zetsteen betreft voor de stabiliteit van het beschouwde stuk steenzetting. De ruimtelijke variabiliteit in de Deltagoot wordt hierdoor in het uiteindelijke rekenmodel verdisconteerd. Doordat in de Deltagoot steeds de verst uitstekende steen beschouwd is, heeft ook de verwachtingswaarde van de modelonzekerheid betrekking op de verst uitstekende steen. Voor toepassing in de praktijk is het van belang te weten op welk steenzettingoppervlak de modelonzekerheid van toepassing is en in hoeverre sprake is van een lengte-effect.

De kalibratie en kwantificering van de modelonzekerheid zijn uitgevoerd op basis van Deltagootproeven op schaal 1:1 à 1:2,5 in een 5 m brede golfgoet. De modelfactor heeft daardoor in werkelijkheid betrekking op steenzettingen met een lengte van 5,0 à 12,5 m.

In het bijzonder is onderzocht of de modelonzekerheid afhankelijk is van de belastingduur. Om de invloed van de belastingduur te onderzoeken is op basis van enkele in [1] afgeleide formules in Paragraaf 4.4.5 een formule afgeleid waarmee  $Y_{\text{top},1000}$  (na 1000 golven) vertaald kan worden naar  $Y_{\text{top},N}$  (na  $N$  golven). Er is geen duidelijke invloed van de belastingduur op de onzekerheid geconstateerd. Wel lijkt het rekenmodel bij lange belastingduren de opwaartse verplaatsingen gemiddeld wat te onderschatten (onveilig).

Naar aanleiding van het voorliggende rapport is een aantal aanbevelingen opgesteld. Deze zijn gebundeld in Paragraaf 7.2.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
	<b>Inhoud</b>	<b>6</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>8</b>
1.1	Scope BOI vernieuwing software steenzettingen	8
1.2	Scope voorliggende rapportage	10
<b>2</b>	<b>Achtergrond onzekerheden voor stabiliteit van steenzettingen</b>	<b>13</b>
2.1	Onzekerheden	13
2.2	Globale onzekerheid versus deelprocessen	13
<b>3</b>	<b>Werkwijze</b>	<b>16</b>
3.1	Stap 1: Rekenmodelresultaten vergelijken met Deltagootproeven	16
3.2	Stap 2: Kalibratie van het rekenmodel op basis van Deltagootproeven	17
3.3	Stap 3: Kwantificeren van de modelonzekerheid	17
3.4	Stap 4: Het rekenmodel bruikbaar maken voor toepassing in de praktijk	18
<b>4</b>	<b>Rekenmodel</b>	<b>19</b>
4.1	Algemeen	19
4.2	Structuur van het Matlab-model	19
4.3	Toepassingsgebied van het Matlab-model	20
4.4	Aanpassingen in het rekenmodel ten opzichte van [1]	24
4.4.1	Eigen gewicht van de zetsteen	24
4.4.2	Wrijving	25
4.4.3	Resulterende formule voor $Y_{top}$	26
4.4.4	Leklengte	27
4.4.5	Kwantificering invloed belastingduur in relatie tot beschikbare Deltagootresultaten	27
4.4.5.1	Problematiek	27
4.4.5.2	Formule voor het berekenen van $Y_{top,N}$ bij constante waterstand en golfcondities:	28
4.4.6	Bezwijkgolffhoogte bij belastingduur van 1000 golven	31
4.4.7	Invloedsfactoren voor de belastingduur	32
<b>5</b>	<b>Modelkalibratie</b>	<b>33</b>
5.1	Werkwijze	33
5.2	Vergelijking rekenmodelresultaten met Deltagootproeven (stap 1)	35
5.2.1	Gebruikte Deltagootonderzoeken	35
5.2.2	Eigenschappen en resultaten van de beschouwde Deltagootproeven	36
5.2.3	Berekende opwaartse verplaatsing volgens het rekenmodel	37
5.2.4	Vergelijking van $Y_{rekenmodel}$ en $Y_{Deltagoot}$	37
5.3	Kalibratie van het rekenmodel op basis van Deltagootproeven (stap 2)	41

<b>6</b>	<b>Kwantificering globale modelonzekerheid</b>	<b>43</b>
6.1	Kwantificeren van de modelonzekerheid (stap 3)	43
6.2	Invloed van de belastingduur	44
6.3	Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	45
<b>7</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>46</b>
7.1	Conclusies	46
7.2	Aanbevelingen	48
	<b>Referenties</b>	<b>50</b>
<b>A</b>	<b>Toelichting op de gebruikte Deltagootproeven</b>	<b>51</b>
A.1	Deltagootonderzoek 1997-1998	51
A.2	Deltagootonderzoek 2005	54
A.3	Deltagootonderzoek 2007	54
<b>B</b>	<b>Overzicht gebruikte Deltagootproeven</b>	<b>56</b>

# 1 Inleiding

Voor het doorrekenen van steenzettingen wordt inmiddels circa 20 jaar gebruikgemaakt van het rekenmodel Steentoets ([2] en [3]). Eén van de nadelen van Steentoets is echter dat het niet geschikt is voor het uitvoeren van tijdsafhankelijke berekeningen, waardoor het niet goed meer aansluit op de huidige wensen ten aanzien van het beoordelen en ontwerpen van steenzettingen. In combinatie met andere belangrijke nadelen op het gebied van onder andere cybersecurity en onderhoudbaarheid van de code is besloten nieuwe software te ontwikkelen voor het tijdsafhankelijk doorrekenen van steenzettingen.

De ontwikkeling van de nieuwe software is onderdeel van de werkzaamheden rondom BOI 2035 op het gebied van de software voor steenzettingen. Het doel is het ontwikkelen van een nieuwe, toekomstgerichte rekenkernel voor steenzettingen, die onderdeel wordt van het BOI. Dit gebeurt in een aantal fases:

- Fase 0: Structureren van kennis ten behoeve van nieuwe softwarestructuur
- Fase 1: Softwareontwikkeling (rekenkern, softwaredocumenten)
- Fase 2: User-interface (GUI)
- Fase 3: Beheer en onderhoud

Voorliggende rapportage heeft betrekking op fase 0. Deze fase levert rapporten met alle benodigde formules voor het maken van een nieuwe rekenmodule voor steenbekledingen, inclusief een beschrijving van de achtergronden van de formules, de aannames en in hoeverre er veiligheidsmarges zijn gehanteerd. Deze informatie wordt zodanig gestructureerd dat hierin reeds de modulaire opbouw van de berekeningen helder wordt. Dit is nodig om een goed fundament te creëren voor de ontwikkeling van nieuwe software ten behoeve van BOI.

De doelgroep van de rapporten die binnen fase 0 worden opgesteld bestaat uit mensen met een waterbouwkundige achtergrond.

Een eerste opzet voor het rekenmodel voor het bepalen van de stabiliteit van steenzettingen is uitgewerkt in het kader van Kennis voor Keringen (KvK) ([1]). Om het rekenmodel bruikbaar te maken, is in het voorliggende rapport het rekenmodel gekalibreerd en is de modelonzekerheid rondom de opwaartse verplaatsing van afzonderlijke zetstenen gekwantificeerd. Toekomstige implementatie van deze onzekerheid in BOI doet recht aan de vele aannames die in het rekenmodel zijn gemaakt en draagt bij aan het maken van een realistische schatting van de faalkans van steenzettingen enerzijds en van de resulterende overstromingskans anderzijds. Dit draagt bij aan de doelstelling van KvK.

Voorliggende rapportage is gefinancierd vanuit de SITO-PS programma's BOI (project "Vernieuwing Software Steenzettingen") en KvK ("project DE5-2 DiKernal Minersom").

In Paragraaf 1.1 wordt toegelicht welke inhoudelijke onderwerpen binnen de scope van fase 0 vallen. Paragraaf 1.2 licht de scope van het voorliggende rapport toe.

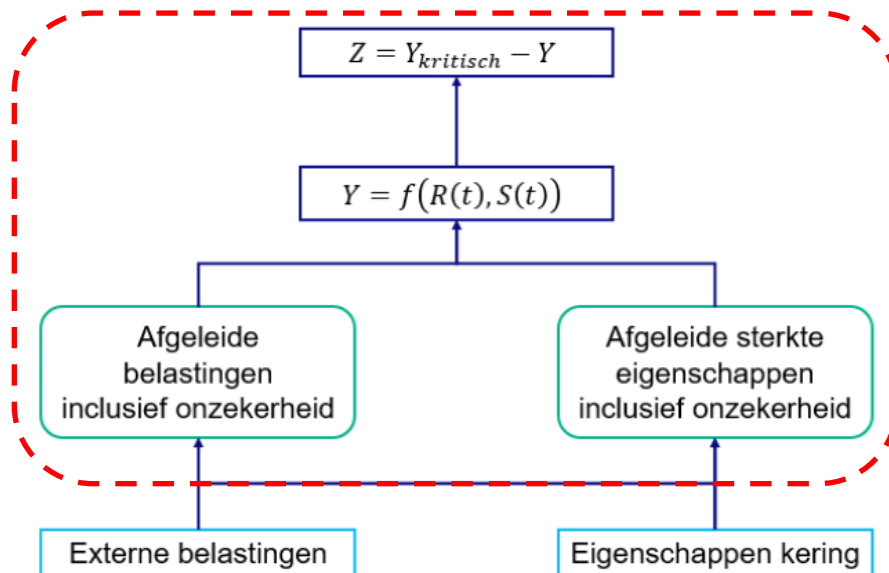
## 1.1 Scope BOI vernieuwing software steenzettingen

Het is onmogelijk en onwenselijk om binnen fase 0 inhoudelijke wijzigingen aan te brengen in alle onderdelen van de circa 40.000 regels code van het rekenmodel Steentoets. Alle 40.000 regels code van het huidige Steentoets zijn binnen de scope: er wordt bekeken wat opgenomen moet worden in het nieuwe model en hoe de inhoud vertaald moet worden naar een modern softwarepakket. Sommige onderdelen zijn inhoudelijk ook toe aan de nodige aanpassingen. Voor deze onderdelen zullen nieuwe modules ontwikkeld worden, en

geïmplementeerd worden in de nieuwe software. Echter, niet in elk onderdeel zullen inhoudelijke wijzigingen plaatsvinden. Voor de prioritering van de onderdelen die inhoudelijk gewijzigd worden, wordt van grof naar fijn, en van belangrijk naar (relatief) onbelangrijk gewerkt. De onderdelen van Steentoets, en de prioritering van deze onderdelen binnen fase 0 zijn beschreven in deze paragraaf.

Voor elk initieel en vervolgmecanisme binnen BOI geldt een werkwijze aan de hand van de grenstoestandfunctie om te bepalen of het mechanisme, gegeven bepaalde omstandigheden, al dan niet optreedt. Figuur 1.1 is een schematische weergave hiervan. Men begint met het definiëren van de omstandigheden, in de vorm van externe belastingen en eigenschappen van de kering. Vervolgens worden deze omstandigheden vertaald naar afgeleide belastingen en eigenschappen die mechanisme-specifiek zijn. In deze afgeleide omstandigheden zitten onzekerheden. Dat komt doordat de afgeleide belastingen en sterkte-eigenschappen worden bepaald met relaties die niet onder alle omstandigheden perfect de fysica weergeven, maar slechts een benadering daarvan zijn. Dit staat nog los van de onzekerheden in de invoer. Voor golfcondities en waterstanden is dat evident, maar ook de gebruikte schematisaties van keringen zijn slechts een benadering van de wijze waarop een kering er daadwerkelijk bij ligt. De afgeleide omstandigheden worden vervolgens gebruikt in een rekenmodel, dat de toestand van de kering ( $Y$ ) bepaalt gegeven de omstandigheden. Hierin is  $R$  de sterkte over de tijd, en  $S$  is de belasting over de tijd. Tenslotte wordt de toestand van de kering ( $Y$ ) getoetst aan de grenstoestand van de kering ( $Y_{kritisch}$ ). Deze functie ( $Z$ ) wordt de grenstoestandsfunctie genoemd en bepaalt of en wanneer in de tijd het beschouwde mechanisme optreedt. De grenstoestandsfunctie is een indicatorfunctie die een negatieve waarde aanneemt als de waarden van de belasting- en sterktevariabelen zodanig zijn dat de grenstoestand (in dit geval het los komen van een enkel blok) wordt overschreden.

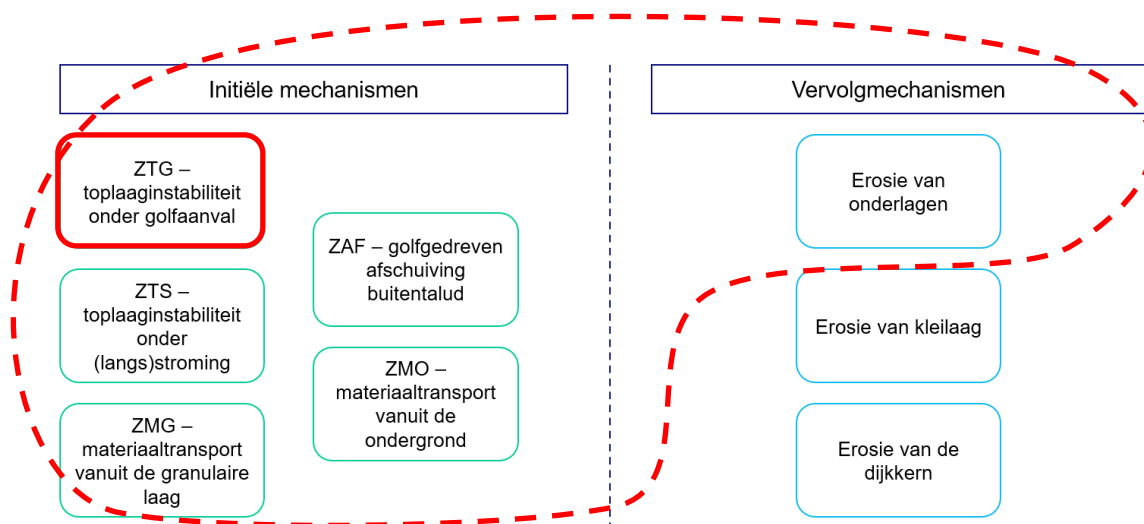
Voor de vernieuwing van de software voor steenzettingen valt alles binnen het rood omcirkelde gebied van Figuur 1.1 binnen de scope, maar de invoer (buiten het rood omcirkelde gebied) niet. Alle andere onderdelen zijn steenzetting-specifiek en dienen dus een plek te krijgen in het nieuwe instrumentarium. Niet alle onderdelen zijn inhoudelijk al even ver uitgewerkt. Voor bijvoorbeeld onzekerheden en tijdsafhankelijkheid dienen inhoudelijke toevoegingen gedaan te worden aan het instrumentarium.



Figuur 1.1 Algemene opzet van het rekenmodel.

Voor steenzettingen zijn de relevante initiële en vervolgemechanismen gegeven in Figuur 1.2. Voor elk van deze mechanismen kan het stroomschema uit Figuur 1.1 gevolgd worden om te bepalen of het mechanisme, gegeven een bepaalde set omstandigheden, optreedt. Alle mechanismen vallen binnen de scope van het project, behalve de erosie van de kleilaag en dijk kern. De erosie van de kleilaag en dijk kern zijn relevant voor alle initiële mechanismen en niet specifiek voor steenzettingen. Deze vallen buiten de scope van het huidige project, maar worden daarbuiten op generieke wijze onderzocht. De erosie van onderlagen omvat bijvoorbeeld de filterlaag van steenslag en het geotextiel dat onder filterlagen wordt aangebracht. Dit vervolgemechanisme is onderdeel van Steentoets en zal ook onderdeel zijn van het nieuwe instrumentarium. Het rood omcirkelde gebied in Figuur 1.2 geeft de scope van de vernieuwing van de software voor steenzettingen weer. Een fenomenologische beschrijving van de verschillende mechanismen die binnen de scope vallen, is te vinden in Hoofdstuk 8 van [6].

Zoals in de inleiding van dit hoofdstuk is benoemd, worden niet voor alle onderdelen van de scope inhoudelijke wijzigingen doorgevoerd ten opzichte van Steentoets. Veruit het grootste deel van Steentoets is gewijd aan het initiële mechanisme ZTG. Dit initieel mechanisme is vaak bepalend voor de faalkans van steenzettingen, is fysisch ingewikkeld, en er is uit de afgelopen circa 30 jaar veel onderzoek beschikbaar, zowel bureaustudies als fysisch modelonderzoek. De inhoudelijke wijzigingen zullen zich daarom met name focussen op het initiële mechanisme ZTG. Het doel is om voor dit mechanisme een modulaire opbouw en werkwijze te ontwikkelen die het stroomschema uit Figuur 1.1 volgt. De rest van de mechanismen uit Figuur 1.2 die binnen de scope vallen worden in de eerste instantie overgenomen uit Steentoets. Deze mechanismen bevatten veel conservatieve aannames, maar omdat de bijdrage van deze mechanismen aan de totale faalkans veel kleiner is, is dit minder relevant.



Figuur 1.2 Overzicht van relevante initiële en vervolgemechanismen voor de stabiliteit van steenzettingen.

## 1.2 Scope voorliggende rapportage

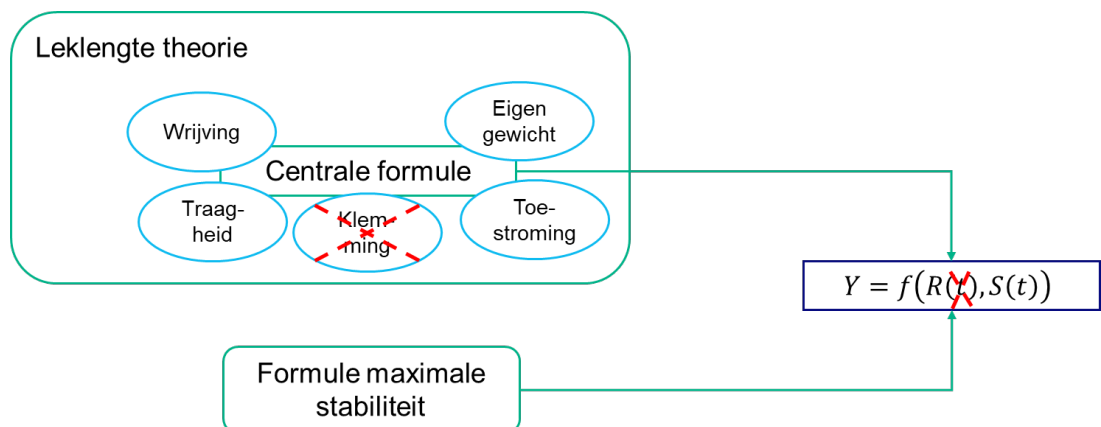
De voorliggende rapportage gaat in op het kwantificeren van de onzekerheden rondom het initiële mechanisme ZTG. De huidige modulaire opbouw die aangehouden wordt voor het initiële mechanisme ZTG is weergegeven in Figuur 1.3. De figuur is een uitwerking van de functie Y uit Figuur 1.1. Y wordt bepaald op basis van de leklengte theorie – waarbij aspecten als wrijving, traagheid, eigen gewicht en de mate van toestroming en klemming een rol spelen – en de bedoeling is die te begrenzen op basis van een nog nader vast te stellen bovengrens aan de stabiliteit (zie Paragraaf 3.4 van [1]). De functie is gebaseerd op eerder onderzoek gefinancierd binnen KvK [1] en is vooralsnog geschikt voor het berekenen van de opwaartse verplaatsing van afzonderlijke zetstenen uit een steenzetting ten opzichte van omringende

stenen, gegeven een bepaalde belasting. De verplaatsing wordt omgerekend naar een degeneratieniveau dat voor meerdere tijdstappen kan worden berekend en gesommeerd, zodat een tijdsafhankelijke minersom berekend kan worden.

Uitgangspunt voor de analyse in het voorliggende rapport is het rekenmodel zoals opgezet in [1], inclusief enkele kleine aanpassingen op basis van paragraaf 4.4.

Dit rapport heeft uitsluitend betrekking op zogenoemd *los-blok-falen* in blokkensteenzettingen, zoals plat gezette betonblokken en blokken op hun kant. Los-blok-falen betreft de opwaartse verplaatsing van afzonderlijke zetstenen ten opzichte van omringende zetstenen. In een blokkensteenzetting gebeurt dat vaak zonder dat significante vervorming van het omringende taludoppervlak optreedt, doordat dit type steenzetting relatief weinig samenhang heeft. Er is wel *wrijving*, maar een relatief groot deel van de zetstenen ondervindt slechts weinig *klemming*. Dit in tegenstelling tot zuilensteenzettingen, waarin de onderlinge samenhang gewoonlijk veel groter is en er gewoonlijk wel eerst significante vervorming van het omringende talud optreedt, voordat één of meer zetstenen uit het talud komen. Een blokkensteenzetting wordt doorgaans aangeduid als een *niet geklemde* steenzetting en een zuilensteenzetting als een *geklemde* steenzetting.

Voor geklemde steenzettingen is een kwantificering van onzekerheden op dit moment nog niet mogelijk, omdat formules voor klemming momenteel nog in ontwikkeling zijn en na de ontwikkeling eerst nog breder geaccepteerd moeten worden. Verder kan de tijdsafhankelijkheid van de sterkte van de steenzetting nog niet meegenomen worden in de formules, omdat hier te weinig over bekend is. De onzekerheden worden specifiek bepaald voor het mechanisme ZTG.



Figuur 1.3 Modulaire opbouw voor het initiële mechanisme ZTG. De rode kruisen geven aan dat klemming en tijdsafhankelijkheid van de sterkte parameters vooralsnog niet worden beschouwd.

Beperkingen van de modulaire opbouw en bijbehorende formules zijn nader toegelicht in [1] en worden verder beschouwd in latere rapportages binnen het project. Deze beperkingen zijn met name gerelateerd aan steenzettingen met kleine waarden voor de leklengte (zie Paragraaf 3.4 van [1]). Als gevolg van de wijze waarop het stijghoogteverloop op de top laag geschematiseerd is, kan bij kleine leklengtes een extreem grote stabiliteit berekend worden, die ongevoelig is voor de golfhoogte.

Voor niet geklemde steenzettingen zijn de leklengtes vrij groot (in de Deltagootproeven, die voor de voorliggende analyse beschouwd zijn, geldt voor de dimensieloze leklengte: leklengte/toplaagdikte =  $\Lambda/D = 0,8$  à  $2,7$ ), waardoor de problemen met de leklengte theorie relatief onbelangrijk zijn voor de voorliggende rapportage.



*Figuur 1.4 Een voorbeeld van los-blok-falen (de situatie na proef P4120 van Deltagootonderzoek 2005, [8]).*

## 2 Achtergrond onzekerheden voor stabiliteit van steenzettingen

### 2.1 Onzekerheden

Binnen het BOI [5] wordt onderscheid gemaakt tussen twee hoofdsorten onzekerheden:

1. Aleatorische onzekerheden (onzekerheden die het gevolg zijn van natuurlijke variabiliteit).
2. Epistemische onzekerheden (onzekerheden als gevolg van onvolledige kennis of gebrek aan gegevens).

De eerste houdt verband met het feit dat de kans dat een bepaalde storm optreedt bekend is, maar dat je nooit kan weten wanneer de storm precies optreedt. Een ander voorbeeld is dat bekend is hoe het golfspectrum van de Noordzee eruitziet, maar dat je nooit kan weten welke twee golven elkaar opvolgen, terwijl de volgorde bepalend is voor de belasting op de dijk.

De tweede betreft het probleem dat onze formules slechts een benadering zijn van de werkelijkheid en bovendien dat er bepaalde relevante aspecten van de stabiliteit van steenzettingen nog niet onderkend zijn. Dat maakt dat onze formules niet leiden tot een perfecte voorspelling van de werkelijke stabiliteit. Het is slechts een schatting. Deze onzekerheid wordt ook wel modelonzekerheid genoemd.

In het huidige project beschouwen we de Deltagoot als werkelijkheid en beschouwen we de verschillen tussen de berekende stabiliteit uit het rekenmodel en de gemeten stabiliteit in de Deltagoot als kwantitatieve informatie over de modelonzekerheid. De natuurlijke variabiliteit is hier gering. De Deltagoot is immers maar 5 m breed en bovendien wordt de steenzetting in de Deltagoot altijd met de grootste zorg aangelegd. Ook het uitgestuurde golfveld in de Deltagoot is goed bekend. Daardoor is de variatie in de eigenschappen in dit kleine oppervlak (ruimtelijke variabiliteit) relatief klein en is ook het aantal aleatorische onzekerheden relatief klein. Wel is er sprake van variabiliteit in de stabiliteit van de zetstenen (niet elk blok is even stabiel). Het rekenmodel wordt nader beschreven in Hoofdstuk 4.

Wanneer een dijk beoordeeld moet gaan worden met het rekenmodel en er dus een vergelijking gemaakt wordt tussen de werkelijkheid en het model dan is ruimtelijke variabiliteit van de invoergegevens, horend bij de Deltagootschaal, wél relevant. Dit valt buiten de huidige scope, maar dient wel meegenomen te worden in de beoordeling van een dijk. Er is in Paragraaf 6.1 wel toegelicht op welk steenzettingoppervlak de uitkomsten van de berekeningen met het rekenmodel betrekking hebben.

Een onderdeel van de modelonzekerheid is de schematisatie van de werkelijkheid naar iets wat doorgerekend kan worden. Zo moet er een keuze gemaakt worden in het verloop van de waterstand en golfcondities tijdens een storm en moet de complexe geometrie soms wat vereenvoudigd worden om te passen in de rekenmodellen. Dit wordt de schematiserings-onzekerheid genoemd. Deze onzekerheid is voor steenzettingen betrekkelijk klein, omdat ook zeer gecompliceerde geometrieën met de steenzettingen-software kunnen worden doorgerekend. De onzekerheid in de schematisatie van het stormverloop is onderdeel van de bepaling van de hydraulische belastingen en valt buiten de scope van dit project.

### 2.2 Globale onzekerheid versus deelprocessen

In Steentoets (semi-probabilistisch) worden over het algemeen formules gebruikt die een resultaat aan de veilige kant geven. Er is dus enig conservatisme in de formules opgenomen.

In het nieuwe rekenmodel, waarmee uiteindelijk probabilistische berekeningen uitgevoerd moeten kunnen worden, moet dit conservatisme geëlimineerd worden. In probabilistische berekeningen dient gerekend te worden met formules, die als resultaat een verwachtingswaarde met bandbreedte geven (een kansverdeling), waardoor rekening gehouden wordt met de kansverdeling van de sterkte. Waar in Steentoets met veilige, conservatieve rekenwaarden (bijvoorbeeld een x%-waarde van een bepaalde onzekere parameter) wordt gerekend (overschrijdingskansbenadering), dient in het nieuwe rekenmodel voor onzekere parameters gerekend te worden met kansverdelingen met een verwachtingswaarde en de bijbehorende spreiding (dus zonder conservatisme), zodat het de best mogelijke benadering geeft van de overstromingskans van een (gedeelte van de) dijk (overstromingskansbenadering). Het rekenmodel moet daarom gekalibreerd worden met data en gemiddelde waarden uit de Deltagoot (zie Hoofdstuk 5).

In het rekenmodel moeten vele deelprocessen worden doorgerekend voor het bepalen van de stabiliteit van mechanisme ZTG. Hoewel deze deelprocessen in werkelijkheid aan elkaar gekoppeld zijn via de fysica, worden deelprocessen in het rekenmodel deels afzonderlijk beschouwd om de complexiteit van het rekenmodel enigszins te beperken. Men zou van elk afzonderlijk deelproces zo goed mogelijk kunnen vaststellen welke onzekerheid daarbij speelt. Als al deze onzekerheden in rekening worden gebracht, rekening houdend met de onderlinge afhankelijkheid en de kansverdeling van de onzekerheid, zou de totale epistemische onzekerheid van het rekenmodel goed ingeschat kunnen worden. Voor het berekenen van de stabiliteit van steenzettingen is dit echter niet aan te bevelen, omdat er heel veel processen moeten worden doorgerekend en de onderlinge afhankelijkheid (correlatie) van de onzekerheden niet bekend is. Het niet meenemen van correlatie tussen de processen leidt tot onrealistisch hoge of lage berekende faalkansen. Daarnaast zijn niet alle processen continu en/of zitten er discontinuïteiten in de beschrijving van het proces, die niet zijn te beschrijven door een 'nette' parametrische verdeling, zoals een lognormale of normale verdeling. Onderstaand zijn enkele processen en eigenschappen benoemd die bepaald moeten worden voor het bepalen van de toplaagstabiliteit van de steenzetting in golfaanval:

1. golfbelasting met verloop in de tijd en waterstandsverloop
2. relevant stijghoogteverloop op de toplaag
3. doorlatendheid toplaag
4. doorlatendheid filterlaag
5. stijghoogteverschil over de toplaag
6. invloed van overgangsconstructie op het stijghoogteverschil
7. invloed van de geometrie op het stijghoogteverschil, zoals een berm en verandering van de taludhelling in het dwarsprofiel
8. het (onderwater) eigen gewicht van de toplaag
9. wrijving in de toplaag
10. klemming in de toplaag
11. invloed van traagheid en toestroming op de toplaagstabiliteit
12. invloed van de overgangsconstructie op de klemming in de toplaag
13. vervorming van de toplaag
14. invloed van de belastingduur op de vervorming van de toplaag
15. bezwijken van de toplaag

Uit het bovenstaande kan geconcludeerd worden dat er veel fysische processen zijn die bepalen of een steenzetting gaat bezwijken of niet. Een deel van die fysische processen is op een versimpelde wijze in formules gevat en vormen tezamen het rekenmodel. Al die formules geven een bijdrage aan de onzekerheid, maar ook de niet gemodelleerde (nog onbegrepen) processen dragen daaraan bij. Dat maakt dat het aanpassen van de formules, zodanig dat elke formule precies de verwachtingswaarde levert van het betreffende fysische proces, en het

vervolgens kwantificeren van de onzekerheden rondom dit specifieke proces, onbegonnen werk is.

Daarnaast leidt het rekenen met verwachtingswaarden voor alle afzonderlijke deelprocessen niet per definitie tot de verwachtingswaarde van het eindantwoord vanwege de niet goed bekende correlatie tussen de deelprocessen. Dit is in onderstaand tekstvak duidelijk gemaakt. Wanneer twee processen ( $x_1$  en  $x_2$ ) opgeteld tot het eindantwoord  $Y$  leiden, dan leiden de opgetelde afzonderlijke onzekerheden ( $E$ ) van deze processen tot de onzekerheid van het eindantwoord. Echter, wanneer de twee processen een complexere relatie hebben, bijvoorbeeld een vermenigvuldiging, dan kunnen de onzekerheden van de afzonderlijke processen niet zomaar opgeteld worden, want dan leidt de afzonderlijke beschouwing van deze onzekerheden tot stapelen van onzekerheden. Door de niet goed bekende correlatie tussen de deelprocessen is niet goed bekend hoe de afzonderlijke onzekerheden gecombineerd moeten worden. De processen en hun onzekerheden dienen dan in samenhang beschouwd te worden. Door de onzekerheden gezamenlijk te beschouwen en een gezamenlijke onzekerheid af te geven voor het eindantwoord wordt stapelen van onzekerheden voorkomen.

$$\begin{array}{l} Y = x_1 + x_2 \\ E(Y) = E(x_1) + E(x_2) \end{array}$$
  
$$\begin{array}{l} Y = x_1 \cdot x_2 \\ E(Y) \neq E(x_1) \cdot E(x_2) \end{array} \longrightarrow E(Y) = E(x_1 \cdot x_2)$$

Daarom is ervoor gekozen om de *globale modelonzekerheid* in het rekenmodel te kwantificeren door de uitkomsten van het rekenmodel te vergelijken met de metingen in de Deltagoot. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen proeven op steenzettingen met veel klemming en weinig klemming. In het voorliggende rapport worden uitsluitend niet geklemde steenzettingen beschouwd. Door metingen van een groot aantal Deltagootproeven op diverse typen niet geklemde steenzettingen te gebruiken, wordt het rekenmodel in één keer gekalibreerd voor een breed scala aan niet geklemde steenzettingstypen.

## 3 Werkwijze

Een eerste opzet voor het rekenmodel voor het bepalen van de stabiliteit van steenzettingen is uitgewerkt in het in 2024 opgestelde rapport '*Tijdsafhankelijk rekenmodel voor steenzettingen*' ([1]). Om het rekenmodel bruikbaar te maken, is eerst een kalibratie van het model noodzakelijk en dient de modelonzekerheid gekwantificeerd te worden. Zoals toegelicht in Hoofdstuk 2 wordt niet de onzekerheid van afzonderlijke deelprocessen, maar de *globale modelonzekerheid* gekwantificeerd. Deze globale onzekerheid wordt afgeleid door de eindresultaten van het rekenmodel te vergelijken met de resultaten van Deltagootproeven. Daarbij worden de volgende stappen doorlopen, die in de navolgende paragrafen nader worden toegelicht:

- Stap 1. Rekenmodelresultaten vergelijken met Deltagootproeven (hiervoor wordt de permanente opwaartse verplaatsing van zetstenen beschouwd bij de in de Deltagoot gemeten golfbelasting).
- Stap 2. Kalibratie van het rekenmodel op basis van Deltagootproeven.
- Stap 3. Kwantificeren van de globale modelonzekerheid, op basis van de (spreiding in de) resultaten van Deltagootproeven ten opzichte van de (deterministische) resultaten van het rekenmodel.
- Stap 4. Het rekenmodel bruikbaar maken voor toepassing in de praktijk. Dit valt buiten het kader van de voorliggende rapportage.

### 3.1 Stap 1: Rekenmodelresultaten vergelijken met Deltagootproeven

De eerste stap bij het kwantificeren van de globale modelonzekerheid betreft het vergelijken van de resultaten van het rekenmodel met resultaten van Deltagootproeven. Het rekenmodel bestaat in de basis uit de formules die opgesteld zijn in [1]. Deze formules zijn, voor zover noodzakelijk voor het kwantificeren van de modelonzekerheid, geprogrammeerd in Matlab, hierna aangeduid als het Matlab-model. Zowel het rekenmodel als het Matlab-model zijn nader beschreven in Hoofdstuk 4. In dat hoofdstuk zijn bovendien diverse aanpassingen en aanvullingen in het rekenmodel ten opzichte van [1] beschreven. Waar nodig voor het doel van het voorliggende rapport zijn die aanpassingen ook doorgevoerd in het Matlab-model. Een belangrijke aanvulling is de mogelijkheid om de opwaartse verplaatsing na 1000 golven te kunnen omrekenen naar een opwaartse verplaatsing na een willekeurig aantal golven (zie Paragraaf 4.4.5).

Om het rekenmodel te kunnen kalibreren zijn met het rekenmodel tientallen Deltagootproeven nagerekend, waarbij de rekenmodelinvoer ten aanzien van de hydraulische belastingen en sterkteparameters overeenkomt met de eigenschappen van de corresponderende Deltagootproeven. In deze analyse worden het rekenmodel en de Deltagoot met elkaar vergeleken op basis van de resulterende *opwaartse verplaatsing* van afzonderlijke zetstenen in de toplaag. De keuze om gebruik te maken van de opwaartse verplaatsing is nader toegelicht in Paragraaf 4.4.5.1. De in de Deltagoot *gemeten* opwaartse verplaatsing van de verst uitstekende zetsteen (zie nadere toelichting verderop in deze paragraaf) wordt vergeleken met de door het rekenmodel *berekende* opwaartse verplaatsing bij de betreffende hydraulische condities en belastingduur. De resulterende opwaartse verplaatsing is gedefinieerd als de haaks op het talud gemeten opwaartse verplaatsing van afzonderlijke zetstenen ten opzichte van omringende zetstenen, nadat een proef is stilgelegd om de steenzetting te kunnen inspecteren. Het is goed mogelijk dat de zetstenen nog enige aanvullende verplaatsing vertonen tijdens golfaanval, maar hiervan zijn logischerwijs geen metingen beschikbaar. Door de in de Deltagoot gemeten opwaartse verplaatsing van zetstenen in combinatie met de bijbehorende opgetreden belastingduur als uitgangspunt te kiezen, wordt unieke informatie verkregen over de schade (verplaatsing van een zetsteen) over de tijd. Dit is in lijn met hoe

andere faalmechanismen, zoals die nu in DiKErnel zijn opgenomen, omgaan met tijdsafhankelijkheid en toewerken naar een overstromingskansbenadering. Deze methode is dan ook overgenomen voor steenzettingen.

De opwaartse verplaatsing van een zetsteen wordt in het rekenmodel uitgedrukt met de parameter  $Y$  [m]. Indien na een Deltagootproef noemenswaardige opwaartse verplaatsing van zetstenen zichtbaar is, wordt de verplaatsing van de verst uitstekende stenen gewoonlijk opgemeten en gerapporteerd. Deze metingen zijn gebruikt voor het voorliggende rapport. Mede doordat opeenvolgende proeven regelmatig zijn uitgevoerd met verschillende waterstanden, zijn in de loop van proevenseries regelmatig andere stenen in beweging gekomen. Overigens wordt opgemerkt dat het overgrote deel van de zetstenen tijdens Deltagootproeven geen merkbare opwaartse verplaatsing vertoont.

Er is gebruikgemaakt van de zetsteen, die het verst uit het talud steekt, omdat dit de maatgevende zetsteen betreft voor de stabiliteit van het beschouwde stuk steenzetting. De ruimtelijke variabiliteit in de Deltagoot wordt hierdoor in het uiteindelijke rekenmodel verdisconteerd. Doordat de modelkalibratie en modelonzekerheid gebaseerd worden op de verst uitstekende steen heeft de verwachtingswaarde van de modelonzekerheid betrekking op de verst uitstekende steen. Voor toepassing in de praktijk is het van belang te weten op welk steenzettingoppervlak de modelonzekerheid van toepassing is en in hoeverre sprake is van een lengte-effect. Dit is nader toegelicht in Paragraaf 6.1.

Voor elke relevante Deltagootproef wordt de  $Y_{\text{Deltagoot}}$  dus bepaald op basis van de verst uitstekende steen. Bij elke  $Y_{\text{Deltagoot}}$  hoort een  $Y_{\text{rekenmodel}}$ , die berekend wordt met het rekenmodel, gebruikmakend van de hydraulische condities en steenzettingeigenschappen uit de Deltagoot.

### 3.2 Stap 2: Kalibratie van het rekenmodel op basis van Deltagootproeven

In stap 2 wordt met behulp van de waarden van  $Y$  het rekenmodel gekalibreerd. De verhouding tussen  $Y_{\text{Deltagoot}}$  en  $Y_{\text{rekenmodel}}$  heeft een gemiddelde en een spreiding. De gemiddelde verhouding tussen  $Y_{\text{Deltagoot}}$  en  $Y_{\text{rekenmodel}}$  wordt ook wel de bias van het model genoemd. Deze bias wordt als kalibratiefactor opgenomen in het rekenmodel. Hierna voorspelt het rekenmodel de opwaartse verplaatsing van de verst uitstekende zetsteen na een Deltagootproef.

### 3.3 Stap 3: Kwantificeren van de modelonzekerheid

Na stap 2 is het model zodanig gekalibreerd dat er gemiddeld geen afwijking meer is tussen de resultaten in de Deltagoot en het rekenmodel door de toevoeging van een kalibratiefactor aan het rekenmodel.

Naast de bias is er ook een spreiding in de verhouding tussen  $Y_{\text{Deltagoot}}$  en  $Y_{\text{rekenmodel}}$ . Deze spreiding wordt gebruikt voor het kwantificeren van de modelonzekerheid van het rekenmodel. De modelonzekerheid wordt beschreven door een kansverdeling van de verhouding tussen  $Y_{\text{Deltagoot}}$  en  $Y_{\text{rekenmodel}}$ . Een veel gehanteerde maat voor het kwantificeren van spreiding rond het gemiddelde is de standaardafwijking. Er is uitgegaan van een kansverdeling, die wordt vastgelegd met het gemiddelde en de standaardafwijking. De standaardafwijking van de verhouding tussen  $Y_{\text{Deltagoot}}$  en  $Y_{\text{rekenmodel}}$  geeft de globale modelonzekerheid. Bij het kwantificeren van de modelonzekerheid wordt gebruikgemaakt van het reeds in stap 2 gekalibreerde rekenmodel.

Dit is belangrijke informatie om op den duur probabilistisch te kunnen gaan rekenen. Echter, om de resultaten toepasbaar te maken voor de beoordeling en het ontwerpen van steenzettingen op dijken is nog een extra stap nodig. Deze stap is hieronder toegelicht.

### 3.4 **Stap 4: Het rekenmodel bruikbaar maken voor toepassing in de praktijk**

Het toepasbaar maken van de resultaten in de praktijk valt buiten de scope van deze rapportage. Er is wel rekening gehouden met de noodzakelijke vervolgstappen van het proces.

Voor de toepassing in de praktijk is het belangrijk dat de rekenresultaten aansluiten op de gewenste faalkansruimte van de steenzetting van het betreffende dijktraject. Dit kan op twee manieren gedaan worden:

- a. Door een veiligheidsfactor af te leiden en toe te voegen aan het rekenmodel. Hierdoor ontstaat er een semi-probabilistische rekenmethode waarmee steenzettingen beoordeeld en ontworpen kunnen worden met een gekozen faalkansruimte, net zoals dit met het huidige Steentoets mogelijk is.
- b. Door een probabilistisch model beschikbaar te stellen, waarmee gebruikers van het model zelf een realistische faalkans voor een steenzetting kunnen uitrekenen.

Met het resultaat van stap 3 is het nog mogelijk om op één van beide, of beide manieren verder te gaan. De veiligheidscoëfficiënt die voor optie a nodig is, kan afgeleid worden op basis van het doorrekenen van een aantal voorbeelddijken. Voor elk van deze voorbeelddijken wordt de toplaagdikte van de steenzetting berekend met het gekalibreerde rekenmodel enerzijds en met een probabilistische variant anderzijds. Die probabilistische variant van het rekenmodel is niets anders dan een simpele rekenschil rond het rekenmodel waarmee een Monte Carlo simulatie wordt uitgevoerd door de ontwikkelaars. Dit is zeer rekenintensief, maar dat is geen bezwaar voor dit beperkte aantal voorbeelddijken. De verhouding tussen de benodigde toplaagdikte volgens het rekenmodel en die volgens de probabilistische berekeningen geeft de benodigde veiligheidscoëfficiënt. Deze veiligheidscoëfficiënt wordt toegevoegd aan het model, waarmee een semi-probabilistisch model ontstaat.

In optie b wordt een probabilistisch rekenmodel ontwikkeld waarmee de gebruiker een realistische faalkans voor een steenzetting kan uitrekenen. Hiervoor dient een gebruikersvriendelijk en robuust probabilistisch rekenmodel ontwikkeld te worden. Dit is daardoor een aanzienlijk grotere inspanning dan optie a. Probabilistisch rekenen toegankelijk maken voor gebruikers vraagt niet alleen meer van de software, maar ook van de gebruikers. In een semi-probabilistische rekenmodel (zoals Steentoets) hoeven gebruikers uitsluitend rekenwaarden zonder spreidingsmaat op te geven, waarbij die rekenwaarden in de praktijk veelal relatief makkelijk ingeschat of gemeten kunnen worden op basis van vastgelegde vuistregels. Echter, bij een probabilistisch rekenmodel moeten gebruikers zelf de spreiding in relevante eigenschappen kunnen opgeven. Er dienen handvatten gegeven te worden over hoe dit gekozen dient te worden, zodat gebruikers de juiste gemiddelde waarden en spreiding kunnen invullen voor hun specifieke situatie. Verder kosten probabilistische berekeningen meer rekentijd en zijn ze mogelijk ook ingewikkelder om te interpreteren. Daarentegen leveren deze berekeningen precies wat nodig is om de faalkans van de dijk te beoordelen. Overigens wordt opgemerkt dat wanneer probabilistische software goed is ontworpen, gebruikers nauwelijks geconfronteerd hoeven te worden met de toegenomen complexiteit van de rekenmethode.

## 4 Rekenmodel

### 4.1 Algemeen

Voor het doorrekenen van steenzettingen wordt momenteel gebruikgemaakt van het rekenmodel Steentoets ([2] en [3]). Eén van de nadelen van Steentoets is echter dat het niet geschikt is voor het uitvoeren van tijdsafhankelijke berekeningen, waardoor het niet goed meer aansluit op de huidige wensen ten aanzien van het beoordelen en ontwerpen van steenzettingen. In combinatie met andere belangrijke nadelen op het gebied van onder andere cybersecurity en onderhoudbaarheid van de code is besloten nieuwe software te ontwikkelen voor het tijdsafhankelijk doorrekenen van steenzettingen.

Een eerste opzet voor het nieuwe rekenmodel (hierna aangeduid als 'rekenmodel') is uitgewerkt in het in 2024 opgestelde rapport '*Tijdsafhankelijk rekenmodel voor steenzettingen*' ([1]), met daarin onder andere een voorstel voor het tijdsafhankelijke aspect. In het rekenmodel wordt deels gebruikgemaakt van bestaande formules uit Steentoets. Indien formules of grotere delen uit Steentoets één op één toegepast kunnen worden in het rekenmodel, dan wordt in [1] doorgaans volstaan met een verwijzing naar de betreffende gedeeltes in de documentatie van Steentoets [2]. Opgemerkt wordt dat het rekenmodel zich in het huidige stadium van de ontwikkeling beperkt tot het berekenen van de stabiliteit van steenzettingen in golfaanval (mechanisme ZTG). Andere faalmechanismen zijn vooralsnog geen onderdeel van het rekenmodel.

Ten behoeve van het kalibreren van het rekenmodel (Hoofdstuk 5) en het kwantificeren van de modelonzekerheid (Hoofdstuk 6) zijn de formules van het rekenmodel geprogrammeerd in Matlab (hierna aangeduid als 'Matlab-model' indien specifiek deze Matlab-versie van het rekenmodel bedoeld wordt). Een belangrijk neven doel van dit Matlab-model is het controleren van de inpasbaarheid van afgeleide en nog af te leiden formules in het totale rekenmodel.

De ontwikkeling van het Matlab-model beperkt zich in eerste instantie tot relatief eenvoudige situaties en dijkprofielen, maar strekt ver genoeg voor het voldoende accuraat kunnen narekenen van de meeste Deltagootproeven, teneinde het rekenmodel te kunnen kalibreren en de modelonzekerheid te kunnen bepalen. Indien gewenst kan het toepassingsgebied van het Matlab-model in de loop der tijd verder worden uitgebreid. Het huidige toepassingsgebied van het Matlab-model, zoals gehanteerd voor het voorliggende rapport, is toegelicht in Paragraaf 4.3.

Recente kennisontwikkeling en nieuwe inzichten hebben geleid tot enkele aanpassingen in het rekenmodel ten opzichte van [1]. In het voorliggende rapport is gebruikgemaakt van het rekenmodel, inclusief die nieuwe aanpassingen. De aanpassingen ten opzichte van [1] zijn beschreven in Paragraaf 4.4 van het voorliggende rapport. Waar nodig zijn de aanpassingen ook doorgevoerd in het gebruikte Matlab-model.

### 4.2 Structuur van het Matlab-model

Het reken- en Matlab-model zijn opgebouwd uit verschillende modules, die elk een deel van het rekenproces uitvoeren. Elk van de modules ontvangt bepaalde invoer, voert een deel van het rekenproces uit en geeft vervolgens specifieke uitvoer terug. Deze modulaire opbouw heeft tot doel het rekenmodel overzichtelijk te houden en toekomstige aanpassingen relatief eenvoudig in het rekenmodel te kunnen implementeren.

## 4.3 Toepassingsgebied van het Matlab-model

Gedurende de ontwikkeling van het reken- en Matlab-model wordt stapsgewijs het toepassingsgebied vergroot. Omdat het Matlab-model in feite slechts een hulpmiddel is voor de ontwikkeling van het daadwerkelijke rekenmodel, is het toepassingsgebied van het Matlab-model beperkter dan dat van het rekenmodel en afhankelijk van de noodzaak op het betreffende moment.

Het toepassingsgebied van het reken- en Matlab-model beperkt zich momenteel tot relatief eenvoudige situaties en dijkprofielen, maar is groot genoeg voor het narekenen van Deltagootproeven met één bekledingssegment met niet geklemde zetstenen, dat strekt van voldoende ver onder water tot voldoende ver boven water, bij gelijkblijvende hydraulische belastingen. Met dit toepassingsgebied kunnen de meeste Deltagootproeven voorlopig voldoende accuraat nagerekend worden, teneinde het model te kalibreren (Hoofdstuk 5) en de modelonzekerheid te kwantificeren (Hoofdstuk 6) voor niet geklemde zetstenen. Opgemerkt wordt dat de relatief eenvoudige geometrieën en belastingssituaties van de beschouwde Deltagootproeven invloed hebben op het toepassingsgebied van de uiteindelijk afgeleide modelonzekerheid. Bij situaties buiten het beschouwde gebied (zoals schuine golfaanval, meer steenzettingsegmenten, overgangen, etc.) zal een aanvullende modelonzekerheid in rekening gebracht moeten worden. Om die te bepalen is, indien data ontbreekt, beroep op engineering judgement nodig.

Deze paragraaf geeft een overzicht van de verschillen tussen het gebruikte Matlab-model en de beoogde eindsituatie van het rekenmodel. In het Matlab-model ontbreken ten opzichte van het uiteindelijke rekenmodel vooralsnog tenminste de volgende onderdelen:

1. Alle faalmechanismen anders dan toplaaginstabiliteit door golfaanval  
Vooralsnog kan met het Matlab-model uitsluitend de toplaagstabiliteit in golfaanval doorgerekend worden. In het Matlab-model ontbreken andere faalmechanismen zoals afschuiving, toplaaginstabiliteit door stroming, uitspoeling vanuit de ondergrond en uitspoeling vanuit het granulaire filter. Doordat het voorliggende rapport specifiek betrekking heeft op de verplaatsing van zetstenen door golfaanval vormt dit geen probleem.
2. De mogelijkheid om te rekenen met klemming (ofwel:  $\phi_{\text{klem}}$  wordt nog niet berekend)  
Nieuwe formules voor het rekenen met klemming in een steenzetting zijn momenteel nog in ontwikkeling. In het Matlab-model is conform [1] aangehouden dat altijd  $\phi_{\text{wr/klem}} = \phi_{\text{wr}}$ , waardoor het model wel geschikt is voor het doorrekenen van niet geklemde steenzettingen. In de toekomst moet in de formules dus nog  $\phi_{\text{klem}}$  verwerkt worden.
3. Formules voor  $k$  en  $k'$  (doorlatendheid van respectievelijk het filter en de toplaag)  
De doorlatendheid van het filter en de toplaag dienen vooralsnog met Steentoets berekend te worden, waarna de door Steentoets berekende  $k$  en  $k'$  ingevuld kunnen worden in de invoer van het Matlab-model. De waarden voor  $k$  en  $k'$  zijn uitsluitend afhankelijk van geometrische eigenschappen en niet van hydraulische belastingen. Het is de bedoeling in het uiteindelijke rekenmodel de formules voor  $k$  en  $k'$  uit Steentoets over te nemen, waardoor het voor de voorliggende rapportage voldoende is om per Deltagootproef deze waarden eenmaal met Steentoets te berekenen en vervolgens als vaste invoerwaarden te gebruiken in het Matlab-model. De uitkomsten van het Matlab-model wijken daardoor niet af van het beoogde rekenmodel.
4. De mogelijkheid om te rekenen met twee filterlagen  
In het Matlab-model is conform [1] de formule voor de lek lengte vooralsnog uitsluitend geschikt voor één filterlaag. Mogelijk is het in de toekomst gewenst om te kunnen rekenen met twee filterlagen. Voor het narekenen van Deltagootproeven is het Matlab-model met één filterlaag voldoende.

5. De mogelijkheid om meerdere steenzettingsegmenten in te voeren

In het Matlab-model kan momenteel één recht steenzettingsegment ingevoerd worden, omdat het rekenmodel vooralsnog niet ver genoeg is ontwikkeld om te kunnen rekenen met meerdere segmenten. Eén van de aspecten daarvan is dat in het Matlab-model uitsluitend gebruikgemaakt wordt van de taludhelling  $\tan\alpha$ , terwijl in Steentoets en de beoogde eindsituatie van het rekenmodel op veel plaatsen ook gerekend wordt met de fictieve taludhelling  $\tan\alpha_{\text{fict}}$ . De fictieve taludhelling betreft een representatieve waarde voor de taludhelling in het geval meerdere segmenten met verschillende taludhellingen aanwezig zijn.

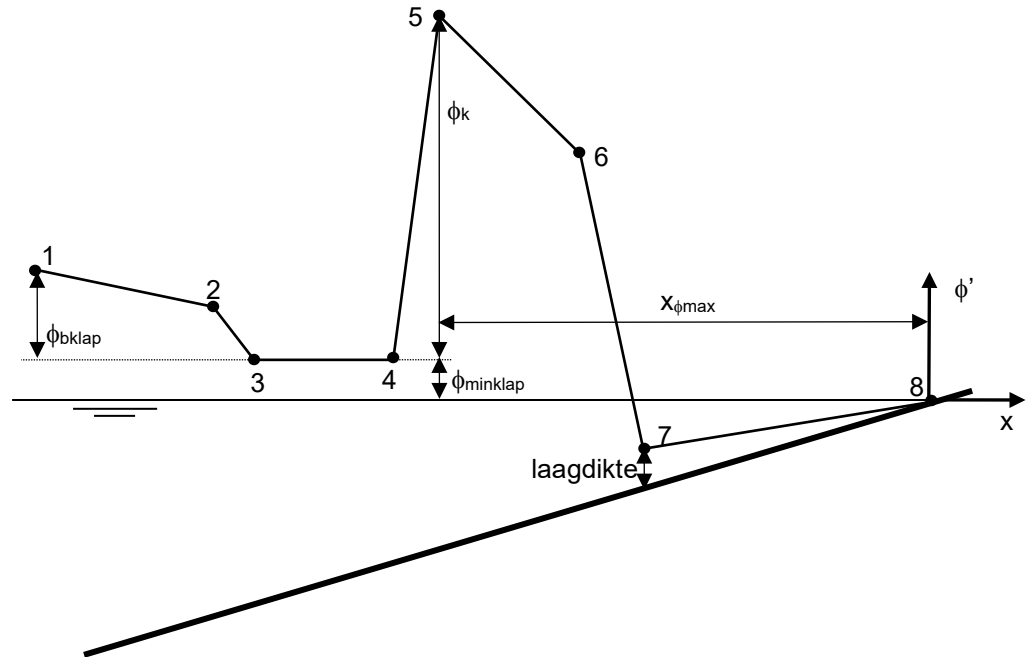
Bij de meeste beschouwde Deltagootproeven is van deze beperking van het Matlab-model geen invloed op het resultaat van de analyse te verwachten, omdat het steenzettingsegment, waarop de golfbelasting aangreep, het enige of het hoogst gelegen steenzettingsegment in de modelopstelling was en omdat, in geval van een berm, de waterstand meestal ruim lager was dan die berm. Bij een deel van de Deltagootproeven uit 1997-1998 (allemaal uitgevoerd met een berm op +5,0 m boven de gootbodem, [7]) was de waterstand echter ongeveer gelijk aan de berm of slechts iets lager dan de berm en kan er een naar verwachting zeer geringe invloed zijn op het resultaat. Daarom wordt aanbevolen de modelkalibratie en kwantificering van de modelonzekerheid nog eens te verifiëren als in een later stadium het reken- en Matlab-model hier wel geschikt voor zijn.

6. Er wordt geen rekening gehouden met overgangen

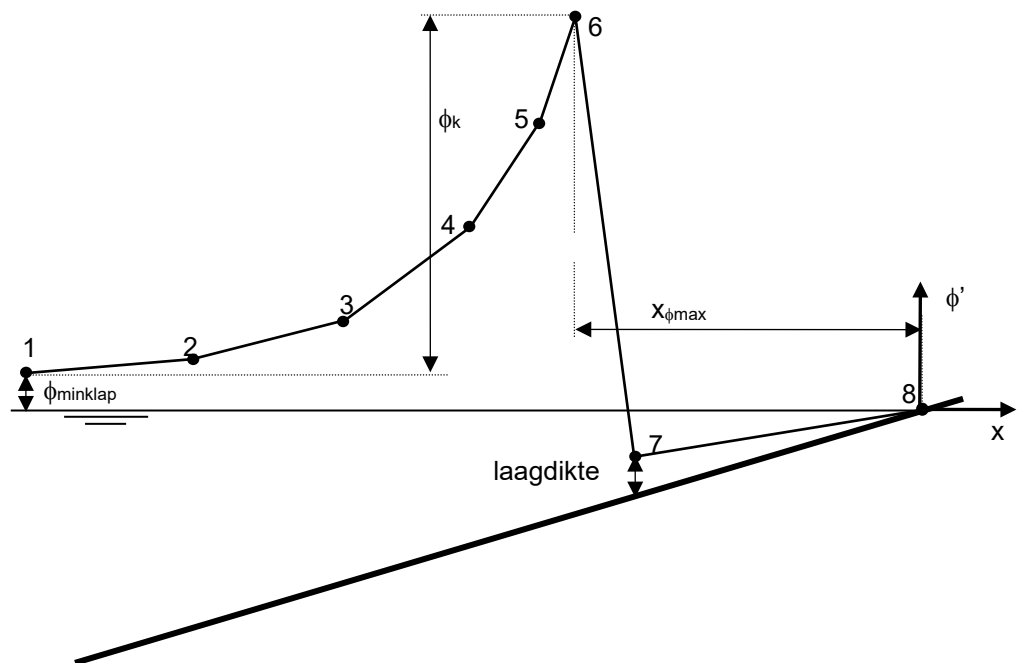
In het Matlab-model wordt vooralsnog geen rekening gehouden met overgangen, waardoor onder andere sprake is van de volgende aspecten:

- Geen aanpassing van het stijghoogteverschil nabij overgangen.
- Geen verplaatsing van de karakteristieke punten van het stijghoogteverloop op de toplaag nabij overgangen.
- In het Matlab-model wordt ervan uitgegaan dat het maximale opwaartse stijghoogteverschil altijd optreedt in punt 4 (indien belastinggeval K1Z) of punt 7 (indien belastinggeval K2, HF of SF) van het geschematiseerde stijghoogteverloop (zie ter info Figuur 4.1 tot en met Figuur 4.3 voor de tot 8 punten geschematiseerde stijghoogteverlopen op de toplaag voor de vier belastinggevallen. De stijghoogteverlopen zijn gedetailleerd beschreven in [2]). Zolang er geen overgang binnen het bereik van de geschematiseerde stijghoogteverlopen ligt (zoals bij vrijwel alle Deltagootproeven het geval is), dan is dat conform Steentoets en de beoogde eindsituatie van het rekenmodel, maar als daar wél een overgang ligt, dan vormt dit mogelijk een verschil.

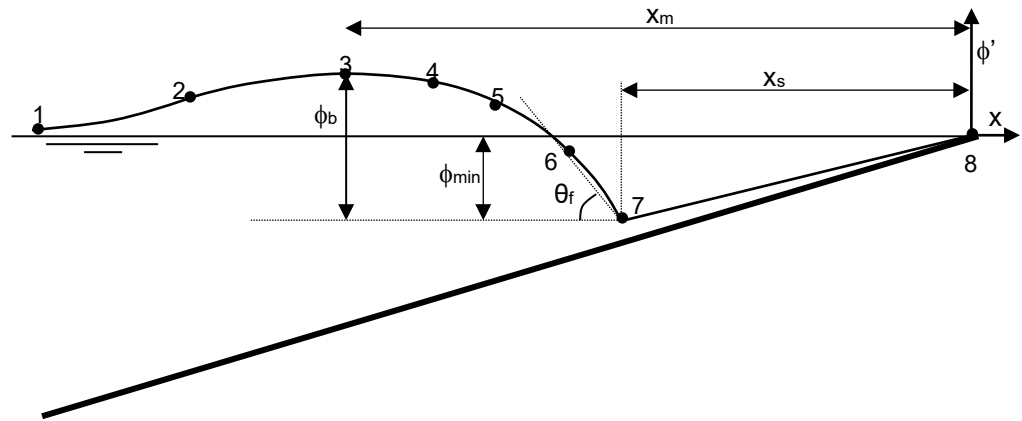
Voor het doorrekenen van vrijwel alle Deltagootproeven zal het buiten beschouwing laten van overgangen geen probleem vormen, omdat tijdens Deltagootproeven de relevante belasting doorgaans ruim tussen de boven- en ondergrens van het steenzettingsegment valt.



Figuur 4.1 Geschematiseerd stijghoogteverloop op de toplaag tijdens golfklaptype 1 (K1). In het reken- en Matlab-model wordt uitsluitend de zeezijde van golfklaptype 1 beschouwd (K1Z). In het Matlab-model is ervan uitgegaan dat het maximale stijghoogteverschil dan altijd optreedt in punt 4.



Figuur 4.2 Geschematiseerd stijghoogteverloop op de toplaag tijdens golfklaptype 2 (K2). In het Matlab-model is ervan uitgegaan dat het maximale stijghoogteverschil altijd optreedt in punt 7.



Figuur 4.3 Geschematiseerd stijghoogteverloop op de toplaag tijdens het hoge stijghoogtefront (HF) en het steile stijghoogtefront (SF). In het Matlab-model is ervan uitgegaan dat het maximale stijghoogteverschil altijd optreedt in punt 7.

7. Formules voor het doorrekenen van 'black box' steenzettingstypen  
Bijzondere steenzettingstypen, die in Steentoets worden doorgerekend met de zogenoemde black box formules worden vooralsnog buiten beschouwing gelaten in het voorliggende rapport.
8. Waarden voor coëfficiënt  $\zeta$  voor een deel van de zetsteentypen  
Coëfficiënt  $\zeta$  betreft de aqua-planing-factor met betrekking tot wrijving tussen de stenen zoals beschreven in Paragraaf 3.3.3 van [1]. In [1] zijn vooralsnog slechts waarden gegeven voor rechthoekige betonblokken ( $\zeta = 0,7$ ) en voor basalt, Basalton<sup>®</sup>, Quattroblock en RONA<sup>®</sup>ton XL ( $\zeta = 0$ ). Voor het voorliggende rapport is specifiek de factor  $\zeta = 0,7$  voor rechthoekige betonblokken relevant. Voor toplaagtypen, waarvoor de aqua-planing-factor nog niet in [1] is gegeven, dient die in een later stadium vastgelegd te worden.
9. De mogelijkheid om het dijkprofiel door te rekenen in afzonderlijke (smalle) stroken  
Voor het narekenen van Deltagootproeven is het doorrekenen van afzonderlijke stroken niet noodzakelijk, mits sprake is van een constante waterstand, constante golfcondities en mits het maximale stijghoogteverschil over de toplaag voldoende ver optreedt van de boven- en ondergrens van het steenzettingsegment. In [1] zijn wel handvatten geboden om rekenen in stroken mogelijk te maken, maar voor de huidige studie was implementatie hiervan in het Matlab-model (nog) niet noodzakelijk.
10. De mogelijkheid om te rekenen met variërende waterstand, golfhoogte en golfperiode gedurende een storm  
Voor het narekenen van vrijwel alle Deltagootproeven is dit niet noodzakelijk geacht (zie ook Paragraaf 5.1). In het Matlab-model is uitgegaan van een constante waterstand, golfhoogte en piekperiode.
11. De mogelijkheid om te rekenen met tijdstappen  
Samenhangend met het ontbreken van de mogelijkheid om te rekenen met afzonderlijke stroken en een variërende waterstand, golfhoogte en golfperiode is het niet nodig om te rekenen met afzonderlijke tijdstappen. De wijze waarop in het Matlab-model wel rekening wordt gehouden met de belastingduur is uitgewerkt in Paragraaf 4.4.5.
12. De mogelijkheid om  $T_{m-1,0}$  in te voeren in plaats van  $T_p$   
Momenteel kan uitsluitend  $T_p$  ingevoerd worden als maat voor de golfperiode.

13. De mogelijkheid om te rekenen met schuine golfval

Voor het narekenen van Deltagootproeven, waar altijd sprake is van loodrechte golfval, vormt dit geen probleem.

14. Checks en aanpassingen in overige uitzonderlijke gevallen en invoervalidatie

Voor het narekenen van Deltagootproeven vormt dit geen probleem, omdat uitsluitend Deltagootproeven nagerekend worden, waarbij dit niet van toepassing is.

Een relevant aspect dat niet thuishoort in de voorgaande lijst met verschillen ten opzichte van de beoogde eindsituatie van het rekenmodel, maar dat wel een significant verschil vormt ten opzichte van Steentoets, betreft de in [1] toegelichte keuze om belastinggeval 'golfklaptype 1 landzijde' (K1L) niet in het nieuwe rekenmodel op te nemen. In [1] was geconcludeerd dat dit belastinggeval naar verwachting zelden tot nooit maatgevend is.

## 4.4 Aanpassingen in het rekenmodel ten opzichte van [1]

De eerste opzet voor het rekenmodel voor de stabiliteit van steenzettingen in golfaanval is uitgewerkt in [1]. Recente kennisonwikkeling en nieuwe inzichten hebben echter geleid tot enkele aanpassingen in het rekenmodel ten opzichte van [1]. Voor het bepalen van de modelkalibratie en het kwantificeren van de modelonzekerheid in het voorliggende rapport is gebruikgemaakt van het rekenmodel, inclusief die nieuwe aanpassingen. De aanpassingen ten opzichte van [1] zijn beschreven in deze paragraaf. Waar nodig voor het doel van het voorliggende rapport zijn de aanpassingen ook doorgevoerd in het gebruikte Matlab-model.

### 4.4.1 Eigen gewicht van de zetsteen

In Paragraaf 3.3.1 van [1] zijn formules beschreven met betrekking tot het eigengewicht van de zetstenen. De formules voor het onderwatergewicht van de zetsteen  $G$  en opwaartse kracht  $W$  (respectievelijk Formule 3.14 en 3.15 in [1]) vormen de uitgangspunten voor de afleiding van de formule voor  $\phi_{eg}$  (Formule 3.17 in [1]). Bovendien worden  $G$  en  $W$  gebruikt in de afleiding van de formules met betrekking tot de wrijving van een losse zetsteen in Paragraaf 3.3.3 van [1].

In de formules voor  $G$  en  $W$  wordt gebruikgemaakt van het open oppervlak  $\Omega$  van de steenzetting, met als doel ervoor te zorgen dat uitsluitend de zetstenen zelf beschouwd worden en niet de ruimte tussen de zetstenen. Dat wordt gedaan vanuit de aanname dat ter plaatse van de open ruimte tussen de zetstenen geen opwaartse kracht op de zetstenen optreedt als gevolg van het stijghoogteverschil over de toplaag. De Formules 3.14 en 3.15 in [1] voor  $G$  en  $W$  zijn als volgt:

$$\text{Formule 3.14 uit [1]:} \quad G = \Delta \cdot D \cdot B \cdot L \cdot \rho \cdot g \cdot (1 - \Omega) \quad (4.1)$$

$$\text{Formule 3.15 uit [1]:} \quad W = \phi_t \cdot B \cdot L \cdot \rho \cdot g \cdot (1 - \Omega) \quad (4.2)$$

Met:

$B$  = breedte van de zetsteen (m)

$D$  = dikte/hogte van de zetsteen (m)

$g$  = versnelling van de zwaartekracht ( $m/s^2$ )

$G$  = onderwatergewicht van de zetsteen (N)

$L$  = lengte van de zetsteen (m)

$W$  = opwaartse kracht als gevolg van het stijghoogteverschil over de zetsteen [N]

$\Delta$  =  $(\rho_z - \rho)/\rho$  = relatieve dichtheid van de zetsteen (-)

$\phi_t$  = stijghoogteverschil over de zetsteen (m)

$\rho$  = soortelijke dichtheid van water ( $kg/m^3$ )

$\rho_z$  = soortelijke dichtheid van het materiaal waarvan de zetsteen gemaakt is ( $kg/m^3$ )

$\Omega$  = fractie open oppervlak van de steenzetting (-)

Geconstateerd is dat deze formules uitsluitend correct zijn als B en L de *hart-op-hart afstand* van de zetstenen in de steenbekleding zouden betreffen. Doordat B en L echter *steenafmetingen* betreffen, wordt in de formules van [1] het open oppervlak van het zetsteenoppervlak afgetrokken en dat is niet correct. Het open oppervlak  $\Omega$  dient daarom uit de formules verwijderd te worden. In het vervolg wordt daarom uitgegaan van de volgende aangepaste formules:

$$G = \Delta \cdot D \cdot B \cdot L \cdot \rho \cdot g \quad (4.3)$$

$$W = \phi_t \cdot B \cdot L \cdot \rho \cdot g \quad (4.4)$$

Opgemerkt wordt dat de formule voor  $\phi_{eg}$  (Formule 3.17 in [1]) verder niet verandert, doordat voorheen de term  $(1-\Omega)$  al werd weggedeeld in de afleiding van Formule 3.17 in [1].

Opgemerkt wordt dat bij rechthoekige betonblokken duidelijk is op welke fysieke afmetingen B en L betrekking hebben. Zuilen hebben daarentegen doorgaans echter geen rechthoekig oppervlak. Om een groot aantal formules in [1], waarin B en L voorkomen, ook te kunnen gebruiken voor zuilen dient binnen het rekenmodel nog nader gespecificeerd te worden waarop B en L bij zuilen exact betrekking hebben.

#### 4.4.2 Wrijving

In Paragraaf 3.3.3 van [1] zijn formules ten aanzien van de wrijving van losse zetstenen beschreven. Eén van de parameters daarin is de wrijvingscoëfficiënt tussen de zetstenen ( $f_b$ ). In [1] is voor de wrijvingscoëfficiënt van zetstenen echter geen waarde gegeven. Er is voor gekozen om  $f_b = 0,5$  aan te houden, zoals momenteel ook gebruikt wordt in Steentoets. Deze waarde is in het verleden experimenteel vastgesteld in Bijlage B van [4].

Verder zijn in de criteria van de resulterende wrijvingsformules (Paragraaf 3.3.3.3 van [1]) uitsluitend groter- en kleiner-dan-tekens gebruikt. Voor correct gebruik dient een deel daarvan vervangen te worden door groter- en/of kleiner-dan-of-gelijk-aan-tekens. Er is voor gekozen de tekens te plaatsen zoals onderstaand, omdat dit aansluit op Steentoets en het meest voor de hand ligt. De wrijvingscoëfficiënt  $f_b$  betreft in Bijlage B van [4] immers de waarde waarbij het schuiven van de zetstenen start en dus ook al optreedt:

- Als  $D/B \geq f_b$ , dan:  
zal de zetsteen gaan schuiven.
- Als  $D/B < f_b$  en  $(\zeta D)/B < \tan \alpha$ , dan:  
zal de zetsteen kantelen en vervolgens schuiven.
- Als  $D/B < f_b$  en  $(\zeta D)/B \geq \tan \alpha$ , dan:  
zal de zetsteen kantelen en vervolgens terug kantelen en tussen zijn burens uit wrikken.

Met:

$f_b$  = wrijvingscoëfficiënt tussen de zetstenen (-)

$\alpha$  = taludhelling (°)

$\zeta$  = aqua-planing-factor ten aanzien van wrijving tussen de stenen (-)

In aanvulling op de bovengenoemde tekens is ook het teken van Formule 3.42 van [1] aangepast. In Formule 3.42 van [1] wordt bedoeld dat  $\phi_{wr}$  iets groter moet zijn dan de waarde die volgt uit het rechter deel van de formule om een zetsteen heen en terug te laten kantelen en vervolgens tussen de burens uit te laten wrikken. Om te kunnen rekenen en omdat  $\phi_{wr}$  conservatiever is voor het eindresultaat van het rekenmodel naarmate die kleiner is, is het groter-dan-teken vervangen door een is-gelijk-teken. Dat resulteert in de volgende aangepaste formule:

$$\phi_{wr} = \frac{D}{B} \cdot \tan \alpha \cdot \phi_{eg} \quad (4.5)$$

Met:

$\phi_{wr}$  = stijghoogteverschil overeenkomend met de wrijving van een losse zetsteen (m)

$\phi_{eg}$  = stijghoogteverschil overeenkomend met het eigengewicht van de zetsteen (m)

#### 4.4.3 Resulterende formule voor $Y_{top}$

In Paragraaf 3.3 van [1] is toegewerkt naar een formule voor het berekenen van de opwaartse verplaatsing ( $Y_{top}$ ) van een niet geklemde zetsteen ten opzichte van de omliggende zetstenen. Het resultaat daarvan betreft Formule 3.56 van [1] (zie ook hieronder weergegeven in Formule (4.6)). Fysisch gezien betreft  $Y_{top}$  – gelet op de afleiding van de formule – de maximale opwaartse verplaatsing van een zetsteen tijdens één golf met een stijghoogte op de toplaag, die door 2% van de golven wordt overschreden (ofwel:  $Y_{top}$  betreft de maximale opwaartse verplaatsing van de zetsteen die ongeveer eens per 50 golven voorkomt aangezien  $Y_{top}$  de verplaatsing betreft na 1000 golven). In het rekenmodel wordt vervolgens aangenomen dat die momentopname van de verplaatsing tijdens een 2%-golf overeenkomt met de permanente verplaatsing van de zetsteen ten opzichte van de omliggende zetstenen na 1000 golven (1000 golven is het standaard beoogde aantal golven tijdens korteduurproeven in de Deltagoot).

Formule 3.56 uit [1]:

$$Y_{top} = \frac{\frac{9}{16} \cdot (\phi_w - \phi_{eg} - \phi_{wr/klem}) \rho g t_o^2}{(\rho_z + \rho) \cdot D + \left[ \frac{9}{16} \frac{D \sqrt{BL}}{1,5 \cdot t_o \pi k' \Lambda} \cdot \left( 0,56 + 0,18 \cdot \ln \left( \frac{\sqrt{BL}}{\Lambda} \right) \right) \right] \rho g t_o^2} \quad (4.6)$$

Waarin  $\phi_{wr/klem} = \phi_{wr}$  als er geen klemming is.

Met:

$Y_{top}$  = totale verplaatsing van de zetsteen ten opzichte van de omliggende zetstenen (positief = opwaarts) (m)

$\phi_w$  = stijghoogteverschil door de golfbelasting (zie [1]) (m)

$\phi_{eg}$  = stijghoogteverschil overeenkomend met het eigengewicht van de zetsteen (m)

$\phi_{wr/klem}$  = stijghoogteverschil overeenkomend met de wrijving van een losse zetsteen of de klemming (m)

$\phi_{wr}$  = stijghoogteverschil overeenkomend met de wrijving van een losse zetsteen (m)

$t_o$  = tijdsduur tijdens een golfklap of -front dat het stijghoogteverschil door de golfbelasting ( $\phi_w$ ) groter is dan het eigengewicht van de zetsteen (zie [1]) (s)

$k'$  = gelineariseerde doorlatendheid van de toplaag (m/s)

$\Lambda$  = lek lengte (zie [1]) (m)

Geconstateerd is dat de bovenstaande formule voor  $Y_{top}$  tot een negatief resultaat leidt als de term  $(\phi_w - \phi_{eg} - \phi_{wr/klem})$  kleiner wordt dan 0. Volgens de formule zakt de steen dan dus (soms vrij diep) het talud in, wat in werkelijkheid niet zal gebeuren. De zetsteen wordt immers tegengehouden door het granulaire filter. Om dit resultaat te voorkomen, is aan de formule een grens gesteld, die ervoor zorgt dat  $Y_{top}$  in het vervolg niet kleiner kan worden dan 0. Aangezien het resultaat van de term  $(\phi_w - \phi_{eg} - \phi_{wr/klem})$  in werkelijkheid wel negatief (neerwaarts) kan zijn, is de begrenzing niet gesteld aan deze ene term, maar aan de totale formule. Dat resulteert in de volgende aangepaste formule, waarin bovendien de parameter naam  $Y_{top}$  ter verduidelijking is vervangen door  $Y_{top,1000}$ :

$$Y_{top,1000} = \max \left( 0; \frac{\frac{9}{16} \cdot (\phi_w - \phi_{eg} - \phi_{wr/klem}) \rho g t_o^2}{(\rho_z + \rho) \cdot D + \left[ \frac{9}{16} \frac{D \sqrt{BL}}{1,5 \cdot t_o \pi k' \Lambda} \cdot \left( 0,56 + 0,18 \cdot \ln \left( \frac{\sqrt{BL}}{\Lambda} \right) \right) \right] \rho g t_o^2} \right) \quad (4.7)$$

Met:

$Y_{top,1000}$  = totale opwaartse verplaatsing van de zetsteen ten opzichte van de omliggende zetstenen na 1000 golven (m)

#### 4.4.4 Leklengte

In Paragraaf 3.4 van [1] is uitgelegd dat de bestaande leklengtetheorie, die momenteel wordt gebruikt in Steentoets, niet goed functioneert bij kleine leklengtes. Immers, naarmate de leklengte kleiner wordt, bijvoorbeeld door een meer doorlatende toplaag en/of een minder doorlatende filterlaag toe te passen, wordt het stijghoogteverschil bij een bepaalde golfbelasting steeds kleiner. Daarbij kan in de huidige leklengtetheorie en schematisering een punt bereikt worden waarbij het stijghoogteverschil zo klein is, dat een oneindig hoge stabiliteit wordt gesuggereerd, zelfs bij zeer grote golven. Dat maakt dat bij leklengtes kleiner dan een bepaalde waarde de stabiliteit van de steenzetting (sterk) wordt overschat.

In Paragraaf 3.4 van [1] was een suggestie gedaan voor een mogelijke verkleining van de problematiek, maar die blijkt nog niet voldoende toereikend. Daarom wordt ten behoeve van het voorliggende rapport in het reken- en Matlab-model in overleg met DGWB voorlopig toch nog gebruikgemaakt van de bestaande leklengtetheorie. Voor niet geklemde steenzettingen, die de scope van deze rapportage vormen, zijn de leklengtes vrij groot, waardoor de problematiek voor deze steenzettingen minder relevant is (in de Deltagootproeven, die voor de voorliggende analyse beschouwd zijn, geldt voor de dimensieloze leklengte: leklengte/toplaagdikte =  $\Lambda/D = 0,8$  à  $2,7$ ). In een later stadium van de softwareontwikkeling kan alsnog overwogen worden of een fundamentele aanpassing van de leklengtetheorie gewenst is. Samenhangend daarmee zijn dan mogelijk ook aanpassingen noodzakelijk in de schematiseringen van de stijghoogteverlopen op de toplaag (de 4 te beschouwen belastinggevallen: K1Z, K2, HF en SF).

#### 4.4.5 Kwantificering invloed belastingduur in relatie tot beschikbare Deltagootresultaten

##### 4.4.5.1 Problematiek

Hoofdstuk 4 van [1] is gericht op het bepalen van het zogenoemde degeneratieniveau na een bepaalde belastingduur ( $D_i$ ,  $D_{i-1}$  [-]) om te kunnen beoordelen of de steenzetting na die belastingduur nog steeds voldoet of niet meer. Een nadeel van het dimensieloze degeneratieniveau is dat het een relatief abstracte, niet direct fysiek tastbare parameter is, zoals wel het geval is bij bijvoorbeeld een opwaartse verplaatsing.

Voor het kalibreren van het rekenmodel (Hoofdstuk 5) en het bepalen van de modelonzekerheid (Hoofdstuk 6) is het noodzakelijk om de rekenmodelresultaten te kunnen vergelijken met Deltagootproefresultaten. Het is daarvoor van belang dat het rekenmodel een fysiek meetbaar resultaat oplevert, waarvan bovendien metingen beschikbaar zijn van Deltagootproeven uit het verleden. Twee fysiek meetbare resultaten van Deltagootproeven, die doorgaans goed zijn gedocumenteerd, zijn:

- *Vervorming van het talud:*  
Dit betreft het S-profiel (de zogenoemde ‘kattenrug’) dat in de steenzetting kan ontstaan tijdens golfaanval. Dit type vervorming van het talud is echter specifiek relevant met betrekking tot geklemde steenzettingen en is daarmee geen geschikte vergelijkingsparameter voor het narekenen van niet geklemde steenzettingen.
- *Opwaartse verplaatsing van afzonderlijke zetstenen:*  
Dit betreft de opwaartse verplaatsing van afzonderlijke zetstenen ten opzichte van de omliggende zetstenen. Deze opwaartse verplaatsing is wél relevant voor niet geklemde steenzettingen en is daarmee een geschikte vergelijkingsparameter voor het narekenen van Deltagootproeven met niet geklemde steenzettingen.

Er is voor gekozen het rekenmodel en de Deltagootproeven te vergelijken op basis van de opwaartse verplaatsing van afzonderlijke zetstenen, mede omdat het in [1] opgezette rekenmodel daar al een belangrijk component voor bevat, namelijk de formule voor  $Y_{top,1000}$  (Formule 3.56 uit [1], die met ingang van het voorliggende rapport is vervangen door de verbeterde Formule (4.7) in Paragraaf 4.4.3). Deze formule voor  $Y_{top,1000}$  (de te kalibreren basisformule) berekent de opwaartse verplaatsing, die van toepassing wordt geacht op de situatie na 1000 golven (zie ook Paragraaf 4.4.3).

Opgemerkt wordt dat er geen continue metingen beschikbaar zijn van verplaatsingen van stenen gedurende Deltagootproeven. De golfaanval verhindert visuele waarnemingen tijdens de proeven, en instrumentatie aanbrengen op afzonderlijke stenen is ondoenlijk omdat vooraf niet bekend is welke steen het meest gaat verplaatsen. Deltagootproeven worden daarom periodiek onderbroken om metingen te verrichten. Omdat tijdens Deltagootproeven de opwaartse verplaatsing van afzonderlijke zetstenen slechts op bepaalde momenten is gemeten, en vanzelfsprekend vrijwel nooit na exact 1000 golven, moet de  $Y_{top,1000}$  omgerekend kunnen worden naar een  $Y_{top}$  na N golven, namelijk  $Y_{top,N}$ . Bij de modelkalibratie en bepaling van de modelonzekerheid kan dan de berekende  $Y_{top,N}$  uit het rekenmodel vergeleken worden met de gemeten opwaartse verplaatsing na N golven tijdens de Deltagootproeven. Opgemerkt wordt dat het verkrijgen van  $Y_{top,N}$  als uitvoer bovendien ook een zeer bruikbare koppeling vormt tussen het rekenmodel en de Deltagoot (en werkelijke steenzettingen op dijken) voor toekomstig steenzettingonderzoek en voor toekomstige gebruikers.

De nieuwe formule voor het berekenen van  $Y_{top,N}$  is afgeleid in Paragraaf 4.4.5.2. Deze formule voor  $Y_{top,N}$  is echter, net als de formule voor  $Y_{top,1000}$ , uitsluitend geschikt voor een constante waterstand en golfcondities. Dat volstaat voorlopig voor het narekenen van de meeste Deltagootproeven, maar voor een toekomstige bredere toepassing van het rekenmodel is het wenselijk de opwaartse verplaatsing van zetstenen ook te kunnen berekenen bij een variërende waterstand en golfcondities. Deze uitbreiding valt echter buiten de scope van het voorliggende rapport en kan in een later stadium uitgewerkt worden.

#### 4.4.5.2 Formule voor het berekenen van $Y_{top,N}$ bij constante waterstand en golfcondities:

Voor het afleiden van de formule voor  $Y_{top,N}$  zijn de in [1] afgeleide formules het uitgangspunt. Een aantal formules en criteria uit [1] is voor de afleiding relevant. Door die formules te combineren en om te schrijven wordt toegewerkt naar de formule voor  $Y_{top,N}$ . Het gaat om de volgende formules en criteria uit [1]:

- Eén van de parameters die een rode draad vormt in Hoofdstuk 4 van [1] is de stabiliteitsparameter  $F'$ . Voor  $F'$  geldt de volgende formule:

$$\text{Formule 4.4 uit [1]:} \quad F' = \frac{H_{m0}}{\Delta D} \cdot \xi_{op}^{-m} \quad (4.8)$$

Waarin voor de macht  $m$  de volgende waarden zijn bepaald in [1]:

- Blokken op hun kant en hergebruikte Hydroblocks:
  - $m = -0,75$  voor  $1,2 < \xi_{op} < 2,5$
- Overige moderne steenzettingen (zoals Hydroblocks en Basalton) en basalt:
  - $m = -0,3$  voor  $1,2 < \xi_{op} < 2$
  - $m = 0,5$  voor  $2 \leq \xi_{op} < 2,5$

Met:

$F'$  = stabiliteitsparameter (-)

$H_{m0}$  = significante golfhoogte (m)

$\Delta$  =  $(\rho_z - \rho)/\rho$  = relatieve dichtheid van de zetsteen (-)

$\rho$  = soortelijke dichtheid van water ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_z$  = soortelijke dichtheid van het materiaal waarvan de zetsteen gemaakt is ( $\text{kg/m}^3$ )

$D$  = toplaagdikte (m)

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

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

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

$g$  = versnelling van de zwaartekracht ( $\text{m/s}^2$ )

$\alpha$  = taludhelling ( $^\circ$ )

- De in [1] afgeleide formules voor  $F'_N$ , waarmee de waarde van  $F'$  berekend kan worden bij een belastingduur van  $N$  golven:

Formules 4.5 en 4.6 uit [1] (voor blokken op hun kant en hergebruikte Hydroblocks):

- Als  $N \leq 10.000$ , dan:  $F'_N = F'_{1000} \cdot (2,65 - 0,55 \cdot \log(N))$  (4.9)

- Als  $N > 10.000$ , dan:  $F'_N = 0,45 \cdot F'_{1000}$  (4.10)

Formules 4.7 en 4.8 uit [1] (voor overige moderne steenzettingen (zoals Hydroblocks en Basalton) en basalt):

- Als  $N \leq 10.000$ , dan:  $F'_N = F'_{1000} \cdot (2,2 - 0,4 \cdot \log(N))$  (4.11)

- Als  $N > 10.000$ , dan:  $F'_N = 0,6 \cdot F'_{1000}$  (4.12)

Met:

$F'_N$  = waarde van  $F'$  bij een belastingduur van  $N$  golven (-)

$F'_{1000}$  = waarde van  $F'$  bij een belastingduur van 1000 golven (-)

$N$  = aantal golven (-)

- In Paragraaf 2.2.1 van [1] zijn criteria beschreven op basis waarvan wordt beoordeeld of een steenzetting als bezweken wordt beschouwd. Vanwege diverse vormen van degeneratie zijn meerdere criteria gegeven, waarvan het criterium ten aanzien van de opwaartse verplaatsing van afzonderlijke zetstenen als volgt is: wanneer de verplaatsing van een afzonderlijke zetsteen ten opzichte van de omliggende zetstenen meer is dan 20% van de toplaagdikte, dan wordt de steenzetting beschouwd als bezweken. Ten aanzien van de verplaatsing van afzonderlijke blokken in niet geklemde steenzettingen voldoet de steenzetting dus zolang  $Y_{top} < D/5$ .

Door deze formules, het schadecriterium en de aangepaste formule voor  $Y_{top,1000}$  (zie Formule (4.7)) te combineren, kan de formule voor  $Y_{top,N}$  afgeleid worden.

Op basis van het hierboven genoemde schadecriterium geldt voor de minimaal benodigde toplaagdikte  $D_{\text{benodigd}}$  (de toplaagdikte op de grens tussen wel en niet bezwijken) het volgende:

- Voor 1000 golven ( $N = 1000$ ):  $D_{\text{benodigd},1000} = 5 \cdot Y_{\text{top},1000}$  (4.13)
- Voor een willekeurig ander aantal golven:  $D_{\text{benodigd},N} = 5 \cdot Y_{\text{top},N}$  (4.14)

$Y_{\text{top},1000}$  is bekend (Formule (4.7)) en dus  $D_{\text{benodigd},1000}$  ook. Invullen van Formule (4.13) in Formule (4.8) geeft voor 1000 golven de volgende formule op het kantelpunt tussen wel en niet bezwijken:

$$F'_{1000} = \frac{H_{m0}}{\Delta \cdot 5 \cdot Y_{\text{top},1000}} \cdot \xi_{op}^{-m} \quad (4.15)$$

Evenzo kan ook Formule (4.14) ingevuld worden in Formule (4.8). Dat geeft voor  $N$  golven de volgende formule op het kantelpunt tussen wel en niet bezwijken:

$$F'_N = \frac{H_{m0}}{\Delta \cdot 5 \cdot Y_{\text{top},N}} \cdot \xi_{op}^{-m} \quad (4.16)$$

Voor de volgende stap zijn de Formules (4.9) tot en met (4.12) nodig, maar voor eenvoudiger gebruik zijn eerst de Formules (4.9) en (4.10) samengevoegd, evenals de Formules (4.11) en (4.12):

- Blokken op hun kant en hergebruikte Hydroblocks:

$$F'_N = F'_{1000} \cdot (2,65 - 0,55 \cdot \log(\min(N; 10000))) \quad (4.17)$$

- Overige moderne steenzettingen (zoals Hydroblocks en Basalton) en basalt:

$$F'_N = F'_{1000} \cdot (2,2 - 0,4 \cdot \log(\min(N; 10000))) \quad (4.18)$$

De volgende stappen van de afleiding zijn uitsluitend voor blokken op hun kant en hergebruikte Hydroblocks verder uitgeschreven. Voor de overige moderne steenzettingen en basalt zijn de stappen vergelijkbaar. Invullen van  $F'_{1000}$  (berekend met Formule (4.15)) in Formule (4.17) geeft het verband tussen  $F'_N$  en  $Y_{\text{top},1000}$ :

$$F'_N = \left( \frac{H_{m0}}{\Delta \cdot 5 \cdot Y_{\text{top},1000}} \cdot \xi_{op}^{-m} \right) \cdot (2,65 - 0,55 \cdot \log(\min(N; 10000))) \quad (4.19)$$

Vervolgens kan vanuit Formule (4.19) teruggerekend worden naar een formule voor  $Y_{\text{top},N}$ . De Formules (4.19) en (4.16), die beide een formule betreffen voor  $F'_N$ , worden daartoe als volgt aan elkaar gelijkgesteld:

$$\left( \frac{H_{m0}}{\Delta \cdot 5 \cdot Y_{\text{top},N}} \cdot \xi_{op}^{-m} \right) = \left( \frac{H_{m0}}{\Delta \cdot 5 \cdot Y_{\text{top},1000}} \cdot \xi_{op}^{-m} \right) \cdot (2,65 - 0,55 \cdot \log(\min(N; 10000))) \quad (4.20)$$

Na wegdelen blijft over:

$$\frac{1}{Y_{\text{top},N}} = \frac{1}{Y_{\text{top},1000}} \cdot (2,65 - 0,55 \cdot \log(\min(N; 10000))) \quad (4.21)$$

Ofwel:

$$Y_{\text{top},N} = \frac{Y_{\text{top},1000}}{2,65 - 0,55 \cdot \log(\min(N; 10000))} \quad (4.22)$$

Waarin  $Y_{top,1000}$  het resultaat is van Formule (4.7), ingevuld met de parameters, zoals aanwezig in de Deltagoot.

Met:

$Y_{top,N}$  = totale opwaartse verplaatsing van de zetsteen ten opzichte van de omliggende zetstenen na N golven (m)

$Y_{top,1000}$  = totale opwaartse verplaatsing van de zetsteen ten opzichte van de omliggende zetstenen na 1000 golven (m)

Merk op dat ook voor de minimaal benodigde toplaagdikte ( $D_{benodigd}$ ) dezelfde factor blijkt te gelden voor de vertaling van 1000 naar N golven. Dit wordt duidelijk wanneer de Formules (4.13) en (4.14) gecombineerd worden met Formule (4.22):

$$D_{benodigd,N} / 5 = \frac{D_{benodigd,1000} / 5}{2,65 - 0,55 \cdot \log(\min(N; 10000))} \quad (4.23)$$

Ofwel:

$$D_{benodigd,N} = \frac{D_{benodigd,1000}}{2,65 - 0,55 \cdot \log(\min(N; 10000))} \quad (4.24)$$

Met:

$D_{benodigd,N}$  = minimaal benodigde toplaagdikte bij N golven (m)

$D_{benodigd,1000}$  = minimaal benodigde toplaagdikte bij 1000 golven (m)

Uit de beschreven afleiding blijkt dat  $Y_{top,N}$  en  $D_{benodigd,N}$  evenredig zijn met elkaar en dat de stabiliteitsparameter  $F'_N$  omgekeerd evenredig is met  $Y_{top,N}$  en  $D_{benodigd,N}$ .

Conform de wijze waarop de Formules (4.22) en (4.24) zijn afgeleid voor blokken op hun kant en hergebruikte Hydroblocks, zo zijn voor de overige moderne steenzettingen (zoals Hydroblocks en Basalton) en basalt de volgende formules afgeleid:

$$Y_{top,N} = \frac{Y_{top,1000}}{2,2 - 0,4 \cdot \log(\min(N; 10000))} \quad (4.25)$$

$$D_{benodigd,N} = \frac{D_{benodigd,1000}}{2,2 - 0,4 \cdot \log(\min(N; 10000))} \quad (4.26)$$

Voor het kalibreren van het rekenmodel (Hoofdstuk 5) en het bepalen van de modelonzekerheid (Hoofdstuk 6) zijn specifiek de formules voor blokken op hun kant van toepassing.

#### 4.4.6 Bezwijkgolffhoogte bij belastingduur van 1000 golven

In paragraaf 4.5 van [1] wordt de bezwijkgolffhoogte bij een belastingduur van 1000 golven ( $H^*_{m0,1000}$ ) genoemd als benodigde invoer in diverse formules, maar daar is verder niet toegelicht hoe  $H^*_{m0,1000}$  berekend kan worden. De bezwijkgolffhoogte  $H^*_{m0,1000}$  betreft de significante golffhoogte die na 1000 golven leidt tot een opwaartse verplaatsing van afzonderlijke zetstenen, die precies zo groot is dat de steenzetting zich bevindt op het kantelpunt tussen wel en niet bezwijken. Ofwel,  $H^*_{m0,1000}$  betreft de significante golffhoogte, die resulteert in een  $Y_{top,1000}$  die exact gelijk is aan 20% van de toplaagdikte. Hieruit volgt dat  $H^*_{m0,1000}$  bepaald kan worden door iteratief voor diverse waarden van  $H_{m0}$  de  $Y_{top,1000}$  berekenen. De  $H_{m0}$  waarvoor geldt dat  $Y_{top,1000} = D/5$  betreft  $H^*_{m0,1000}$ .  $Y_{top,1000}$  wordt berekend met Formule (4.7) uit Paragraaf 4.4.3.

#### 4.4.7 Invloedsfactoren voor de belastingduur

De invloed van de belastingduur op de stabiliteit van steenzettingen wordt in het in [1] beschreven rekenmodel op een andere wijze verdisconteerd dan in Steentoets het geval is. In Steentoets wordt de invloed van de belastingduur verdisconteerd door het toepassen van een aantal invloedsfactoren voor de belastingduur, namelijk  $f_B$  en  $f_S$  (waarbij  $f_S$  is onderverdeeld in  $f_{S,front}$  en  $f_{S,klap}$ ):

- $f_B$  betreft de invloedsfactor ten aanzien van de belasting. Invloedsfactor  $f_B$  wordt gebruikt om de golfhoogte te vergroten, die gebruikt wordt bij het bepalen van de stijghoogteverlopen op de toplaag. Dit zorgt bij een toenemende belastingduur dus voor een vergroting van de belasting.
- $f_S$  is de invloedsfactor ten aanzien van de sterkte waarbij  $f_{S,front}$  gebruikt wordt bij een belasting door golffronten en  $f_{S,klap}$  bij een belasting door golfklappen. Invloedsfactor  $f_S$  ( $f_{S,front}$  en  $f_{S,klap}$ ) wordt gebruikt om de toplaagdikte te verkleinen. Dit zorgt bij een toenemende belastingduur dus voor een verlaging van de sterkte.

In het nieuwe rekenmodel is de invloed van de belastingduur op de stabiliteit daarentegen anders vormgegeven, namelijk door middel van de formules en het stappenplan zoals beschreven in Hoofdstuk 4 van [1]. Het gebruik van de invloedsfactoren  $f_B$  en  $f_S$  komt daarmee te vervallen. De invloedsfactoren  $f_B$  en  $f_S$  worden in het nieuwe rekenmodel dus niet langer berekend en invloedsfactor  $f_B$  vormt in het nieuwe rekenmodel dus geen onderdeel meer van de berekening van de stijghoogteverlopen.

# 5 Modelkalibratie

## 5.1 Werkwijze

Zoals beschreven in Hoofdstuk 3 wordt het rekenmodel gekalibreerd en wordt de globale modelonzekerheid gekwantificeerd via het doorlopen van een drietal stappen:

Kalibratie van het rekenmodel:

- Stap 1. Vergelijking van in de Deltagoot *gemeten* opwaartse verplaatsing van afzonderlijke zetstenen ( $Y_{\text{Deltagoot}}$ ) met door het rekenmodel *berekende* opwaartse verplaatsingen ( $Y_{\text{rekenmodel}}$ ). Daarbij is in het rekenmodel gebruikgemaakt van de in de Deltagoot gemeten hydraulische condities en steenzettingeigenschappen.
- Stap 2. Kalibratie van het rekenmodel op basis van de verhouding tussen  $Y_{\text{Deltagoot}}$  en  $Y_{\text{rekenmodel}}$  van de nagerekende Deltagootproeven. De verhouding tussen  $Y_{\text{Deltagoot}}$  en  $Y_{\text{rekenmodel}}$  heeft een gemiddelde en een spreiding. De gemiddelde verhouding tussen  $Y_{\text{Deltagoot}}$  en  $Y_{\text{rekenmodel}}$ , ook wel de bias van het model, wordt als kalibratiefactor opgenomen in het rekenmodel, waarna het rekenmodel de gemiddelde opwaartse verplaatsing na een Deltagootproef voorspelt.

Kwantificering van de globale modelonzekerheid:

- Stap 3. Kwantificeren van de globale modelonzekerheid op basis van de spreiding in de resultaten van Deltagootproeven ten opzichte van de (deterministische) resultaten van het rekenmodel. De globale modelonzekerheid betreft de standaardafwijking van de verhouding tussen  $Y_{\text{Deltagoot}}$  en  $Y_{\text{rekenmodel}}$ .

Het voorliggende hoofdstuk heeft betrekking op de stappen 1 en 2 (respectievelijk Paragraaf 5.2 en 5.3). Stap 3 is uitgewerkt in Hoofdstuk 6.

Zoals eerder toegelicht in Paragraaf 1.2 is in dit rapport de modelkalibratie en de kwantificering van de modelonzekerheid uitsluitend uitgevoerd met betrekking tot zogenoemd *los-blok-falen* in blokkensteenzettingen, zoals plat gezette betonblokken en blokken op hun kant. Los-blok-falen betreft de opwaartse verplaatsing van afzonderlijke zetstenen ten opzichte van omringende zetstenen. In een blokkensteenzetting gebeurt dat vaak zonder dat significante vervorming van het omringende taludoppervlak optreedt, doordat dit type steenzetting relatief weinig samenhang heeft. Er is wel *wrijving*, maar een relatief groot deel van de zetstenen ondervindt slechts weinig *klemming*. Dit in tegenstelling tot zuilensteenzettingen, waarin de onderlinge samenhang gewoonlijk veel groter is en er gewoonlijk wel eerst significante vervorming van het omringende talud optreedt, voordat één of meer zetstenen uit het talud komen. Een blokkensteenzetting wordt doorgaans aangeduid als een *niet geklemde* steenzetting en een zuilensteenzetting als een *geklemde* steenzetting.

Er is voor gekozen de modelkalibratie en kwantificering van de modelonzekerheid zo dicht mogelijk bij de basis van het rekenmodel uit te voeren, namelijk op basis van de in [1] afgeleide en in Paragraaf 4.4.3 nog enigszins aangepaste *centrale formule*, waarmee de opwaartse verplaatsing  $Y_{\text{top},1000}$  [m] na een belastingduur van 1000 golven berekend kan worden. Echter, opwaartse zetsteenverplaatsingen in de Deltagoot zijn soms gemeten na veel meer of minder dan 1000 golven. In Paragraaf 4.4.5 is daarom een formule afgeleid waarmee  $Y_{\text{top},1000}$  (na 1000 golven) vertaald kan worden naar  $Y_{\text{top},N}$  (na  $N$  golven), zie Formule (4.22). Deze formule is toegevoegd aan het reken- en Matlab-model.  $Y_{\text{top},N}$  betreft de verplaatsing waarmee  $Y_{\text{Deltagoot}}$  vergeleken dient te worden, ofwel:

$$Y_{\text{rekenmodel}} = Y_{\text{top},N}$$

Door gebruik te maken van  $Y_{top,N}$  wordt bij de modelkalibratie en kwantificering van de modelonzekerheid de invloed van de *belastingduur* zo goed mogelijk meegenomen.

Daarentegen is de invloed van *variërende waterstanden en golfcondities* vooralsnog buiten beschouwing gelaten. Het in [1] opgezette rekenmodel bevat weliswaar een stappenplan voor het berekenen van het *degeneratieniveau* van een steenzetting bij variërende waterstanden en golfhoogtes (mits de brekerparameter constant blijft, zoals genoemd in Paragraaf 4.5 van [1]), maar er is eerst een extra uitbreiding van dat stappenplan nodig om het ook geschikt te maken voor het berekenen van de *opwaartse verplaatsing* bij variërende waterstanden en golfcondities, waarbij bovendien ook de brekerparameter moet kunnen variëren. Samenhangend hiermee is ook een aanzienlijke uitbreiding van het Matlab-model nodig. Vanwege deze beperking van de huidige versie van het rekenmodel zijn opeenvolgende Deltagootproeven met verschillende waterstanden en golfcondities niet als samengestelde proef beschouwd (m.u.v. de langeduurproeven, die uitgevoerd zijn met vrijwel gelijke waterstand en golfcondities, zonder tussentijds herstel van eventuele verplaatsingen), maar als afzonderlijke proeven, ook als zetsteenverplaatsingen tussentijds niet zijn hersteld. Ter compensatie van de beperking van het rekenmodel is de analyse in het voorliggende rapport zo goed mogelijk gebaseerd op verplaatsingstoename tijdens de afzonderlijke proeven in plaats van op totale verplaatsingen ten opzichte van het begin van proevenseries. Interpretatie van de Deltagootmetingen is relatief lastig indien tijdens een proevenserie de waterstand en golfcondities stapsgewijs zijn aangepast zonder tussentijds herstel van eventuele verplaatsingen. In Bijlage A is daarom voor de beschouwde proeven toegelicht welke opwaartse verplaatsing, belastingduur en golfcondities gebruikt zijn in de analyse.

Tijdens proevenseries met een stapsgewijs aangepaste waterstand en golfhoogte (beide zijn doorgaans verhoogd) hebben voorgaande proeven met een lagere golfhoogte en een enigszins andere waterstand overigens maar een beperkte bijdrage aan de schade na daaropvolgende proeven. Dergelijke opeenvolgende proeven zijn om die reden ook in het verleden gewoonlijk als losstaande proeven beschouwd. Echter, omdat de voorgeschiedenis regelmatig toch wel enige invloed heeft op de schade na een bepaalde proef, is geprobeerd zoveel mogelijk gebruik te maken van de verplaatsingstoename gedurende een proef.

Wanneer in een later stadium het reken- en Matlab-model zodanig ver ontwikkeld zijn, dat gerekend kan worden met stroken, variërende waterstanden en golfcondities (inclusief variërende brekerparameter) wordt aanbevolen de modelkalibratie en kwantificering van de modelonzekerheid nog eens te verifiëren op basis van samengevoegde proeven met variërende waterstanden en golfcondities, in combinatie met de totale verplaatsingen ten opzichte van het begin van de proevenseries.

Het doel is de modelkalibratie zodanig uit te voeren, dat het rekenmodel aansluit op het gemiddelde van de Deltagootresultaten. Interpretatie van de opwaartse verplaatsing en bijbehorende belastingduur tijdens de Deltagootproeven is soms echter gecompliceerd en kent enkele risico's:

- Door de beperktheid van de informatie uit de oude rapporten kan abusievelijk de *totale verplaatsing* toegekend worden aan een proef (in plaats van slechts de verplaatsingstoename). Dat resulteert dan in een te grote  $Y_{Deltagoot}$ , waardoor het rekenmodel zodanig wordt gekalibreerd dat vervolgens een grotere  $Y_{rekenmodel}$  berekend wordt dan in werkelijkheid het geval zal zijn. Het rekenmodel zal daardoor iets te streng rekenen (veilig).
- Door het negeren van de voorgeschiedenis (in geval van korteduurproevenseries) kan onverhoopt een te korte belastingduur toegekend worden aan de opwaartse verplaatsingen in de Deltagoot. Dat resulteert in een te kleine  $Y_{rekenmodel}$ , waardoor een te grote kalibratiefactor toegevoegd zal worden aan het rekenmodel. Het rekenmodel zal in dat geval iets te streng rekenen (veilig).

Hoewel geprobeerd wordt het rekenmodel zo goed mogelijk te laten aansluiten op het gemiddelde van de metingen in de Deltagoot leiden de meest voordehand liggende interpretatiefouten dus eventueel tot een iets veiliger rekenmodel.

## 5.2 Vergelijking rekenmodelresultaten met Deltagootproeven (stap 1)

### 5.2.1 Gebruikte Deltagootonderzoeken

Ten behoeve van de voorliggende analyse zijn tientallen Deltagootproeven uit het verleden beschouwd, uitgevoerd op rechthoekige blokken en blokken op hun kant, al dan niet met afstandhouders, brede langs- of stootvoegen en/of inwasmateriaal in de brede voegen. De gebruikte proeven zijn uitgevoerd in de oude Deltagoot in de Noordoostpolder als onderdeel van de volgende Deltagootonderzoeken:

- Deltagootonderzoek 1997-1998:  
Binnen dit omvangrijke Deltagootonderzoek naar de stabiliteit van taludbekledingen zijn veel grootschalige golfproeven uitgevoerd in de periode 1997-1998. Deze golfproeven zijn beschreven in [7]. Binnen het onderzoek zijn verschillende typen steenzettingen onderzocht, waarvan de volgende modelopstellingen relevant zijn voor de voorliggende analyse:
  - Opstelling 5: Blokken op mijnsteen met uitvullaag.
  - Opstelling 6: Blokken op een filter met ondiepwater golfbelasting.
  - Opstelling 12a: Blokken op hun kant, koud tegen elkaar.
  - Opstelling 12c: Blokken op hun kant met brede langsvoeg, met ronde stalen.
  - Opstelling 12cc: Blokken op hun kant met brede langsvoeg, met platte plastic afstandhouders.
  - Opstelling 12cd: Blokken op hun kant met brede langsvoeg, met plastic afstandhouders met voetje.
  - Opstelling 20a: Plat gezette blokken met brede stootvoegen: grote blokken van 50x50x20 cm<sup>3</sup>.
  - Opstelling 20b: Plat gezette blokken met brede langs- of stootvoegen: kleine blokken van 25x25x10 cm<sup>3</sup>.
  - Opstelling 21: Op hun kant gezette Haringmanblokken met brede stootvoegen.
  - Opstelling 23: Op hun kant gezette vlakke blokken met brede stootvoegen.

Per opstelling zijn één of meerdere proevenseries uitgevoerd. Een deel van de proevenseries is uitgevoerd zonder inwasmateriaal en een deel van de proevenseries met inwasmateriaal in brede stoot- of langsvoegen. Dit is nader beschreven in Bijlage A en B. Opgemerkt wordt dat de breedte van zowel de stoot- als langsvoegen en de korrelgrootte van het inwasmateriaal worden meegenomen in de berekening van de doorlatendheid van de toplaag.

Daarnaast is een deel van de proevenseries uitgevoerd met regelmatige golven en een deel van de proevenseries met onregelmatige golven. Alleen de proevenseries met onregelmatige golven zijn gebruikt, omdat het rekenmodel volledig is afgestemd op onregelmatige golven. De duur van de proeven met onregelmatige golven is in [7] niet gedetailleerd omschreven, maar tenzij anders vermeld, duurde een proef “circa 1000 golven”.

Tijdens de meeste proevenseries trad los-blok-falen op, waardoor die series aansluiten op de scope van de voorliggende analyse. Echter, tijdens enkele proevenseries traden andere faalmechanismen op zoals verzakking of juist opbolling van de steenzetting. Dergelijke proevenseries zijn niet gebruikt.

- Deltagootonderzoek 2005 (langeduurproeven):  
In het Deltagootonderzoek van 2005 zijn golfproeven uitgevoerd op onder andere kleine blokken op hun kant ( $20 \times 20 \times 10 \text{ cm}^3$ ), koud tegen elkaar zonder inwasmateriaal. Er zijn drie proevenseries uitgevoerd die, op de ingolfproeven na, gezien kunnen worden als langeduurproeven. Het onderzoek is beschreven in [8].
- Deltagootonderzoek 2007 (langeduurproeven):  
In het Deltagootonderzoek van 2007 zijn golfproeven uitgevoerd op grote blokken op hun kant ( $50 \times 50 \times 25 \text{ cm}^3$ ), koud tegen elkaar zonder inwasmateriaal. Er zijn twee proevenseries uitgevoerd die, op de ingolfproeven na, gezien kunnen worden als langeduurproeven. Het onderzoek is beschreven in [9].

### 5.2.2 Eigenschappen en resultaten van de beschouwde Deltagootproeven

Eigenschappen van de beproefde steenzettingen, de hydraulische condities, de opwaartse verplaatsing(stoename) en de bijbehorende belastingduur zijn weergegeven in de tabellen in Bijlage B. De tabellen bevatten eerst de directe invoer voor het Matlab-model onder “Hydraulische belastingen” en “Overige invoer”. Onder “Aanvullende invoer t.b.v. berekening  $k$  &  $k'$ ” is aanvullende invoer gegeven voor het berekenen van  $k$  en  $k'$  in Steentoets (de met Steentoets berekende  $k$  en  $k'$  zijn vervolgens in de tabellen ingevuld onder “Overige invoer”). De tabellen eindigen onder “Gemeten opwaartse verplaatsing in Deltagoot” met  $Y_{\text{Deltagoot}}$ .

Opgemerkt wordt dat de eigenschappen in Bijlage B soms enigszins geschematiseerd zijn weergegeven om het te kunnen gebruiken in het Matlab-model. Het reken- en Matlab-model staan immers aan het begin van de ontwikkeling en zijn nog niet geschikt voor allerlei bijzondere situaties (zie ook Paragraaf 4.3). Indien van toepassing is dit toegelicht in Bijlage A. Schematiseringen zijn vooral uitgevoerd met betrekking tot de ondergrond en de aanwezigheid van een berm:

- Mijntsteen met daarop een waterdicht folie is geschematiseerd als ondoorlatende kleilaag.
- Mijntsteen (zonder waterdicht folie) met daarop een filterlaag is geschematiseerd als ondoorlatende klei met een iets dikkere filterlaag dan in werkelijkheid aanwezig was.
- In alle opstellingen van Deltagootonderzoek 1997-1998 ([7]) was in het buitentalud een berm aanwezig op +5,00 m. Deze berm is vooralsnog buiten beschouwing gelaten, omdat het reken- en Matlab-model hier nog niet geschikt voor zijn. In veel gevallen ligt de berm (ruim) boven de stilwaterlijn en zal die weinig tot geen invloed op de resultaten hebben. Aanbevolen wordt echter om de modelkalibratie en kwantificering van de modelonzekerheid nog eens te verifiëren als in een later stadium het reken- en Matlab-model hier wel geschikt voor zijn.

Bijlage A bevat een toelichting op de beproefde modelopstellingen, de gebruikte proevenseries en proeven, en interpretatie van de gemeten opwaartse verplaatsingen en bijbehorende belastingduren.

Afzonderlijke proeven die onderdeel zijn van één langeduurproef, zijn bij elkaar opgeteld op basis van het gewogen gemiddelde van de energie (energie maal aantal golven). Daaruit volgt een samengestelde golfhoogte en golfperiode. Het totale aantal golven betreft in dat geval een sommatie van de afzonderlijke proeven. Deze methode is beschreven in [9].

Indien in de oude rapporten niet expliciet is genoemd dat er geen verplaatsingen waren, dan zijn dergelijke proeven niet opgenomen in Bijlage B. Wanneer wél expliciet vermeld is dat er geen verplaatsingen waren, dan zijn relevante proeven vaak wel opgenomen in Bijlage B ( $Y_{\text{Deltagoot}} = 0 \text{ m}$ ), maar soms alleen die met de zwaardere golfcondities van de proevenserie.

En overzicht van de gemeten opwaartse verplaatsing in de Deltagoot ( $Y_{\text{Deltagoot}}$ ) per proef is grafisch weergegeven in Figuur 5.1.

### 5.2.3 Berekende opwaartse verplaatsing volgens het rekenmodel

Alle beschouwde Deltagootproeven zijn nagerekend met het Matlab-model, uitgaande van de gegevens in Bijlage B. Elke berekening heeft geleid tot een berekende opwaartse verplaatsing  $Y_{\text{top},N} \text{ [m]}$ , horend bij het in Bijlage B gegeven aantal golven  $N$ . Deze  $Y_{\text{top},N}$  wordt in het vervolg van de analyse aangehouden als  $Y_{\text{rekenmodel}}$ . Ofwel:  $Y_{\text{rekenmodel}} = Y_{\text{top},N}$ .

De blokkensteenzettingen in de nagerekende Deltagootproeven kunnen onderverdeeld worden in vier verschillende toplaagtypen:

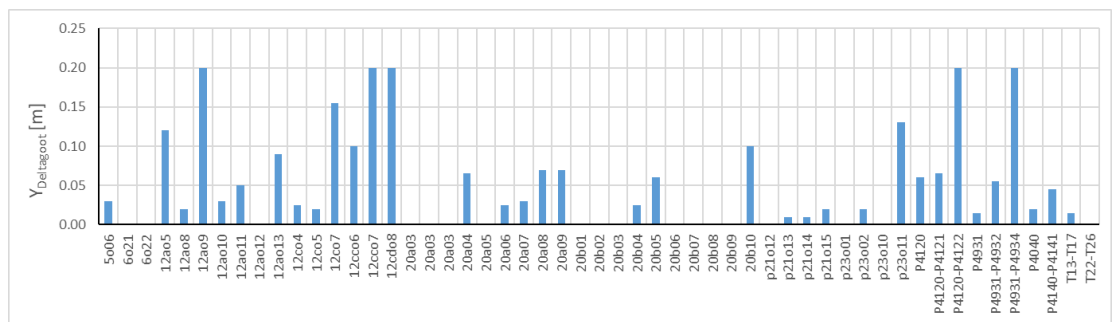
- Plat gezette blokken:
  - Betonblokken zonder openingen (toplaagtype 11.0 in Steentoets)
  - Plat gezette blokken met afstandhouders (toplaagtype 11.3 in Steentoets)
- Blokken op hun kant:
  - Blokken op hun kant (toplaagtype 11.4 in Steentoets)
  - Blokken op hun kant met afstandhouders (toplaagtype 11.5 in Steentoets)

Opgemerkt wordt dat in de eerste opzet van het rekenmodel in [1] de aqua-planing-factor  $\zeta$  en enkele formules ten aanzien van de invloed van de belastingduur zijn gegeven voor specifiek één bepaald blokkentoplaagtype. Zo is gesteld dat aqua-planing-factor  $\zeta = 0,7$  voor “rechthoekige blokken”. En enkele formules ten aanzien van de belastingduur zijn specifiek gegeven voor “blokken op hun kant”. In de voorliggende analyse is vooralsnog aangenomen dat de aqua-planing-factor en de betreffende formules ten aanzien van de belastingduur ook van toepassing zijn op de andere blokkentoplaagtypen.

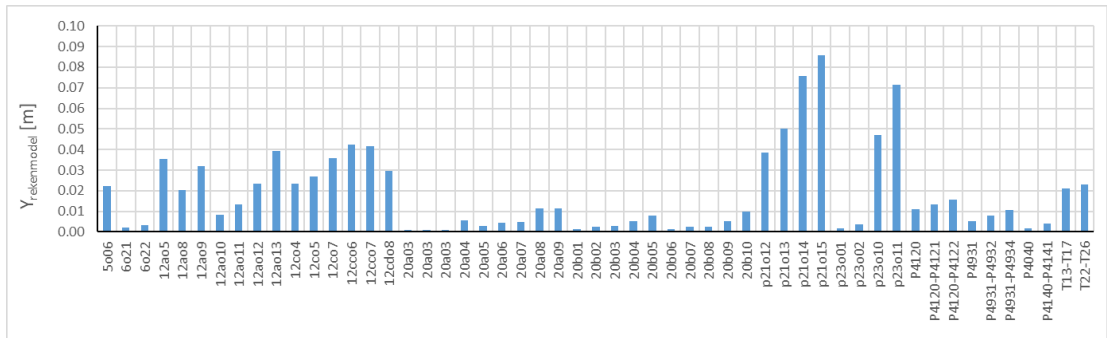
En overzicht van de berekende opwaartse verplaatsing volgens het rekenmodel ( $Y_{\text{rekenmodel}}$ ) per proef is grafisch weergegeven in Figuur 5.2.

### 5.2.4 Vergelijking van $Y_{\text{rekenmodel}}$ en $Y_{\text{Deltagoot}}$

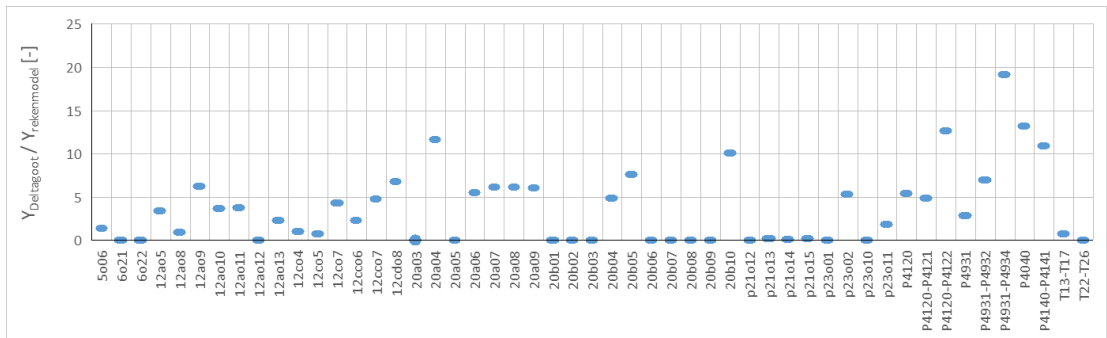
Voor elke beschouwde proef is de gemeten opwaartse verplaatsing in de Deltagoot ( $Y_{\text{Deltagoot}}$ ) weergegeven in Figuur 5.1 en de berekende opwaartse verplaatsing volgens het rekenmodel ( $Y_{\text{rekenmodel}}$ ) in Figuur 5.2. Relevant voor het kalibreren van het rekenmodel is de verhouding tussen de gemeten en berekende verplaatsing ( $Y_{\text{Deltagoot}} / Y_{\text{rekenmodel}}$ ). Deze verhouding is per proef weergegeven in Figuur 5.3. De verhouding is ook zichtbaar in Figuur 5.4, waarin  $Y_{\text{rekenmodel}}$  is uitgezet tegen  $Y_{\text{Deltagoot}}$ . De stippelijijn in de figuur geeft de ideale trendlijn ‘gemeten = berekend’.



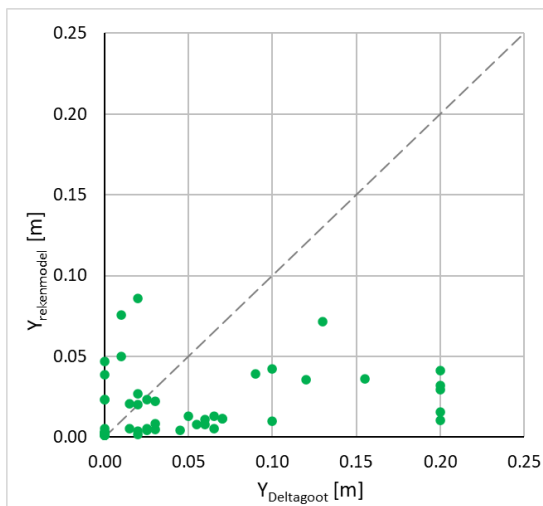
Figuur 5.1 Gemeten opwaartse verplaatsing in de Deltagoot ( $Y_{\text{Deltagoot}}$ ) per proef.



Figuur 5.2 Berekende opwaartse verplaatsing volgens het rekenmodel ( $Y_{rekenmodel}$ ) per proef.



Figuur 5.3 Verhouding tussen de gemeten en berekende opwaartse verplaatsing ( $Y_{Deltagoot} / Y_{rekenmodel}$ ) per proef.



Figuur 5.4 Gemeten opwaartse verplaatsing van afzonderlijke zetstenen ( $Y_{Deltagoot}$ ) uitgezet tegen de berekende opwaartse verplaatsing ( $Y_{rekenmodel}$ ). De stippellijn geeft de ideale trendlijn 'gemeten = berekend'.

In Figuur 5.3 is te zien dat de verhouding  $Y_{Deltagoot} / Y_{rekenmodel}$  bij veel proeven rond de 5 ligt. Bij een deel van de proeven is de verhouding 0, doordat in de Deltagoot geen verplaatsing was geconstateerd. En specifiek bij een deel van de Deltagootproeven uit 2005 is de verhouding duidelijk hoger dan 5. De spreiding in de resultaten is fors, zoals ook zichtbaar is in Figuur 5.4. Hoewel in Figuur 5.4 in het ideale geval alle punten gemiddeld op de lijn 'gemeten = berekend' liggen, is het niet onverwacht dat in het voorliggende geval de meetpunten gemiddeld ruim afwijken van die lijn. Het rekenmodel bevat weliswaar een groot aantal basisrelaties tussen variabelen, maar de uitkomsten van het theoretische model zijn in absolute zin nog moeilijk te duiden. Gedacht kan worden aan de keuze om de kortdurende verplaatsing tijdens één enkele

golf met een golfhoogte gelijk aan  $H_{2\%}$  te beschouwen als de permanente verplaatsing na 1000 golven. Dergelijke aspecten vereisen kalibratie aan metingen en dat kan goed leiden tot een kalibratiefactor, die fors afwijkt van 1.

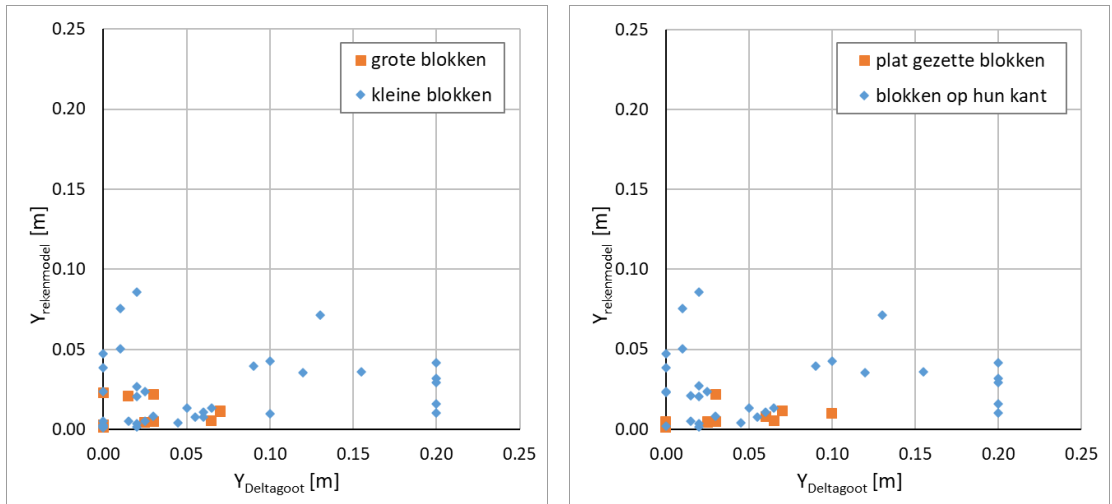
Wel is de forse spreiding opvallend. Een mogelijke verklaring is dat bepaalde basisrelaties tussen variabelen in het rekenmodel vooralsnog tekortschieten of ontbreken. Anderzijds ligt ook ruimtelijke variabiliteit van de steenzetting in de Deltagoot aan de spreiding ten grondslag. Een andere mogelijke oorzaak van de spreiding is dat tijdens de verschillende Deltagootproeven de grootste golfklappen plaatsvonden op verschillende momenten in de tijd. Mogelijk heeft de volgorde van de golfklappen invloed op de opwaartse verplaatsing.

Voor zover binnen de scope van het voorliggende rapport mogelijk is, is tot op zekere hoogte geprobeerd te achterhalen waardoor de forse spreiding veroorzaakt wordt. Figuur 5.4 is daartoe nogmaals weergegeven in Figuur 5.5 tot en met Figuur 5.7, maar nu met onderverdeelde meetpunten op basis van enkele hoofdstromingen binnen de beschouwde steenzettingen:

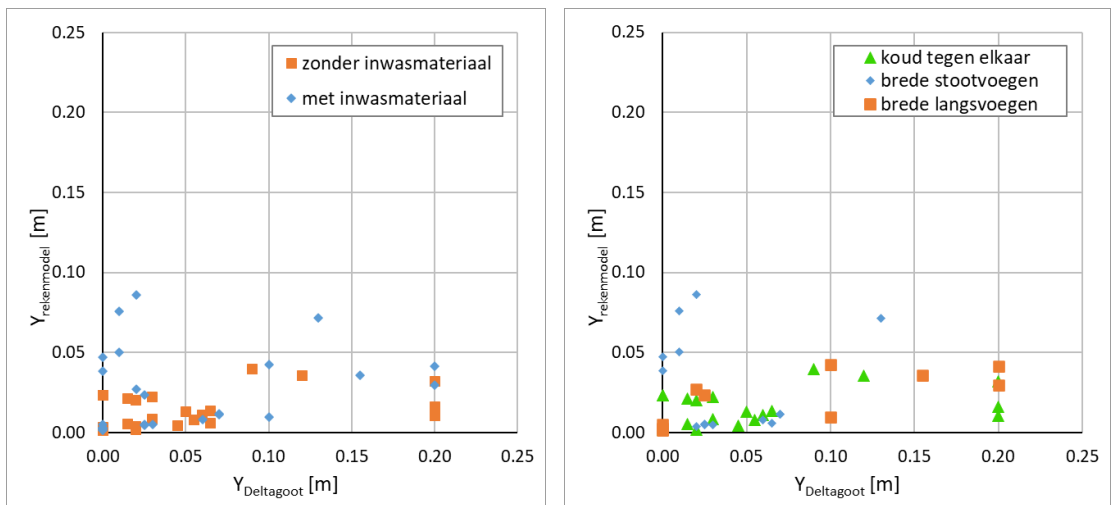
- Grote versus kleine blokken (Figuur 5.5, links).
- Plat gezette blokken versus blokken op hun kant (Figuur 5.5, rechts).
- Blokken zonder versus met inwasmateriaal (Figuur 5.6, links).
- Onderverdeeld in koud tegen elkaar gezette blokken, blokken met brede stootvoegen en blokken met brede langsvoegen (Figuur 5.6, rechts).
- Onderverdeeld op basis van het aantal golven  $N$  (Figuur 5.7).

Vooraf bij de vijf meetpunten tussen  $Y_{\text{Deltagoot}} = 0$  à  $2$  cm en  $Y_{\text{rekenmodel}} = 3,8$  à  $8,6$  cm is  $Y_{\text{rekenmodel}}$  opvallend groter dan  $Y_{\text{Deltagoot}}$ . Daarvan heeft het punt bij  $Y_{\text{Deltagoot}} = 0$  m en  $Y_{\text{rekenmodel}} = 0,047$  m betrekking op proef p23o10 (Deltagootproeven 1997-1998 [7], opstelling 23, serie 2). De overige vier meetpunten zijn van de proeven p21o12 t/m p21o15 (Deltagootproeven 1997-1998 [7], opstelling 21, serie 1). In Figuur 5.5 tot en met Figuur 5.7 vallen deze meetpunten consequent steeds binnen eenzelfde categorie, waarvan de andere meetpunten van die categorie steeds grotendeels samenvallen met de meetpunten van de andere categorie(ën). Dat maakt het achterhalen van de oorzaak van de spreiding vooralsnog lastig. Het duidelijkste onderscheid lijkt aanwezig te zijn bij plat gezette blokken versus blokken op hun kant (Figuur 5.5, rechts) en bij onderverdeling op basis van de belastingduur (Figuur 5.7), alhoewel ook binnen de categorieën van deze figuren de spreiding groot is. Wel wordt opgemerkt dat de vier meetpunten van opstelling 21 betrekking hebben op Haringmanblokken op hun kant, terwijl alle andere proeven zijn uitgevoerd met rechthoekige betonblokken. De invloed hiervan op de resultaten is naar verwachting echter gering. Hoewel de doorlatendheid van de toplaag over een deel van de blokhoogte groter is (wat zou kunnen leiden tot een kortere leklengte en een iets hogere stabiliteit), lijken de randen rond de uitsparingen van de Haringmanblokken de beperkende factor voor de toplaagdoorlatendheid, waardoor de invloed hiervan naar verwachting gering is. Daarnaast zorgen de uitsparingen in de Haringmanblokken voor een wat kleiner contactoppervlak met omringende blokken, wat kan resulteren in een iets lagere stabiliteit, maar in de Deltagoot wordt juist een hogere stabiliteit geconstateerd dan volgens het rekenmodel. Hoewel de onzekerheid rond deze meetpunten wat groter is, ligt het niet voor de hand deze meetpunten buiten beschouwing te laten.

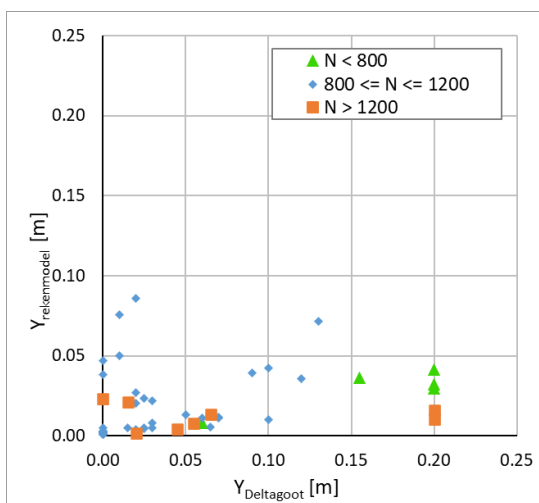
Er is voor gekozen de modelkalibratie voorlopig uit te voeren op basis van alle categorieën samen. Wel wordt aanbevolen om in de toekomst nader te onderzoeken of de grote spreiding fundamenteel verklaard kan worden, met als doel het aanscherpen van de formules van het rekenmodel. Het heeft immers de voorkeur om spreiding te verkleinen door fundamentele verbeteringen in formules, dan door het toepassen van verschillende kalibratiefactoren voor verschillende steenzetting-subcategorieën.



Figuur 5.5  $Y_{Deltagoot}$  versus  $Y_{rekenmodel}$ , onderverdeeld in grote versus kleine blokken (links) en plat gezette blokken versus blokken op hun kant (rechts).



Figuur 5.6  $Y_{Deltagoot}$  versus  $Y_{rekenmodel}$ , onderverdeeld in geen versus wel inwasmateriaal (links) en onderverdeeld in koud tegen elkaar gezette blokken, blokken met brede stootvoegen en blokken met brede langsvogen (rechts).



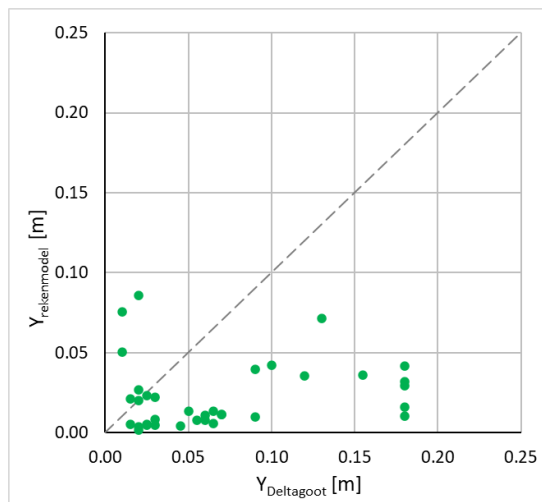
Figuur 5.7  $Y_{Deltagoot}$  versus  $Y_{rekenmodel}$ , onderverdeeld op basis van het aantal golven  $N$ .

### 5.3 Kalibratie van het rekenmodel op basis van Deltagootproeven (stap 2)

Voor de kalibratie van het rekenmodel ten aanzien van los-blok-falen is als uitgangspunt gebruikgemaakt van Figuur 5.4, maar met enkele aanpassingen:

- Meetpunten met een verplaatsing van 0 m zijn buiten beschouwing gelaten om de volgende redenen:
  - Verplaatsingen groter dan 0 m vormen het voornaamste interessegebied en zijn het meest relevant voor de kalibratie van het model. Wanneer het model goed aansluit op alle verplaatsingen groter dan 0 m (variërend van kleine verplaatsingen tot grote verplaatsingen met een relatief grote meetnauwkeurigheid), dan voldoet het model in principe ook voor verplaatsingen van 0 m.
  - Proeven waarbij in de Deltagoot geen verplaatsing is gemeten, maar waarvoor het Matlab-model wel een verplaatsing berekent, resulteren in de verhouding  $Y_{\text{Deltagoot}} / Y_{\text{rekenmodel}} = 0$ . Dergelijke proeven trekken de gemiddelde verhouding omlaag, terwijl dat niet logisch is op basis van de proeven in het voornaamste interessegebied (proeven met een verplaatsing groter dan 0 m).
  - Verplaatsingen kleiner dan ca. 0,5 cm vallen op een groot steenzettingoppervlak in de Deltagoot nauwelijks op (de hoogte van de zetstenen zelf varieert geregeld ook al enkele millimeters) en zullen wellicht beschouwd zijn als geen verplaatsing. De onzekerheid rond 'geen verplaatsing' is daardoor relatief groot.
- Wanneer een blok in z'n geheel uit het talud kwam, is  $Y_{\text{Deltagoot}}$  met 10 procent verlaagd. De reden hiervoor is dat blokken tijdens het golven geregeld enigszins als zuiger op en neer bewegen. Het eruit komen van een blok vindt plaats op het hoogste punt van de verplaatsing, terwijl de permanente verplaatsing na het stilleggen van een proef doorgaans wat lager zal zijn dan dat hoogste punt. Omdat  $Y_{\text{Deltagoot}}$  de *permanente* verplaatsing dient weer te geven, is op basis van expert judgement ervoor gekozen om in dergelijke gevallen niet de toplaagdikte aan te houden als verplaatsing, maar een 10 procent kleinere verplaatsing.

Het resultaat na deze aanpassingen is weergegeven in Figuur 5.8.



Figuur 5.8 Gecorrigeerde gemeten opwaartse verplaatsing van afzonderlijke zetstenen ( $Y_{\text{Deltagoot}}$ ) uitgezet tegen de berekende opwaartse verplaatsing ( $Y_{\text{rekenmodel}}$ ), vóór kalibratie van het rekenmodel. De stippellijn geeft de ideale trendlijn 'gemeten = berekend'.

Het gemiddelde van de verhouding  $Y_{\text{Deltagoot}} / Y_{\text{rekenmodel}}$  [-] van alle meetpunten in Figuur 5.8 is 5,10 en betreft de kalibratiefactor voor het rekenmodel ten aanzien van los-blok-falen. De kalibratiefactor vormt de verwachtingswaarde  $\mu$  van de modelfactor  $m$ , die als volgt toegevoegd kan worden in de in Paragraaf 4.4.3 verbeterde formule voor  $Y_{\text{top},1000}$ :

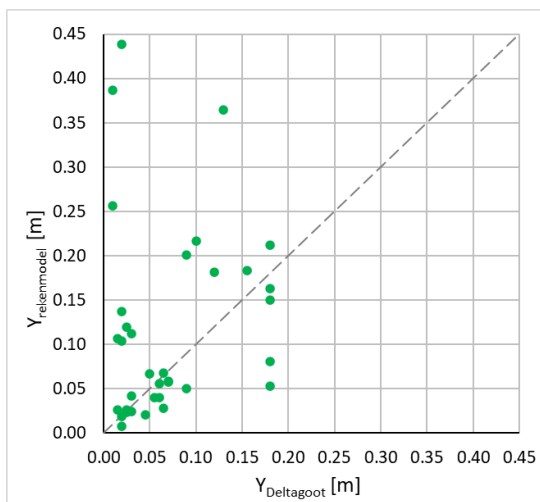
$$Y_{\text{top},1000} = \max \left( 0; \frac{m \cdot \frac{9}{16} \cdot (\phi_w - \phi_{eg} - \phi_{wr/klem}) \rho g t_o^2}{(\rho_z + \rho) \cdot D + \left[ \frac{9}{16} \frac{D \sqrt{BL}}{1,5 \cdot t_o \pi k' \Lambda} \cdot \left( 0,56 + 0,18 \cdot \ln \left( \frac{\sqrt{BL}}{\Lambda} \right) \right) \right] \rho g t_o^2} \right) \quad (5.1)$$

Met:

$m$  = modelfactor (voor los-blok-falen in een blokkensteenzetting geldt:  $\mu(m) = 5,10$  en  $\sigma(m) =$  te bepalen in Paragraaf 6.1) [-]

Ter controle is de kalibratiefactor op deze wijze ook toegevoegd in het Matlab-model, waarna alle Deltagootproeven nogmaals nagerekend zijn. Het resultaat daarvan is weergegeven in Figuur 5.9. Zoals te zien, sluit het rekenmodel nu aanzienlijk beter aan op de metingen. Ter controle is het gemiddelde van de verhouding  $Y_{\text{Deltagoot}} / Y_{\text{rekenmodel}}$  van alle meetpunten in Figuur 5.9 berekend. Conform verwachting is het gemiddelde nu 1,00.

Opgemerkt wordt dat de drie hoogste meetpunten bij  $0,01 \text{ m} \leq Y_{\text{Deltagoot}} \leq 0,02 \text{ m}$  procentueel opvallend ver afwijken van de lijn 'gemeten = berekend'. In Paragraaf 5.2.4 zijn deze meetpunten nader beschouwd en is er geen reden gevonden om deze punten buiten beschouwing te laten in de analyse.



Figuur 5.9 Gecorrigeerde gemeten opwaartse verplaatsing van afzonderlijke zetstenen ( $Y_{\text{Deltagoot}}$ ) uitgezet tegen de berekende opwaartse verplaatsing ( $Y_{\text{rekenmodel}}$ ), ná kalibratie van het rekenmodel. De stippellijn geeft de ideale trendlijn 'gemeten = berekend'.

## 6 Kwantificering globale modelonzekerheid

### 6.1 Kwantificeren van de modelonzekerheid (stap 3)

Na de kalibratie van het rekenmodel in Hoofdstuk 5 vindt in het voorliggende hoofdstuk de kwantificering van de globale modelonzekerheid plaats. Dit betreft de derde stap van de in Hoofdstuk 3 beschreven werkwijze:

Stap 3. Kwantificeren van de globale modelonzekerheid op basis van de spreiding in de resultaten van Deltagootproeven ten opzichte van de (deterministische) resultaten van het rekenmodel. De globale modelonzekerheid betreft de standaardafwijking van de verhouding tussen  $Y_{\text{Deltagoot}}$  en  $Y_{\text{rekenmodel}}$ .

De standaardafwijking  $\sigma$  van de modelfactor  $m$  wordt berekend uit de verhouding  $Y_{\text{Deltagoot}} / Y_{\text{rekenmodel}}$  van de meetpunten in Figuur 5.8. Het gemiddelde van de verhouding  $Y_{\text{Deltagoot}} / Y_{\text{rekenmodel}}$  van de meetpunten in Figuur 5.8 is  $\mu(m) = 5,10$  [-] en de standaardafwijking is  $\sigma(m) = 4,05$  [-]. Voor de variatiecoëfficiënt  $V$  geldt:  $V(m) = \sigma(m)/\mu(m) = 0,79$  [-]. Deze onzekerheid is fors.

De modelfactor  $m$  is in Paragraaf 5.3 als volgt toegevoegd in de in Paragraaf 4.4.3 verbeterde formule voor  $Y_{\text{top},1000}$ :

$$Y_{\text{top},1000} = \max \left( 0; \frac{m \cdot \frac{9}{16} \cdot (\phi_w - \phi_{eg} - \phi_{wr/klem}) \rho g t_o^2}{(\rho_z + \rho) \cdot D + \left[ \frac{9}{16} D \sqrt{BL} \cdot \left( 0,56 + 0,18 \cdot \ln \left( \frac{\sqrt{BL}}{\Lambda} \right) \right) \right] \rho g t_o^2} \right) \quad (6.1)$$

Met:

$m$  = modelfactor (voor los-blok-falen in een blokkensteenzetting geldt:  $\mu(m) = 5,10$  en  $\sigma(m) = 4,05$ ) [-]

Voor toepassing in de praktijk is het van belang te weten op welk steenzettingoppervlak de modelonzekerheid betrekking heeft. De breedte van de steenzetting (lengte van de teen richting de kruin) is in dit opzicht niet relevant, omdat golfklappen maar op een relatief smalle zone van het talud impact hebben. De lengte (evenwijdig aan de waterlijn) is wel relevant.

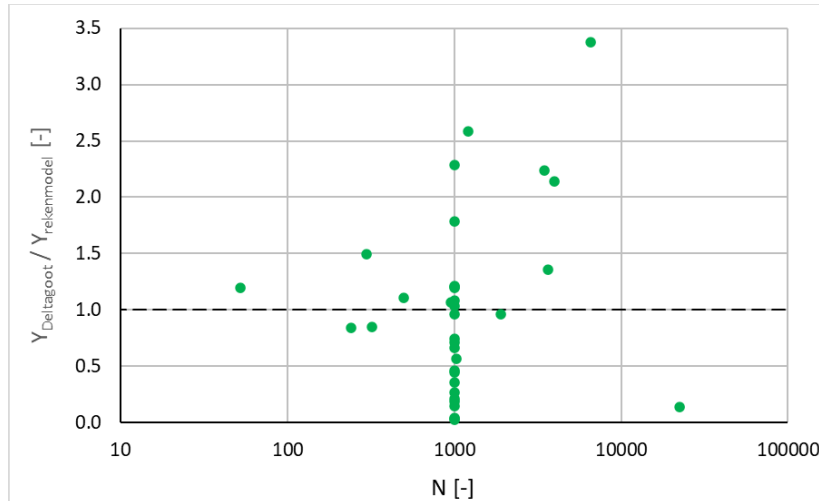
De beschouwde Deltagootproeven zijn uitgevoerd met blokken met een lengte van 20, 25 en 50 cm. In de praktijk hebben betonblokken doorgaans een lengte van 50 cm, wat inhoudt dat de proeven in feite zijn uitgevoerd op schaal 1:1 à 1:2,5. Vanwege de Deltagootbreedte van 5 m heeft de modelfactor betrekking op een steenzetting met een lengte van 5,0 à 12,5 m.

In hoeverre bij de toepassing in de praktijk rekening gehouden moet worden met een lengte-effect, hangt af van de mate waarin de modelonzekerheid ruimtelijk gecorreleerd is in steenzettingvakken op werkelijke dijken. Als de modelonzekerheid binnen een steenzettingvak ruimtelijk perfect gecorreleerd is, dan is er geen lengte-effect, maar als de modelonzekerheid ruimtelijk níet perfect gecorreleerd is, dan veroorzaakt dit wel een lengte-effect. Enerzijds is te verwachten dat de ruimtelijke correlatie van de modelonzekerheid binnen een steenzettingvak sterk is, omdat de steenzetting onder redelijk constante condities zal zijn aangebracht en omdat de ruimtelijke variatie in sterkte- en belastingparameters binnen een dijkvak relatief klein is. Anderzijds is er tijdens Deltagootproeven geregeld één steen, die het verst uitsteekt (in

plaats van meerdere stenen in de breedte van de Deltagoot die allemaal in dezelfde mate het verst uitsteken), wat een lengte-effect doet vermoeden. Aanbevolen wordt nader te onderzoeken in hoeverre er sprake is van een lengte-effect.

## 6.2 Invloed van de belastingduur

In het bijzonder is onderzocht of de modelonzekerheid afhankelijk is van de belastingduur. Daarvoor is van alle meetpunten uit Figuur 5.9 de verhouding  $Y_{\text{Deltagoot}} / Y_{\text{rekenmodel}}$  uitgezet tegen het aantal golven  $N$ , zie Figuur 6.1.



Figuur 6.1 De verhouding tussen de gemeten en berekende opwaartse verplaatsing van afzonderlijke zetstenen ( $Y_{\text{Deltagoot}} / Y_{\text{rekenmodel}}$ ) na kalibratie, uitgezet tegen de belastingduur (aantal golven  $N$ ). De stippellijn geeft de gemiddelde verhouding  $Y_{\text{Deltagoot}} / Y_{\text{rekenmodel}}$  van alle meetpunten.

Bij een belastingduur van circa 1000 golven zijn er veel meetpunten, maar het aantal meetpunten bij een belastingduur van veel meer of minder dan 1000 golven is gering. Bij een korte belastingduur is de spreiding (modelonzekerheid) kleiner dan bij 1000 golven, maar het aantal meetpunten is gering. Bij een langere belastingduur lijkt de spreiding in eerste instantie wat groter dan bij 1000 golven, maar dat beeld wordt bepaald door twee uiterste punten. Wanneer of het hoogste punt of het meest rechter punt wordt beschouwd als uitschieter, dan is de spreiding bij lange belastingduren vergelijkbaar met die bij 1000 golven. Het ligt daarom niet voor de hand een belastingduurafhankelijke modelonzekerheid te definiëren.

Wel ligt het *gemiddelde* van de meetpunten bij een lange belastingduur wat hoger dan bij belastingduren van 1000 of minder golven. Bij lange belastingduren lijkt het rekenmodel de opwaartse verplaatsingen dus wat te onderschatten. Daarom wordt aanbevolen de invloed van de belastingduur nader te onderzoeken en om eventuele verbeteringen en/of vereenvoudigingen ten aanzien van de invloed van de belastingduur te implementeren in de achterliggende formules zelf, in plaats van hiervoor te corrigeren door middel van op maat gemaakte modelfactoren.

Het is mogelijk dat de bovenstaande aanbeveling of de aanbeveling uit Paragraaf 5.2.4, om de spreiding nader te onderzoeken, leidt tot aanpassingen aan de formules, die gebruikt worden voor los-blok-falen in blokkensteenzettingen. In dat geval is het noodzakelijk de modelfactor voor los-blok-falen in blokkensteenzettingen opnieuw vast te stellen. Hiervoor dient eerst het Matlab-model bijgewerkt te worden, wat zal resulteren in een nieuw uitvoerbestand met nieuwe waarden voor  $Y_{\text{rekenmodel}}$ . Kopiëren van die nieuwe waarden voor  $Y_{\text{rekenmodel}}$  naar de huidige analysebestanden geeft de nieuwe modelfactor. Herberekening van  $k$  en  $k'$  in Steentoets is in vrijwel alle gevallen niet nodig.

## 6.3 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

In Paragraaf 6.1 is vastgesteld dat de modelfactor een forse spreiding heeft. Dat is ongewenst. Het wordt aanbevolen alle onzekerheden in het reken- en Matlab-model te inventariseren. In het kader daarvan wordt aanbevolen nader onderzoek te doen naar mogelijke oorzaken van de spreiding. Doel hiervan is het identificeren van verbeterpunten voor het rekenmodel, teneinde het rekenmodel verder te optimaliseren en de spreiding te verkleinen. Aanbevolen wordt het volgende te onderzoeken:

- *Matlab-model vergelijken met Steentoets:*  
Aanbevolen wordt om resultaten van het Matlab-model te vergelijken met de resultaten van Steentoets. Door de waarde van invoerparameters te variëren, kan onderzocht worden hoe de basisrelaties tussen (samengestelde) variabelen in het Matlab-model zich verhouden tot die in Steentoets. Significante verschillen kunnen leiden tot gericht onderzoek naar de invloed van de betreffende parameters.  
Overigens wordt opgemerkt dat het niet mogelijk is om de gemeten verplaatsingen in de Deltagoot een-op-een met Steentoets te vergelijken, doordat Steentoets geen tijdafhankelijk rekenmodel is en geen opwaartse verplaatsingen van afzonderlijke zetstenen geeft als uitvoer. Steentoets geeft aan of de steenzetting na een storm nog wel of niet meer voldoet, maar niet hoe groot de verplaatsing is na een bepaald aantal golven.
- *De invloed van variabelen in de Deltagootmetingen vergelijken met de invloed ervan in het Matlab-model:*  
In veel proevenseries verschillen de proeven slechts van elkaar ten aanzien van één (samengestelde) variabele. Door de invloeden van deze variabelen in de proeven te vergelijken met de invloeden in het Matlab-model, kan de invloed van deze variabelen in het model gecontroleerd worden.
- *De invloed van de belastingduur nader onderzoeken:*  
Zoals geconstateerd in Paragraaf 6.2 lijkt het rekenmodel bij lange belastingduren de opwaartse verplaatsingen wat te onderschatten. Het wordt aanbevolen de invloed van de belastingduur nader te onderzoeken teneinde de formules indien nodig te kunnen aanscherpen en/of vereenvoudigen of eventueel te vervangen door andere formules.

# 7 Conclusies en aanbevelingen

## 7.1 Conclusies

Voor het doorrekenen van steenzettingen wordt inmiddels circa 20 jaar gebruikgemaakt van het rekenmodel Steentoets ([2] en [3]). Eén van de nadelen van Steentoets is echter dat het niet geschikt is voor het uitvoeren van tijdsafhankelijke berekeningen, waardoor het niet goed meer aansluit op de huidige wensen ten aanzien van het beoordelen en ontwerpen van steenzettingen. In combinatie met andere belangrijke nadelen op het gebied van onder andere cybersecurity en onderhoudbaarheid van de code is besloten nieuwe software te ontwikkelen voor het tijdsafhankelijk doorrekenen van steenzettingen.

De ontwikkeling van de nieuwe software is onderdeel van de werkzaamheden rondom BOI 2035 op het gebied van de software voor steenzettingen. Het doel is het ontwikkelen van een nieuwe, toekomstgerichte rekenkernel voor steenzettingen, die onderdeel wordt van het BOI. Dit gebeurt in een aantal fases:

- Fase 0: Structureren van kennis ten behoeve van nieuwe softwarestructuur
- Fase 1: Softwareontwikkeling (rekenkern, softwaredocumenten)
- Fase 2: User-interface (GUI)
- Fase 3: Beheer en onderhoud

Het voorliggende rapport heeft betrekking op fase 0 en beschrijft de kalibratie van het rekenmodel en de kwantificering van de modelonzekerheden rondom één van de initiële mechanismen van steenzettingen, namelijk ZTG (toplaaginstabiliteit onder golfaanval). In het rekenmodel zijn de nodige aannames gemaakt, hetgeen de uitkomsten van het rekenmodel per definitie onzeker maakt. Om een realistische schatting van de faalkans van steenzettingen te kunnen maken is het noodzakelijk om de onzekerheden te kwantificeren en in het BOI toe te passen. Dit draagt bij aan de doelstelling van het programma Kennis voor Keringen (KvK). De studie die heeft geleid tot voorliggend rapport is gefinancierd vanuit KvK en BOI (project "Vernieuwing Software Steenzettingen").

Een eerste opzet voor het rekenmodel voor het bepalen van de stabiliteit van steenzettingen is uitgewerkt in het in 2024 opgestelde rapport '*Tijdsafhankelijk rekenmodel voor steenzettingen*' ([1]). Het in [1] opgezette rekenmodel vormt, inclusief enkele kleine aanpassingen op basis van paragraaf 4.4, het uitgangspunt voor de analyse in het voorliggende rapport. Om het rekenmodel bruikbaar te maken, is in het voorliggende rapport het rekenmodel gekalibreerd en is de modelonzekerheid gekwantificeerd. Zoals toegelicht in Hoofdstuk 2 is niet de onzekerheid van afzonderlijke deelprocessen, maar de globale modelonzekerheid gekwantificeerd. Deze globale onzekerheid is afgeleid door de eindresultaten van het rekenmodel te vergelijken met de resultaten van Deltagootproeven. Daarbij zijn de volgende stappen doorlopen:

Kalibratie van het rekenmodel:

- Stap 1. Vergelijking van de *gemeten* maximale opwaartse verplaatsing van afzonderlijke zetstenen in de Deltagoot ( $Y_{\text{Deltagoot}}$ ) met de door het rekenmodel *berekende* opwaartse verplaatsingen ( $Y_{\text{rekenmodel}}$ ). Daarbij is in het rekenmodel gebruikgemaakt van de gemeten hydraulische condities, belastingduur en steenzettingeigenschappen in de Deltagoot. Er is gebruikgemaakt van tientallen Deltagootproeven uit drie verschillende Deltagootonderzoeken in 1997-1998, 2005 en 2007.
- Stap 2. Kalibratie van het rekenmodel op basis van de verhouding tussen  $Y_{\text{Deltagoot}}$  en  $Y_{\text{rekenmodel}}$  van de nagerekende Deltagootproeven. De verhouding tussen  $Y_{\text{Deltagoot}}$

en  $Y_{\text{rekenmodel}}$  heeft een gemiddelde en een spreiding. De gemiddelde verhouding tussen  $Y_{\text{Deltagoot}}$  en  $Y_{\text{rekenmodel}}$ , ook wel de bias van het model, is als kalibratiefactor opgenomen in het rekenmodel, waarna het rekenmodel de maximale opwaartse verplaatsing gedurende een Deltagootproef voorspelt, afhankelijk van de opgetreden belastingduur.

Kwantificering van de globale modelonzekerheid:

Stap 3. Kwantificeren van de globale modelonzekerheid op basis van de spreiding in de resultaten van Deltagootproeven ten opzichte van de (deterministische) resultaten van het rekenmodel. De globale modelonzekerheid betreft de standaardafwijking van de verhouding tussen  $Y_{\text{Deltagoot}}$  en  $Y_{\text{rekenmodel}}$ .

Een vierde stap – het rekenmodel bruikbaar maken voor toepassing in de praktijk – is geen onderdeel van dit rapport, maar is wel belangrijk. Deze stap is nader toegelicht in Paragraaf 3.4.

Dit rapport heeft uitsluitend betrekking op zogenoemd *los-blok-falen* in blokkensteenzettingen, zoals plat gezette betonblokken en blokken op hun kant. Los-blok-falen betreft de opwaartse verplaatsing van afzonderlijke zetstenen ten opzichte van omringende zetstenen. In een blokkensteenzetting gebeurt dat vaak zonder dat significante vervorming van het omringende taludoppervlak optreedt, doordat dit type steenzetting relatief weinig samenhang heeft. Er is wel *wrijving*, maar een relatief groot deel van de zetstenen ondervindt slechts weinig *klemming*. Dit in tegenstelling tot zuilensteenzettingen, waarin de onderlinge samenhang gewoonlijk veel groter is en er gewoonlijk wel eerst significante vervorming van het omringende talud optreedt, voordat één of meer zetstenen uit het talud komen. Een blokkensteenzetting wordt doorgaans aangeduid als een *niet geklemde* steenzetting en een zuilensteenzetting als een *geklemde* steenzetting.

De analyse heeft voor los-blok-falen geresulteerd in modelfactor  $m$  met verwachtingswaarde  $\mu(m) = 5,10$  en standaardafwijking  $\sigma(m) = 4,05$ . Daaruit volgt dat variatiecoëfficiënt  $V(m) = \sigma(m)/\mu(m) = 0,79$ . De onzekerheid is fors. De modelfactor  $m$  is toegevoegd in de in Paragraaf 4.4.3 verbeterde formule voor  $Y_{\text{top},1000}$ :

$$Y_{\text{top},1000} = \max \left( 0; \frac{m \cdot \frac{9}{16} \cdot (\phi_w - \phi_{eg} - \phi_{wr/klem}) \rho g t_o^2}{(\rho_z + \rho) \cdot D + \left[ \frac{9}{16} D \sqrt{BL} \right. \cdot \left. \left( 0,56 + 0,18 \cdot \ln \left( \frac{\sqrt{BL}}{\Lambda} \right) \right) \right] \rho g t_o^2} \right) \quad (7.1)$$

Waarin  $\phi_{wr/klem} = \phi_{wr}$  als er geen klemming is.

Met:

$Y_{\text{top},1000}$  = totale opwaartse verplaatsing van de zetsteen ten opzichte van de omliggende zetstenen, na een belastingduur van 1000 golven (m)

$m$  = modelfactor (voor los-blok-falen in een blokkensteenzetting geldt:  $\mu(m) = 5,10$  en  $\sigma(m) = 4,05$ ) (-)

$\phi_w$  = stijghoogteverschil door de golfbelasting (zie [2]) (m)

$\phi_{eg}$  = stijghoogteverschil overeenkomend met het eigengewicht van de zetsteen (zie Formule 3.17 in [1]) (m)

$\phi_{wr/klem}$	= stijghoogteverschil overeenkomend met de wrijving van een losse zetsteen of de klemming (m)
$\phi_{wr}$	= stijghoogteverschil overeenkomend met de wrijving van een losse zetsteen (zie Paragraaf 3.3.3.3 van [1]) (m)
$t_0$	= tijdsduur tijdens een golfklap of -front dat het stijghoogteverschil door de golfbelasting ( $\phi_w$ ) groter is dan het eigengewicht van de zetsteen (zie Formule 3.47 tot en met Formule 3.50 in [1]) (s)
$k'$	= gelineariseerde doorlatendheid van de toplaag (zie Paragraaf 4.13.3 van [2]) (m/s)
$\Lambda$	= leklengte (zie Formule 3.9 in [1]) (m)

In de analyse is gebruikgemaakt van de zetsteen, die in de Deltagoot het verst uit het talud stak, omdat dit de maatgevende zetsteen betreft voor de stabiliteit van het beschouwde stuk steenzetting. De ruimtelijke variabiliteit in de Deltagoot wordt hierdoor in het uiteindelijke rekenmodel verdisconteerd. Doordat in de Deltagoot steeds de verst uitstekende steen beschouwd is, heeft ook de verwachtingswaarde van de modelonzekerheid betrekking op de verst uitstekende steen. Voor toepassing in de praktijk is het van belang te weten op welk steenzettingoppervlak de modelonzekerheid van toepassing is en in hoeverre sprake is van een lengte-effect.

De kalibratie en kwantificering van de modelonzekerheid zijn uitgevoerd op basis van Deltagootproeven op schaal 1:1 à 1:2,5 in een 5 m brede golfgoot. De modelfactor heeft daardoor in werkelijkheid betrekking op steenzettingen met een lengte van 5,0 à 12,5 m.

In het bijzonder is onderzocht of de modelonzekerheid afhankelijk is van de belastingduur. Om de invloed van de belastingduur te onderzoeken is op basis van enkele in [1] afgeleide formules in Paragraaf 4.4.5 een formule afgeleid waarmee  $Y_{top,1000}$  (na 1000 golven) vertaald kan worden naar  $Y_{top,N}$  (na N golven). Er is geen duidelijke invloed van de belastingduur op de onzekerheid geconstateerd. Wel lijkt het rekenmodel bij lange belastingduren de opwaartse verplaatsingen gemiddeld wat te onderschatten (onveilig).

## 7.2 Aanbevelingen

In de analyse is vastgesteld dat de modelfactor een grote spreiding heeft. Dat is ongewenst. Daarom is in het rapport geprobeerd de grote spreiding in de meetpunten te verklaren. Een eerste analyse heeft geresulteerd in enkele mogelijke aanknopingspunten, maar bood voorsnog geen oplossing. Aanbevolen wordt nader onderzoek te doen naar de mogelijke oorzaken van de spreiding met als doel de formules van het rekenmodel te kunnen aanscherpen en de spreiding te verkleinen. Dat kan door onder andere het volgende te onderzoeken:

- *Matlab-model vergelijken met Steentoets:*  
Aanbevolen wordt om resultaten van het Matlab-model te vergelijken met de resultaten van Steentoets. Door de waarde van invoerparameters te variëren, kan onderzocht worden hoe de basisrelaties tussen (samengestelde) variabelen in het Matlab-model zich verhouden tot die in Steentoets. Significante verschillen kunnen leiden tot gericht onderzoek naar de invloed van de betreffende parameters.
- *De invloed van variabelen in de Deltagootmetingen vergelijken met de invloed ervan in het Matlab-model:*  
In veel proevenseries verschillen de proeven slechts van elkaar ten aanzien van één (samengestelde) variabele. Door de invloeden van deze variabelen in de proeven te vergelijken met de invloeden in het Matlab-model, kan de invloed van deze variabelen in het model gecontroleerd worden.

- *De invloed van de belastingduur nader onderzoeken:*  
Zoals geconstateerd in Paragraaf 6.2 lijkt het rekenmodel bij lange belastingduren de opwaartse verplaatsingen wat te onderschatten. Het wordt aanbevolen de invloed van de belastingduur nader te onderzoeken teneinde de formules indien nodig te kunnen aanscherpen en/of vereenvoudigen of eventueel te vervangen door andere formules.

Deze onderzoeksvoorstellen kunnen worden gezien als suggesties om te verkennen hoe en waar modelverbeteringen wenselijk zijn, in aanvulling op uitgebreide controle van de formules. Daarbij wordt aanbevolen om probabilistiek/statistiek enerzijds en fysica anderzijds in het ontwikkelproces samen op te laten lopen, en niet eerst (op basis van theorie) het model te verbeteren en het pas daarna in een los vervolgonderzoek langs metingen te leggen.

Daarnaast worden naar aanleiding van het voorliggende rapport ook de volgende aanbevelingen gedaan:

- De geometrieën en belastingsituaties van de beschouwde Deltagootproeven zijn doorgaans relatief eenvoudig, wat invloed heeft op het toepassingsgebied van de afgeleide modelonzekerheid. Bij situaties buiten het beschouwde gebied (zoals schuine golfaanval, meer steenzettingsegmenten, overgangen, etc.) zal een aanvullende modelonzekerheid in rekening gebracht moeten worden. Om die te bepalen is, indien data ontbreekt, beroep op engineering judgement nodig. Aanbevolen wordt hiervan een inschatting te maken.
- Met oog op verdere toepassing in de praktijk wordt aanbevolen nader te onderzoeken in hoeverre er sprake is van een lengte-effect.
- Het wordt aanbevolen de modelkalibratie en kwantificering van de modelonzekerheid nog eens te verifiëren als in een later stadium het reken- en Matlab-model zodanig ver ontwikkeld zijn, dat gerekend kan worden met stroken, variërende waterstand en golfcondities (inclusief variërende brekerparameter), twee filterlagen en meerdere segmenten waaronder een berm. Wanneer daarbij samengevoegde proeven met variërende waterstanden en golfcondities beschouwd worden, dient  $Y_{\text{rekenmodel}}$  vergeleken te worden met de totale verplaatsing ten opzichte van het begin van de proevenseries.

Gelet op de grote modelonzekerheid wordt aanbevolen eerst het reken- en Matlab-model te verbeteren en daartoe, mede op basis van de aanbevelingen in het voorliggende rapport, een kennisagenda op te stellen.

Het is mogelijk dat de aanbevelingen in dit rapport leiden tot aanpassingen aan de formules, die gebruikt worden voor los-blok-falen in blokkensteenzettingen. In dat geval is het noodzakelijk de modelfactor voor los-blok-falen in blokkensteenzettingen opnieuw vast te stellen. Hiervoor dient eerst het Matlab-model bijgewerkt te worden, wat zal resulteren in een nieuw uitvoerbestand met nieuwe waarden voor  $Y_{\text{rekenmodel}}$ . Kopiëren van die nieuwe waarden voor  $Y_{\text{rekenmodel}}$  naar de huidige analysebestanden geeft de nieuwe modelfactor. Herberekening van  $k$  en  $k'$  in Steentoets is in vrijwel alle gevallen niet nodig.

Zodra de nog in ontwikkeling zijnde rekenmodel-module met betrekking tot klemming gereed is, dienen ook voor de faalmechanismen van geklemde steenzettingen modelfactoren bepaald te worden. Naast het aanvullen van het Matlab-model is het nodig daarvoor een dataset met de relevante metingen van geklemde steenzettingen aan te leggen.

# Referenties

- [1] *Tijdsafhankelijk rekenmodel voor steenzettingen, Van Steentoets naar DiKErnel*, Deltares (N. Huppés en M. Klein Breteler), rapport 11210371-017-GEO-0001, versie 1.0, definitief, 4 december 2024
- [2] *Documentatie Steentoets, Excel-programma voor het berekenen van de stabiliteit van steenzettingen*, Deltares (M. Klein Breteler, G.C. Mourik en D. Kaste), rapport 11209270-002-GEO-0003, versie 23.1.1, definitief, oktober 2023
- [3] *Handleiding Steentoets, Excel-programma voor het beoordelen en ontwerpen van steenzettingen*, Deltares (M. Klein Breteler en G.C. Mourik), rapport 11209270-002-GEO-0004, versie 23.1.1, definitief, oktober 2023
- [4] *Grootschalig modelonderzoek naar stabiliteit van taludbekledingen, Meetverslag van Deltagootonderzoek*, Deltares (G.M. Smith, J.Wouters en M. Klein Breteler), H3272.73, versie 1, definitief, februari 2000
- [5] *WBI - Onzekerheden, Overzicht van belasting- en sterkteonzekerheden in het wettelijk beoordelingsinstrumentarium*, Deltares (F. Diemanse), 1220080-001-ZWS-0004, versie 3, definitief, augustus 2016
- [6] *Fenomenologische beschrijving – Faalmechanismen WBI*, Deltares (R. 't Hart), 11200574-007, versie C3, definitief, mei 2018
- [7] *Grootschalig modelonderzoek naar stabiliteit van taludbekledingen, Meetverslag van Deltagootonderzoek*, WL | Delft Hydraulics (G.M. Smith, J. Wouters en M. Klein Breteler), verslag H3272, versie 1, definitief, februari 2000
- [8] *Langeduursterkte van steenzettingen, Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen, Verslag Deltagootonderzoek*, WL | Delft Hydraulics (M. Klein Breteler en W.D. Eysink), verslag H4475, versie 2, definitief, 17 november 2005
- [9] *Stabiliteit van steenzetting met blokken op hun kant, Grootschalig onderzoek in Deltagoot*, WL | Delft Hydraulics (M. Klein Breteler en G. Wolters), verslag H4941, versie 1, definitief, oktober 2007

# A Toelichting op de gebruikte Deltagootproeven

## A.1 Deltagootonderzoek 1997-1998

Binnen dit omvangrijke Deltagootonderzoek naar de stabiliteit van taludbekledingen zijn veel grootschalige golfproeven uitgevoerd in de oude Deltagoot in de Noordoostpolder. De proeven zijn uitgevoerd in de periode 1997-1998 en zijn beschreven in [7]. Binnen het onderzoek zijn verschillende typen steenzettingen onderzocht, waarvan de onderstaand beschreven modelopstellingen en proevenseries relevant zijn voor de voorliggende analyse. Nadere toelichting op de modelopstellingen, proevenseries, de gebruikte proeven en interpretatie van de gemeten opwaartse verplaatsingen en bijbehorende belastingduren is onderstaand beschreven.

- Opstelling 5 (Blokken op mijnsteen met uitvullaag):

Opvallend aan deze opstelling is een 0,8 m dikke mijnsteenlaag als ondergrond onder de uitvullaag. Tijdens het Deltagootonderzoek is voor deze mijnsteen een doorlatendheid gemeten van 0,003 m/s. Dat is gering in vergelijking met de gebruikelijke doorlatendheid van een uitvullaag (ordegrootte 0,1 à 0,2 m/s in de voor deze analyse beschouwde Deltagootproeven). Vanwege de huidige beperking van het rekenmodel om te kunnen rekenen met maximaal één filterlaag is de mijnsteen geschematiseerd als kleilaag (ondoorlatend). Om de invloed van de dikke laag mijnsteen niet volledig te verwaarlozen, is op basis van expert judgement ervoor gekozen om in de berekeningen de werkelijke filterlaagdikte met 20 procent te vergroten van 5 naar 6 cm.

Van opstelling 5 is uitsluitend proevenserie 2 (onregelmatige golven) beschouwd. In het rapport is vermeld dat aan het einde van de proevenserie een opwaartse verplaatsing van 3 cm was gemeten, waarvan sterk vermoed werd dat die volledig was opgetreden tijdens proef 5o06 welke een duur had van circa 1000 golven.

- Opstelling 6 (Blokken op een filter met ondiep water golfbelasting):

De modelopstelling is gelijk aan die van opstelling 5, maar de proeven zijn uitgevoerd met beduidend lagere waterstanden. Op opstelling 6 is één proevenserie uitgevoerd. De meeste proeven waren uitgevoerd met een duur van 100 à 200 golven. Van de paar proeven die wel een duur van circa 1000 golven hadden, was de golfhoogte het grootst tijdens de proeven 6o21 en 6o22, die vooral van elkaar verschilden ten aanzien van de golfperiode. Tijdens beide proeven is geen schade ontstaan (verplaatsing van 0 m).

Net als bij opstelling 5 is op basis van expert judgement gerekend met een 20 procent grotere filterlaagdikte (6 cm in plaats van 5 cm) ter compensatie van de niet in de berekeningen meegenomen mijnsteenlaag.

- Opstelling 12a (Blokken op hun kant, koud tegen elkaar):

Deze opstelling bevat nog steeds de ondergrond van 0,8 m mijnsteen, maar nu met een waterdicht folie erop, waardoor deze laag nu wel zonder meer beschouwd is als ondoorlatende kleilaag. Dit geldt ook voor de andere beschouwde (deel)opstellingen van opstelling 12, 20, 21 en 23.

Op opstelling 12a zijn vier proevenseries uitgevoerd, waarvan de laatste drie relevant zijn (onregelmatige golven):

- Serie 2 (de proeven 12ao1-12ao5). Aan het einde van deze proevenserie is een blok circa 12 cm omhooggekomen. Deze verplaatsing is vermoedelijk

- grotendeels of geheel ontstaan gedurende proef 12ao5, welke een duur had van circa 1000 golven.
- Serie 3 (de proeven 12ao6-12ao9). Tijdens 12ao8 (1000 golven) waren twee blokken 2 cm omhooggekomen en halverwege 12ao9 (dus na circa 500 golven) is een ander blok geheel uit het talud gekomen, wat neerkomt op een verplaatsingstoename van 20 cm gedurende 12ao9.
  - Serie 4 (de proeven 12ao10-12ao13, elk met een duur van circa 1000 golven). Tijdens proef 12ao10 waren drie blokken omhooggekomen, waarvan de maximale verplaatsing circa 3 cm was. Tijdens proef 12ao11 waren 8 blokken omhooggekomen, waarvan de maximale verplaatsing circa 5 cm was, deels in een grotere strook van de steenzetting. Het rapport geeft geen uitsluitel, maar de kans is groot dat dit een nieuwe verplaatsing betreft. Tijdens proef 12ao12 is geen aanvullende verplaatsing opgetreden, wat neerkomt op een verplaatsingstoename van 0 cm. Tijdens proef 12ao13 was de maximale verplaatsing 9 cm, die op basis van een foto lager lijkt te zijn opgetreden dan de bij voorgaande proeven genoemde schadezone. Dit lijkt daardoor een nieuwe verplaatsing te betreffen.
- Opstelling 12c (Blokken op hun kant met brede langsvoeg, met ronde stalen afstandhouders):  
Van opstelling 12c is uitsluitend proevenserie 2 beschouwd (onregelmatige golven), bestaand uit de proeven 12co1-12co7. Na de proeven 12co4, 12co5 en 12co7 werden verplaatsingen gemeten van respectievelijk 2,5 cm (na 1000 golven), 4,5 cm (na 1000 golven) en 20 cm (blok eruit na 23 minuten, ofwel na circa 241 golven). Op basis van de beperkte informatie in het rapport lijkt het aannemelijk dat dit steeds vervolgschade betreft, ofwel verplaatsingstoenames van respectievelijk 2,5 cm, 2,0 cm en 15,5 cm.
  - Opstelling 12cc (Blokken op hun kant met brede langsvoeg, met platte plastic afstandhouders):  
Op opstelling 12cc is één proevenserie uitgevoerd, bestaand uit de proeven 12cco1-12cco7. Na de proeven 12cco6 en 12cco7 werden verplaatsingen gemeten van respectievelijk meer dan 10 cm (na 1000 golven) en 20 cm (een blok eruit na 31 minuten, ofwel na circa 320 golven). Omdat in het rapport bij het eruit gekomen blok geen relatie met eerder opgetreden verplaatsingen is beschreven, is aangenomen dat het na 31 minuten uit het talud gekomen blok nieuw ontstane schade betreft, ofwel een verplaatsingstoename van 20 cm.
  - Opstelling 12cd (Blokken op hun kant met brede langsvoeg, met plastic afstandhouders met voetje):  
Op opstelling 12cd is één proevenserie uitgevoerd, bestaand uit de proeven 12cdo1-12cdo8. Al 6 minuten na het begin van proef 12cdo8 kwam een blok uit het talud, wat neerkomt op een verplaatsing van 20 cm. Omdat bij voorgaande proeven hierover niet wordt gesproken, wordt aangenomen dat deze schade tijdens proef 12cdo8 is ontstaan.  
Wel worden eerder in de proevenserie wat geringe hoogteverschillen genoemd boven instrumentatie, die onder de blokken aanwezig was. Dit is beschouwd als modeleffect. Deze geringe verplaatsingen worden daarom niet beschouwd.

- Opstelling 20a (Plat gezette blokken met brede stootvoegen: grote blokken van 50x50x20 cm<sup>3</sup>):  
Op opstelling 20a zijn twee proevenseries uitgevoerd, beide met onregelmatige golven:
  - Serie 1 (de proeven 20a01-20a04, zonder inwasmateriaal in de voegen). Pas tijdens de laatste proef 20a04 ontstond een opwaartse verplaatsing van circa 6,5 cm.
  - Serie 2 (de proeven 20a05-20a09, met inwasmateriaal in de stootvoegen). Na deze proeven waren verplaatsingen geconstateerd van respectievelijk circa 0 cm, 2,5 cm, 3 cm 7 cm en 7 cm. Verplaatsingen lijken op basis van profielmetingen vooral op nieuwe plaatsen te zijn opgetreden. Daarom is aangenomen dat dit steeds verplaatsingstoename betreft.
  
- Opstelling 20b (Plat gezette blokken met brede langs- of stootvoegen: kleine blokken van 25x25x10 cm<sup>3</sup>):  
Het talud had vanaf een hoogte van +3,0 m tot +3,75 m open langsvoegen met een voegbreedte van 12,5 mm met afstandhouders. Vanaf een hoogte van +3,75 m tot +5,00 m had het talud open stootvoegen met een voegbreedte van 12,5 mm zonder afstandhouders.  
Op opstelling 20b zijn twee proevenseries uitgevoerd, beide met onregelmatige golven en beide met ingewassen voegen:
  - Serie 1 (de proeven 20b01-20b05, met open stootvoegen zonder afstandhouders). Na de eerste proeven was genoteerd dat nog geen verplaatsingen aanwezig waren, maar na de proeven 20b04 en 20b05 waren wel verplaatsingen geconstateerd van respectievelijk 2,5 en 6 cm. Proef 20b05 was afgebroken na 18 minuten, ofwel na circa 298 golven.
  - Serie 2 (de proeven 20b06-20b10, met open langsvoegen met afstandhouders). Pas tijdens de laatste proef was een blok volledig uit het talud gekomen, wat neerkomt op een verplaatsing van 10 cm. Tijdens alle voorgaande proeven van deze serie waren geen verplaatsingen geconstateerd.
  
- Opstelling 21 (Op hun kant gezette Haringmanblokken met brede stootvoegen):  
Op deze opstelling is één proevenserie uitgevoerd, bestaand uit de proeven p21o01-p21o16. Tot en met proef p21o12 waren geen verplaatsingen zichtbaar. Na de proeven p21o13, p21o14, p21o15 en p21o16 waren verplaatsingen zichtbaar van respectievelijk 1, 2, 4 en 7 cm. Omdat deze verplaatsingen steeds op dezelfde locatie lijken te zijn opgetreden, wordt in deze analyse steeds het verschil tussen opeenvolgende verplaatsingen aangehouden als verplaatsingstoename, namelijk 1, 1, 2 en 3 cm. Doordat de golfhoogte tijdens p21o16 lager was dan tijdens de twee voorgaande proeven is interpretatie van het resultaat van deze proef dermate onzeker, dat deze proef verder buiten beschouwing is gelaten.
  
- Opstelling 23 (Op hun kant gezette vlakke blokken met brede stootvoegen):  
Op opstelling 23 zijn twee proevenseries uitgevoerd:
  - Serie 1 (de proeven p23o01-p23o02, zonder inwasmateriaal in de stootvoegen). Tijdens proef p23o02 kwamen twee blokken circa 2 cm omhoog.
  - Serie 2 (de proeven p23o03-p23o11, met inwasmateriaal in de stootvoegen). Tijdens proef p23o11 kwamen meerdere blokken omhoog, waarvan de hoogste 13 cm uitstak.

## A.2 Deltagootonderzoek 2005

In het Deltagootonderzoek van 2005 zijn golfproeven uitgevoerd op onder andere kleine blokken op hun kant ( $20 \times 20 \times 10 \text{ cm}^3$ ), koud tegen elkaar zonder inwasmateriaal. Er zijn drie proevenseries uitgevoerd die, op de ingolfproeven na, gezien kunnen worden als langeduurproeven. Het onderzoek is beschreven in [8]. Nadere toelichting op de proevenseries, de gebruikte proeven en interpretatie van de gemeten opwaartse verplaatsingen en bijbehorende belastingduren is onderstaand beschreven.

Een langeduurproef bestaat uit proeven met een ongeveer gelijke waterstand, golfhoogte en golfperiode, waarbij eventuele schade tussentijdse niet wordt hersteld. Daardoor kunnen binnen een langeduurproef alle deelproeven voorafgaand aan een verplaatsingsmeting gezien worden als één proef met één lange belastingduur. De relevante verplaatsingsstoename betreft in dat geval de verplaatsing ten opzichte van het begin van de langeduurproef.

De volgende drie proevenseries zijn uitgevoerd:

- Serie 1 (de proeven P4120-P4122). Al deze proeven zijn uitgevoerd met een ongeveer gelijke waterstand en golfhoogte zonder tussentijds herstel, wat het mogelijk maakt alle proeven te beschouwen als onderdeel van een langeduurproef. Al na de eerste proef P4120 (na 1 uur, ofwel 957 golven) waren er meerdere omhooggekomen stenen zichtbaar, waarvan de verst uitstekende steen een opwaartse verplaatsing had van 6 cm (zie Figuur 1.4). Na proef P4121 (na in totaal 2 uur, ofwel 1908 golven) was de maximale verplaatsing 6,5 cm. Na proef P4122 (na in totaal 3,62 uur, ofwel 3466 golven) kwam een zetsteen uit het talud, wat neerkomt op een opwaartse verplaatsing van 20 cm.
- Serie 2 (de proeven P4930-P4934). De eerste proef P4930, die niet heeft geleid tot opwaartse verplaatsingen, was uitgevoerd als ingolfproef met een wat lagere golfhoogte dan het vervolg van deze serie en is om die reden niet meegeteld als onderdeel van de langeduurproef. Na proef P4931 (na 1 uur, ofwel 1032 golven) was een blok circa 1,5 cm omhooggekomen. Na proef P4932 (na in totaal 3,5 uur, ofwel 3638 golven) waren meerdere blokken omhooggekomen, waarvan twee blokken 5,5 cm. Na proef P4934 (na in totaal 6,37 uur, ofwel 6570 golven) kwam een zetsteen uit het talud, wat neerkomt op een opwaartse verplaatsing van 20 cm.
- Serie 3 (de proeven P4040-P4541). De eerste proef P4040 is uitgevoerd als ingolfproef. Na deze proef (na 1 uur, ofwel 1210 golven) bleek een blok 2 cm omhoog te zijn gekomen. Deze ingolfproef is vanwege de lagere golfhoogte verder niet meer beschouwd als onderdeel van de langeduurproef. Vervolgens bestond deze 3<sup>e</sup> serie uit een langeduurproef met variërende waterstand. Vanwege de relatief grote stapgrootte in de waterstand ten opzichte van de significante golfhoogte zijn van deze serie sinds de ingolfproef alleen de proeven beschouwd bij de eerst beproefde waterstand (+4,11 m), namelijk de proeven P4140 en P4141. Na proef P4141 (na in totaal 3,5 uur bij waterstand +4,11 m, ofwel na 3988 golven) waren meerdere blokken omhoog gekomen, waarvan de verst uitstekende steen een opwaartse verplaatsing had van 4,5 cm.

## A.3 Deltagootonderzoek 2007

In het Deltagootonderzoek van 2007 zijn golfproeven uitgevoerd op grote blokken op hun kant ( $50 \times 50 \times 25 \text{ cm}^3$ ), koud tegen elkaar zonder inwasmateriaal. Er zijn twee proevenseries uitgevoerd die, op de ingolfproeven na, gezien kunnen worden als langeduurproeven. Het onderzoek is beschreven in [9]. Nadere toelichting op de proevenseries, de gebruikte proeven en interpretatie van de gemeten opwaartse verplaatsingen en bijbehorende belastingduren is onderstaand beschreven.

De volgende twee proevenseries zijn uitgevoerd:

- Serie 1 (de proeven T11-T17). De eerste twee proeven T11 en T12, die niet hebben geleid tot opwaartse verplaatsingen, waren uitgevoerd als ingolfproef met een wat lagere golfhoogte dan het vervolg van deze serie en zijn om die reden niet meegeteld als onderdeel van de langeduurproef. Pas na proef T17 (na in totaal 22.292 golven van de langeduurproef) was een blok circa 1,5 cm omhooggekomen.
- Serie 2 (de proeven T21-T26). De eerste proef T21, die niet heeft geleid tot opwaartse verplaatsingen, was uitgevoerd als ingolfproef met een wat lagere golfhoogte dan het vervolg van deze serie en is om die reden niet meegeteld als onderdeel van de langeduurproef. Zelfs na proef T26 (na in totaal 18.272 golven van de langeduurproef) waren er nog geen blokken omhoog gekomen.

## B Overzicht gebruikte Deltagootproeven

Eigenschappen van de beproefde steenzettingen, de hydraulische condities, de opwaartse verplaatsing(stoename) en de bijbehorende belastingduur zijn weergegeven in de tabellen in deze bijlage. De tabellen bevatten eerst de directe invoer voor het Matlab-model onder "Hydraulische belastingen" en "Overige invoer". Onder "Aanvullende invoer t.b.v. berekening k & k'" is aanvullende invoer gegeven voor het berekenen van k en k' in Steentoets (de met Steentoets berekende k en k' zijn vervolgens in de tabellen ingevuld onder "Overige invoer"). De tabellen eindigen onder "Gemeten opwaartse verplaatsing in Deltagoot" met  $Y_{\text{Deltagoot}}$ .

De tabellen bevatten de volgende parameters:

Parameter	Beschrijving	Eenheid
<b>HYDRAULISCHE BELASTINGEN</b>		
h	waterstand	NAP+m
H <sub>s</sub>	significante golfhoogte (in de achterliggende rapporten van de Deltagootproeven wordt uitsluitend de H <sub>s</sub> van de proeven gegeven. Deze waarde komt vrijwel overeen met H <sub>m0</sub> )	m
N	aantal golven	-
T <sub>p</sub>	piekperiode	s
<b>OVERIGE INVOER</b>		
b	dikte van de filterlaag	m
B	breedte van de zetsteen (maat in de richting van de teen naar de kruin)	m
D	dikte van de toplaag	m
g	versnelling van de zwaartekracht	m/s <sup>2</sup>
k	doorlatendheid van de filterlaag	m/s
k'	doorlatendheid van de toplaag	m/s
L	lengte van de zetsteen (maat in richting evenwijdig aan de waterlijn)	m
ρ <sub>w</sub>	dichtheid van water	kg/m <sup>3</sup>
ρ <sub>z</sub>	dichtheid van materiaal waarvan de zetsteen is gemaakt	kg/m <sup>3</sup>
tanα	helling van het steenzettingsegment	-
tanα <sub>bodem</sub>	helling van het voorland	-
toplaagtype	type toplaag (code zoals gebruikt in Steentoets)	-
Z <sub>bodem</sub>	niveau van het voorland bij de teen van de dijk	NAP+m
Z <sub>b</sub>	niveau van de bovenste overgangsconstructie	NAP+m
Z <sub>o</sub>	niveau van de onderste overgangsconstructie	NAP+m
<b>AANVULLENDE INVOER T.B.V. BEREKENING k &amp; k'</b>		
s <sub>s</sub>	breedte van de stootvoegen	mm
s <sub>l</sub>	breedte van de langsvoegen	mm
D <sub>15,filter</sub>	korrelgrootte van de filterlaag, die door 15% op basis van gewicht wordt onderschreden	mm
n	porositeit van het filter	-
onderlagen	opbouw van de onderlagen	-
ingewassen?	toplaag ingewassen?	-
D <sub>15,inwas</sub>	korrelgrootte van het inwasmateriaal, die door 15% op basis van gewicht wordt onderschreden	mm
<b>GEMETEN OPWAARTSE VERPLAATSING IN DELTAGOOT</b>		
Y <sub>Deltagoot</sub>	gemeten verplaatsing(stoename) in de Deltagoot (van de steen die het meest verplaatst is)	m

Deltagootonderzoek 1997-1998 [7]																	
Parameter	Eenheid	opstelling 5		opstelling 6		opstelling 12a						opstelling 12c			opstelling 12cc		opstelling 12cd
		serie 2		serie 1		serie 2		serie 3		serie 4		serie 2			serie 1		serie 1
Berekeningnaam		5o06	6o21	6o22	12ao5	12ao8	12ao9	12ao10	12ao11	12ao12	12ao13	12co4	12co5	12co7	12cco6	12cco7	12cdo8
<b>INVOER</b>																	
<b>HYDRAULISCHE BELASTINGEN</b>																	
h	NAP+m	4.00	2.20	2.20	4.80	4.71	4.91	4.70	4.81	4.93	5.00	4.90	5.03	5.00	4.94	4.95	4.96
H <sub>s</sub>	m	1.64	0.91	0.88	1.40	1.00	1.27	0.73	0.84	1.04	1.24	1.4	1.57	1.63	1.44	1.65	1.52
N	-	1000	1000	1000	1000	1000	500	1000	1000	1000	1000	1000	1000	241	1000	320	52
T <sub>p</sub>	s	6.90	9.40	7.20	4.70	4.90	5.50	5.20	5.50	6.40	6.60	4.70	4.80	6.30	6.10	6.40	7.60
<b>OVERIGE INVOER</b>																	
b	m	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
B	m	0.50	0.50	0.50	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
D	m	0.25	0.25	0.25	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
g	m/s <sup>2</sup>	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81
k	m/s	0.113	0.113	0.113	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114
k'	m/s	0.011	0.011	0.011	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.038	0.038	0.038	0.033	0.033	0.032
L	m	0.50	0.50	0.50	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
ρ <sub>w</sub>	kg/m <sup>3</sup>	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
ρ <sub>z</sub>	kg/m <sup>3</sup>	2383	2383	2383	2317	2317	2317	2317	2317	2317	2317	2317	2317	2317	2317	2317	2317
tanα	-	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857
tanα <sub>bodem</sub>	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
toplaagtype	-	11	11	11	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5
Z <sub>bodem</sub>	NAP+m	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Z <sub>b</sub>	NAP+m	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Z <sub>o</sub>	NAP+m	0.50	0.50	0.50	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
<b>AANVULLENDE INVOER T.B.V. BEREKENING k &amp; k'</b>																	
S <sub>s</sub>	mm	2	2	2	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48
S <sub>l</sub>	mm	1.6	1.6	1.6	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	10	10	10	8.5	8.5	8
D <sub>15,filter</sub>	mm	7.1	7.1	7.1	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2
n	-	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
onderlagen	-	st my ge	st my ge	st my ge	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl
ingewassen?	-	nee	nee	nee	nee	nee	nee	nee	nee	nee	nee	ja	ja	ja	ja	ja	ja
D <sub>15,inwas</sub>	mm											5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
<b>GEMETEN OPWAARTSE VERPLAATSING IN DELTAGOOT</b>																	
Y <sub>Deltagoot</sub>	m	0.03	0	0	0.12	0.02	0.2	0.03	0.05	0	0.09	0.025	0.02	0.155	0.1	0.2	0.2

Deltagootonderzoek 1997-1998 [7]																					
Parameter		opstelling 20a serie 1					opstelling 20a serie 2					opstelling 20b serie 1					opstelling 20b serie 2				
		20a01	20a02	20a03	20a04	20a05	20a06	20a07	20a08	20a09	20b01	20b02	20b03	20b04	20b05	20b06	20b07	20b08	20b09	20b10	
Einheid																					
<b>INVOER</b>																					
<b>HYDRAULISCHE BELASTINGEN</b>																					
h	NAP+m	4.20	4.05	4.15	4.20	4.00	4.23	4.17	4.28	4.28	4.45	4.44	4.58	4.58	4.61	3.63	3.62	3.75	3.77	3.76	
H <sub>s</sub>	m	0.293	0.62	0.407	0.629	0.581	0.634	0.625	0.837	0.837	0.281	0.321	0.321	0.422	0.523	0.278	0.319	0.319	0.427	0.513	
N	-	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	298	1000	1000	1000	1000	1000	
T <sub>p</sub>	s	3.26	3.00	3.17	4.01	2.94	5.07	4.03	4.57	4.62	2.18	2.75	3.32	3.18	3.98	2.16	2.71	3.41	3.13	4.00	
<b>OVERIGE INVOER</b>																					
b	m	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
B	m	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	
D	m	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	
g	m/s <sup>2</sup>	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	
k	m/s	0.203	0.203	0.203	0.203	0.203	0.203	0.203	0.203	0.203	0.149	0.149	0.149	0.149	0.149	0.149	0.149	0.149	0.149	0.149	
k'	m/s	0.054	0.054	0.054	0.054	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	
L	m	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	
ρ <sub>w</sub>	kg/m <sup>3</sup>	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
ρ <sub>z</sub>	kg/m <sup>3</sup>	2337	2337	2337	2337	2337	2337	2337	2337	2337	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	
tanα	-	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	
tanα <sub>bodem</sub>	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
toplaagtype	-	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	
Z <sub>bodem</sub>	NAP+m	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Z <sub>b</sub>	NAP+m	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	
Z <sub>o</sub>	NAP+m	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	
<b>AANVULLENDE INVOER T.B.V. BEREKENING k &amp; k'</b>																					
s <sub>s</sub>	mm	25	25	25	25	25	25	25	25	25	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	
s <sub>l</sub>	mm	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	
D <sub>15,filter</sub>	mm	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	
n	-	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	
onderlagen	-	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	
ingewassen?	-	nee	nee	nee	nee	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	
D <sub>15,inwas</sub>	mm					15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	
<b>GEMETEN OPWAARTSE VERPLAATSING IN DELTAGOOT</b>																					
Y <sub>Deltagoot</sub>	m	0	0	0	0.065	0	0.025	0.03	0.07	0.07	0	0	0	0.025	0.06	0	0	0	0	0.1	

		Deltagootonderzoek 1997-1998 [7]								Deltagootonderzoek 2005 [8] (langeduurproeven)							Deltagootonderzoek 2007 [9] (langeduurproeven)						
		opstelling 21 serie 1				opstelling 23 serie 1		opstelling 23 serie 2		serie 1			serie 2			serie 3 ingolven		serie 3		serie 1		serie 2	
Parameter	Eenheid	p21o12	p21o13	p21o14	p21o15	p23o01	p23o02	p23o10	p23o11	P4120	P4120-P4121	P4120-P4122	P4931	P4931-P4932	P4931-P4934	P4040	P4140-P4141	T13-T17	T22-T26				
<b>INVOER</b>																							
<b>HYDRAULISCHE BELASTINGEN</b>																							
h	NAP+m	5.00	4.99	4.98	5.01	4.55	4.55	4.97	4.94	4.10	4.10	4.10	4.90	4.90	4.90	4.00	4.11	4.69	4.91				
H <sub>s</sub>	m	1.169	1.349	1.563	1.699	0.43	0.524	1.334	1.543	0.830	0.830	0.826	0.640	0.654	0.666	0.450	0.534	1.55	1.57				
N	-	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	957	1908	3466	1032	3638	6570	1210	3988	22292	18272				
T <sub>p</sub>	s	5.40	5.56	6.36	6.43	3.16	3.55	5.53	6.35	4.32	4.36	4.37	3.88	3.89	3.88	3.15	3.47	5.36	7.04				
<b>OVERIGE INVOER</b>																							
b	m	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.115	0.115				
B	m	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.25	0.25				
D	m	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.50	0.50				
g	m/s <sup>2</sup>	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81				
k	m/s	0.122	0.122	0.122	0.122	0.122	0.122	0.122	0.122	0.106	0.106	0.106	0.106	0.106	0.106	0.106	0.106	0.078	0.078				
k'	m/s	0.011	0.011	0.011	0.011	0.044	0.044	0.010	0.010	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.029	0.029				
L	m	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.50	0.50				
ρ <sub>w</sub>	kg/m <sup>3</sup>	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000				
ρ <sub>s</sub>	kg/m <sup>3</sup>	2202	2202	2202	2202	2279	2279	2279	2279	2317	2317	2317	2317	2317	2317	2317	2317	2281	2281				
tanα	-	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.2857	0.3333	0.3333				
tanα <sub>bodem</sub>	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
toplaagtype	-	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4				
Z <sub>bodem</sub>	NAP+m	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
Z <sub>b</sub>	NAP+m	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.45	5.45				
Z <sub>o</sub>	NAP+m	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.24	2.24				
<b>AANVULLENDE INVOER T.B.V. BEREKENING k &amp; k'</b>																							
s <sub>s</sub>	mm	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	2.4	2.4				
s <sub>i</sub>	mm	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	2.4	2.4				
D <sub>15,filter</sub>	mm	8	8	8	8	8	8	8	8	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	4.5	4.5				
n	-	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4				
onderlagen	-	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl	st ge kl				
ingewassen?	-	ja	ja	ja	ja	nee	nee	ja	ja	nee	nee	nee	nee	nee	nee	nee	nee	nee	nee				
D <sub>15,invas</sub>	mm	2.7	2.7	2.7	2.7			2.6	2.6														
<b>GEMETEN OPWAARTSE VERPLAATSING IN DELTAGOOT</b>																							
Y <sub>Deltagoot</sub>	m	0	0.01	0.01	0.02	0	0.02	0	0.13	0.06	0.065	0.2	0.015	0.055	0.2	0.02	0.045	0.015	0				

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

**Deltares**

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)