

## Probabilistisch beoordelen en ontwerpen grasbekleding

samenvoegen GEBU en GEKB



**Probabilistisch beoordelen en ontwerpen grasbekleding  
samenvoegen GEBU en GEKB**

**Auteur(s)**

Alfons Smale

Wouter Jan Klerk

**Probabilistisch beoordelen en ontwerpen grasbekleding**  
samenvoegen GEBU en GEKB

<b>Opdrachtgever</b>	Waterschap Zuiderzeeland
<b>Contactpersoon</b>	de heer D.J. Smeenge
<b>Referenties</b>	-
<b>Trefwoorden</b>	Beoordeling, Ontwerp, Grasbekleding, Hydra-Ring

**Documentgegevens**

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	12-07-2021
<b>Projectnummer</b>	11206202-002
<b>Document ID</b>	11206202-002-HYE-0001
<b>Pagina's</b>	73
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

**Auteur(s)**

	A.J. Smale W.J. Klerk	

<b>Doc. Versie</b>	<b>Auteur</b>	<b>Controle</b>	<b>Akkoord</b>	<b>Publicatie</b>
1.0	A.J. Smale W.J. Klerk	K. Wojciechowska	D.J. Walstra	

# Samenvatting

Waterschap Zuiderzeeland heeft een beoordeling uitgevoerd van de IJsselmeerdijken (normtraject 8-3a). Geconcludeerd is dat de overstromingskans groter is dan de ondergrenswaarde die in de wet is vastgelegd. De hoge overstromingskansen worden onder meer veroorzaakt door de hoge kans op falen van de grasbekleding op de dijk (zowel op het buitentalud als op de kruin en het binnentalud).

Voor ontwerp en gedetailleerde beoordeling van de grasbekleding kan gebruik worden gemaakt van de gecombineerde kansruimte voor GEBU en GEKB (  $24\% + 5\% = 29\%$  ), indien de mechanismen GEBU en GEKB gecombineerd worden. Door per gebeurtenis te kijken naar zowel buitentalud als kruin en binnentalud wordt de hierboven geschetste discrepantie weggenomen: de gehele grasmat faalt op het buitentalud OF op de kruin/binnentalud. Deze rapportage beschrijft de ontwikkeling van een “plug-in” voor Hydra-Ring waarbij de drie genoemde mechanismen (GEKB, GEBU-oploop en GEBU-golfklap) gecombineerd kunnen worden.

De in dit project ontwikkelde “plug-in” maakt het mogelijk om in een probabilistische omgeving de faalkans van de grasbekleding te bepalen, waarin de drie beschouwde mechanismen gecombineerd worden. Hiervoor zijn de bestaande beschrijvingen van de faalmechanismen in aangepaste vorm geïmplementeerd. Waar mogelijk is deze implementatie vergeleken met bestaande implementaties. In gevallen waar dit niet mogelijk was, is een alternatieve vergelijking gemaakt.

De toepassing van de “plug-in” in het probabilistische model is uitgebreid geverifieerd door de resultaten in de genormaliseerde U-ruimte te beschouwen. Dit heeft voor het mechanisme GEBU-golfklap geleid tot het toevoegen van een gladde functie zodat ook met goedkopere rekentechnieken gerekend kan worden.

De resulterende “plug-in” is vergeleken met de in de eerste fase van dit project gehanteerde Monte Carlo analyse. Uit deze vergelijking volgt dat ook met behulp van de “plug-in” een sterke correlatie tussen de mechanismen gevonden wordt, waardoor samenvoegen van de mechanismen effect heeft.

Geconcludeerd wordt dat de ontwikkelde “plug-in” de faalmechanismen GEBU-klap, GEBU-oploop en GEKB op een juiste wijze combineert. De “plug-in” kan gebruikt worden voor het beoordelen en ontwerpen van grasbekleding als geheel. Hierbij kan veelal met de goedkope rekentechniek FORM gerekend worden. In sommige gevallen (indien FORM niet convergeert) is het noodzakelijk over te stappen op een nauwkeurige maar rekenintensieve techniek (bijvoorbeeld Directional Sampling). Daarnaast wordt aanbevolen om na iedere berekening te verifiëren of sprake is van convergentie en of het zinnig is om over te stappen op een duurdere rekentechniek.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>7</b>
1.1	Achtergrond	7
1.2	Aanpak	8
1.3	Leeswijzer	8
<b>2</b>	<b>Implementatie faalmechanismen</b>	<b>9</b>
2.1	Generatie tijdreeksen	9
2.1.1	Constant (reekstype = 0)	10
2.1.2	Constante waterstand en trapezium golfcondities (reekstype = 1)	10
2.1.3	Getijsignaal met trapezium voor opzet en trapezium golfcondities (reekstype = 2)	11
2.1.4	Meerpeilopzet met trapezium voor opzet en trapezium golfcondities (reekstype =3)	12
2.2	Grasbekleding Erosie Buitentalud (GEBU) – golfklap	13
2.2.1	Implementatie	13
2.2.2	Validatie	15
2.2.3	Aanpassingen ten behoeve van probabilistische omgeving	16
2.3	Grasbekleding Erosie Buitentalud (GEBU) – golfoploop	19
2.3.1	Implementatie	19
2.3.2	Validatie mechanisme GEBU	20
2.3.3	Validatie golfoploopberekening ( $z_{2\%}$ ) met ongelijke hellingen onder- en boventalud	22
2.3.4	Validatie golfoploopberekening ( $z_{2\%}$ ) met zone afwijkende ruwheidscoëfficiënt	22
2.3.5	Aanpassingen ten behoeve van probabilistische omgeving	24
2.4	Grasbekleding Erosie Kruin en Binnentalud (GEKB)	28
2.4.1	Implementatie	28
2.4.2	Validatie	30
<b>3</b>	<b>Probabilistisch model</b>	<b>33</b>
3.1	Grasbekleding Erosie Buitentalud (GEBU) – golfklap	33
3.2	Grasbekleding Erosie Buitentalud (GEBU) – golfoploop	35
3.3	Grasbekleding Erosie Kruin en Binnentalud (GEKB)	36
3.4	Combinatie van mechanismen	37
<b>4</b>	<b>Integratie tests</b>	<b>40</b>
4.1	Vergelijk probabilistisch model met Crude Monte Carlo	41
4.2	Consistentie checks	43
<b>5</b>	<b>Gebruikershandleiding</b>	<b>47</b>
5.1	Omschrijving uitlevering	47
5.2	Berekeningen uitvoeren met de plug-in met Hydra-Ring	47
5.2.1	Vorbereidende activiteiten	47
5.2.2	Testen installatie	47

5.2.3	Zelf berekeningen definiëren en uitvoeren	48
5.2.3.1	Aanpassingen "1.ini"	48
5.2.3.2	Aanpassingen "1.sql":	48
5.2.3.3	Aanpassingen "run.bat":	51
5.2.3.4	Sommen maken met losse mechanismen	51
5.3	Inspectie van resultaten	52
5.4	Controle convergentie FORM	52
5.5	Inspectie faalkansbijdragen mechanismen	53
5.6	Inspectie ontwerp punt	55
5.7	Inspectie faalkansbijdragen stochasten	56
<b>6</b>	<b>Consequenties voor GABI en GABU</b>	<b>57</b>
6.1	Mogelijke gevolgen van samenvoegen faalkansruimte in het ontwerp	57
6.2	Gevolgen voor gras afschuiven binnentalud (GABI)	57
6.3	Gevolgen voor gras afschuiven buitentalud (GABU)	58
6.4	Conclusie met betrekking tot GABI en GABU	59
<b>7</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>60</b>
	<b>Referenties</b>	<b>61</b>
<b>A.</b>	<b>Resultaat verkenning toegevoegde waarde bundelen GEBK en GEBU</b>	<b>62</b>
<b>B.</b>	<b>Validatie GEBU-klap</b>	<b>63</b>
<b>C.</b>	<b>Validatie GEBU-oploop</b>	<b>65</b>
<b>D.</b>	<b>Controle U-ruimte GEBU-klap</b>	<b>67</b>
<b>E.</b>	<b>Controle U-ruimte GEBU-oploop</b>	<b>69</b>
<b>F.</b>	<b>Controle U-ruimte GEKB</b>	<b>71</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

Waterschap Zuiderzeeland heeft een beoordeling uitgevoerd van de IJsselmeerdijken (normtraject 8-3a). Geconcludeerd is dat de overstromingskans groter is dan de ondergrenswaarde die in de wet is vastgelegd. De hoge overstromingskansen worden onder meer veroorzaakt door de hoge kans op falen van de grasbekleding op de dijk (zowel op het buitentalud als op de kruin en het binnentalud).

Voor de beoordeling van de grasbekleding zijn - ten behoeve van de gedetailleerde toets op vak/mechanismeniveau – op basis van de norm op trajectniveau de eisen op doorsnedeniveau afgeleid. Met een semi-probabilistische analyse kan vervolgens worden gecontroleerd of aan deze eisen worden voldaan. Voor de grasbekleding wordt daarbij onderscheid gemaakt tussen de mechanismen Grasbekleding Erosie Buitentalud (GEBU, grasbekleding in zowel golfklap als golfploop) en Grasbekleding Erosie Kruin en Binnentalud (GEKB). Deze mechanismen worden onafhankelijk van elkaar beoordeeld, waarbij de kansbijdragen aan de totale faalkans van de dijk vooraf vastgelegd zijn in de faalkansbegroting, respectievelijk 5% en 24%. In een gedetailleerde beoordeling op trajectniveau (niet ondersteund door het WBI2017) of Toets op Maat kan zonder of met een afwijkende kansverdeling worden gerekend. Dit is in het geval van de beoordeling van normtraject 8-3a (nog) niet gedaan.

Het vastleggen van de faalkansbegroting en loskoppelen van de beide mechanismen leidt soms tot bijzondere situaties. Zo wordt het gras juist aan de buitenzijde van de buitenkruinlijn met een factor 5 strengere eis beoordeeld ten opzichte van het gras aan de binnenzijde van de buitenkruinlijn, terwijl het gras (zeker in het geval van normtraject 8-3a) door vergelijkbare gebeurtenissen wordt belast. Anders gezegd: bij de condities waarbij de grasbekleding op het buitentalud niet mag falen is de grasbekleding op de kruin mogelijk allang gefaald (en is reeds sprake van een doorbraak).

Vanuit het perspectief van de ontwikkeling van het beoordelingsinstrumentarium is te begrijpen waardoor deze situatie is ontstaan, maar met de kennis van nu is het mogelijk om dit anders in te vullen, namelijk door grasbekleding (op buitentalud EN kruin en binnentalud) als één mechanisme te beschouwen. Voor ontwerp en gedetailleerde beoordeling van de grasbekleding kan dan gebruik worden gemaakt van de gecombineerde faalkansruimte voor GEBU en GEKB ( $24\% + 5\% = 29\%$ ). Door per gebeurtenis te kijken naar zowel buitentalud als kruin en binnentalud wordt de hierboven geschetste discrepantie weggenomen: de gehele grasmat faalt op het buitentalud OF op de kruin/binnentalud. Dit rapport beschrijft de ontwikkeling van een “plug-in” voor Hydra-Ring waarbij de drie genoemde mechanismen (GEKB, GEBU-oploop en GEBU-golfklap) gecombineerd kunnen worden.

Hoewel het mogelijk is om ook de harde bekleding (met een eigen faalkansruimte van 5%) hierbij te betrekken, richt deze studie zich enkel op de grasbekleding.

## 1.2 Aanpak

Voor het combineren van de mechanismen GEBU (golflap en golfoploop) en GEKB is een stapsgewijze aanpak voorgesteld om enerzijds de toegevoegde waarde van de het combineren in beeld te brengen en anderzijds om effecten van keuzes te onderzoeken. De eerste stap/fase “*Snelle implementatie om het effect op het ontwerp te kunnen duiden (veel/weinig winst)*” is reeds uitgevoerd en heeft geleid tot het besluit om over te gaan tot implementatie van de combinatie van GEBU en GEKB in een probabilistische omgeving. Het resultaat van deze eerste stap/fase is integraal opgenomen als Bijlage A van deze rapportage.

De huidige rapportage beschrijft de tweede stap: “*De implementatie van de combinatie van GEBU (golflap en golfoploop) en GEKB in een probabilistische omgeving*”. De implementatie is gerealiseerd middels een zogenoemde “plug-in” voor Hydra-Ring. De “plug-in” de waarde van de grestoestandsfunctie  $Z$  ( $Z = \text{sterkte} - \text{belasting}$ ) gegeven door Hydra-Ring aangeboden sterkte en belasting eigenschappen. De “plug-in” beschrijft effectief de fysica van het faalmechanisme; Hydra-Ring maakt het mogelijk om daar vervolgens probabilistisch mee te rekenen.

Ten behoeve van de implementatie zijn allereerst de drie faalmechanismen (GEBU-golflap, GEBU-oploop en GEKB) geïmplementeerd en gevalideerd in een deterministische context. Vervolgens zijn de drie mechanismen individueel gevalideerd in de probabilistische omgeving. De combinatie van de drie mechanismen in een probabilistische context is vervolgens gevalideerd met behulp van de Monte Carlo berekeningen uit de eerste stap en met gevoeligheidsberekeningen.

Opgemerkt wordt dat de hier gevolgde aanpak van het combineren van de mechanismen GEKB en GEBU op doorsnedeniveau alleen mogelijk is vanwege het feit dat de bepalende factoren voor het lengte-effect (gebruikt in de vertaling van traject-eis naar doorsnede-eis) vergelijkbaar zijn. Het op doorsnede-eis combineren van GEKB/GEBU met andere mechanismen vraagt aanvullende aanpassingen.

Door Waterschap Zuiderzeeland is tevens de vraag gesteld hoe met de mechanismen GABI (Gras Afschuiven Binnentalud) en GABU (Gras Afschuiven Buitentalud) omgegaan moet worden nadat de mechanismen GEBU en GEKB zijn samengevoegd. Deze rapportage beschrijft op welke wijze de beoordeling voor GABI en GABU wijzigt.

## 1.3 Leeswijzer

Deze rapportage beschrijft in Hoofdstuk 2 de implementatie van de individuele faalmechanismen, als ook de validatie van deze implementatie in een deterministische context. In Hoofdstuk 3 wordt de toepassing van de individuele faalmechanismen in een probabilistische context gevalideerd, waarna in Hoofdstuk 4 het gecombineerde probabilistische model wordt gevalideerd. In Hoofdstuk 5 wordt beschreven hoe het resulterende model gebruikt kan worden. Tot slot wordt in Hoofdstuk 6 nader ingegaan op de consequenties van het samenvoegen van de mechanismen GEBU en GEKB voor de mechanismen GABI en GABU.



## 2 Implementatie faalmechanismen

De combinatie van GEBU en GEKB wordt gerealiseerd middels een zogenoemde “plug-in” voor Hydra-Ring. Hydra-Ring is het rekenhart van de beoordelingssoftware Riskeer en bepaalt de kans dat de sterkte kleiner is dan de belasting. Een “plug-in” is een module die buiten Hydra-Ring wordt gemaakt en welke door Hydra-Ring kan worden aangeroepen om de zogenaamde “Z-functie” (ofwel een grenstoestandsfunctie) te evalueren. De “Z-functie” het niets anders dan de sterkte minus de belasting, waarbij een waarde van “0.0” precies de situatie van falen beschrijft. Dit is een gangbare wijze om de belastingen en de sterkte met elkaar te vergelijken: de huidige beoordeling GEKB maakt ook gebruik van een “plug-in” waarin een equivalent van PC-Overslag opgenomen is en de bijbehorende “Z-functie” bestaat uit het vergelijken van het berekende overslagdebiet met een kritiek overslagdebiet.

In dit hoofdstuk wordt de implementatie van de verschillende mechanismen/componenten in de “plug-in” beschreven. Voor een aantal mechanismen worden (beperkte) aanpassingen doorgevoerd vanwege eisen, die door de probabilistische omgeving worden gesteld of vanwege nieuwe inzichten bij de uitwerking van het mechanisme.

Het rekenhart Hydra-Ring voert de probabilistische som uit op basis van piekwaarden van de (extreme) gebeurtenissen. De beoordeling van de mechanismen vraagt echter om tijdsverlopen van belastingen, zie (RWS, 2019). Dit betekent dat de “plug-in” een vertaling moet maken van piekwaarden naar een tijdsverloop; de hiervoor uitgevoerde implementatie wordt ook in dit hoofdstuk beschreven.

Tot slot wordt opgemerkt dat er géén aanpassingen worden gedaan aan Hydra-Ring. Dit betekent dat gebruik gemaakt kan worden van de Hydra-Ring versie welke via de Helpdesk Water beschikbaar wordt gesteld. De “plug-in” is ontwikkeld en getest met Riskeer versie 19.1.1.2.

### 2.1 Generatie tijdreeksen

De faalmechanismen GEBU en GEKB vragen om een tijdsafhankelijk verloop van de waterstanden en golven: het verloop binnen een storm met piekwaarden overeenkomstig de in Hydra-Ring gehanteerde statistiek. In RWS (2019) wordt voor de beoordeling van de grasmat een aantal tijdsverlopen voorgeschreven. Als onderdeel van de “plug-in” zijn een aantal relevante benaderingen van deze tijdsverlopen geïmplementeerd, welke onderstaand worden toegelicht. De in de “plug-in” geïmplementeerde tijdverlopen zijn een benadering van de werkelijke verlopen van belastingen. Per project/watersysteem dient nagegaan te worden (i) welk verloop van toepassing is, (ii) of het gewenste verloop beschikbaar is binnen de huidige versie van de “plug-in” en (iii) welke waarden gehanteerd dienen te worden voor de constructie van de tijdsverlopen. De in dit rapport getoonde verlopen zijn slechts voorbeelden.

Hydra-Ring levert aan de “plug-in” enkel de piekwaarden (waterstand en golfcondities) aan. Binnen de “plug-in” wordt een tijdsverloop geconstrueerd met deze piekwaarden als maxima. In de invoerfile van Hydra-Ring kan het reekstype worden aangegeven, zie hoofdstuk 5. Verder kunnen de volgende eigenschappen worden meegegeven in de invoerfile:

- $T_{\text{basis}}$  = basisduur van de trapezia in uren
- $T_{\text{piek}}$  = duur van de piek van de trapezia in uren
- $A_{\text{getij}}$  = getijamplitude in meters
- $dt$  = te hanteren tijdstap voor de tijdreeksen

De voor de constructie van de tijdreeks benodigde waterstand ( $h_{piek}$ ), golfhoogte ( $H_{m0,piek}$ ), piek golfperiode ( $T_{m-1,0,piek}$ ) en golfrichting ( $\Theta_{piek}$ ) worden door Hydra-Ring aan de “plug-in” aangeleverd – dat zijn de (piek)waarden, die bij een extreme gebeurtenis horen. Specifiek voor reekstype = 3 (zie 2.1.4) is ook het meerpeil benodigd: deze wordt ook door Hydra-Ring aangeleverd. Echter, de wijze waarop deze wordt aangeleverd verschilt per watersysteem. In de “plug-in” is uitgegaan van watersysteem IJsselmeer, reekstype 3 kan daarom niet voor andere watersystemen gebruikt worden.

Verder wordt opgemerkt dat er in de “plug-in” vooralsnog geen controle en/of correctie van de golfcondities plaats vindt ten aanzien van de  $H_{m0}/d$  verhouding, dit is veelal een veilige benadering.

### 2.1.1 Constant (reekstype = 0)

De meest eenvoudige tijdreeks betreft een tijdreeks met constante waarden overeenkomstig de piekwaarden. De tijdreeks is als volgt gedefinieerd:

$$\begin{aligned} h(-0.5T_{basis} : dt : +0.5T_{basis}) &= h_{piek} \\ H_{m0}(-0.5T_{basis} : dt : +0.5T_{basis}) &= H_{m0,piek} \\ T_{m-1,0}(-0.5T_{basis} : dt : +0.5T_{basis}) &= T_{m-1,0,piek} \\ \theta(-0.5T_{basis} : dt : +0.5T_{basis}) &= \theta_{piek} \end{aligned} \quad (2.1)$$

### 2.1.2 Constante waterstand en trapezium golfcondities (reekstype = 1)

Ten behoeve van watersystemen zoals Bovenrivieren kan gebruik worden gemaakt van een reekstype waarbij de waterstand constant is in de tijd, maar waarbij het verloop van de golfhoogte en de golfperiode op basis van een trapezium is geconstrueerd:

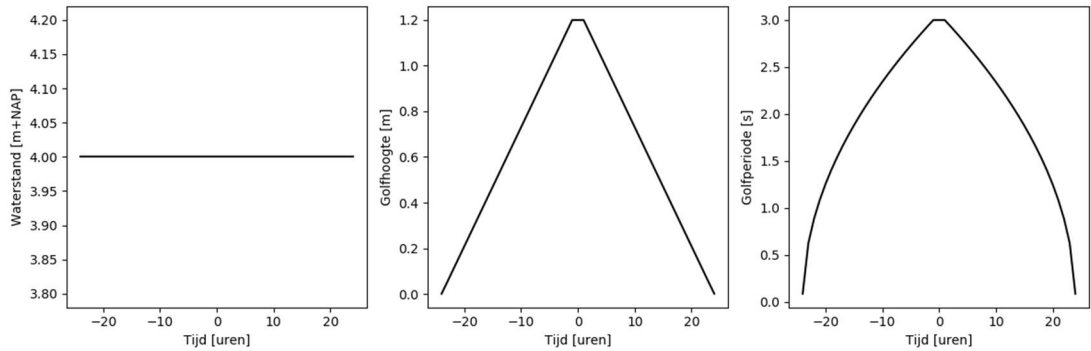
$$\begin{aligned} h(-0.5T_{basis} : dt : +0.5T_{basis}) &= h_{piek} \\ H_{m0}(-0.5T_{basis} : dt : +0.5T_{basis}) &= H_{m0,piek} - \left( \max \left( \left| \text{time} - 0.5T_{piek} \right| ; 0.5T_{piek} \right) \right) \frac{\partial H_{m0}}{\partial t}_{flank} \\ T_{m-1,0}(-0.5T_{basis} : dt : +0.5T_{basis}) &= \left( H_{m0} \frac{T_{m-1,0,piek}^2}{H_{m0,piek}} \right)^{0.5} \\ \theta(-0.5T_{basis} : dt : +0.5T_{basis}) &= \theta_{piek} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Hierin is:

$$\frac{\partial H_{m0}}{\partial t}_{flank} = \frac{H_{m0,piek}}{0.5(T_{basis} - T_{piek})} \quad (2.3)$$

In Figuur 2-1 is een voorbeeld van geconstrueerde tijdreeksen voor reekstype = 1 getoond. Hierin is de constante waterstand en het trapezium voor de golfhoogte duidelijk te zien. Het verloop van de golfperiode volgt niet een trapezium omdat er gekozen is voor het hanteren van een constante golfsteilheid gedurende de tijdsverlopen (met de golfsteilheid gelijk aan de

golfsteilheid tijdens de piek van de storm). Vanwege het kwadratische verband leidt tot een niet-lineair verloop van de golfperiode.



Figuur 2-1: Voorbeeld geconstrueerd tijdsverloop (reekstypetype = 1),  $h_{piek} = 4.0 [m+NAP]$ ,  $H_{m0, piek} = 1.2 [m]$ ,  $T_{m-1,0, piek} = 3.0 [s]$ .

### 2.1.3 Getijsignaal met trapezium voor opzet en trapezium golfcondities (reekstypetype = 2)

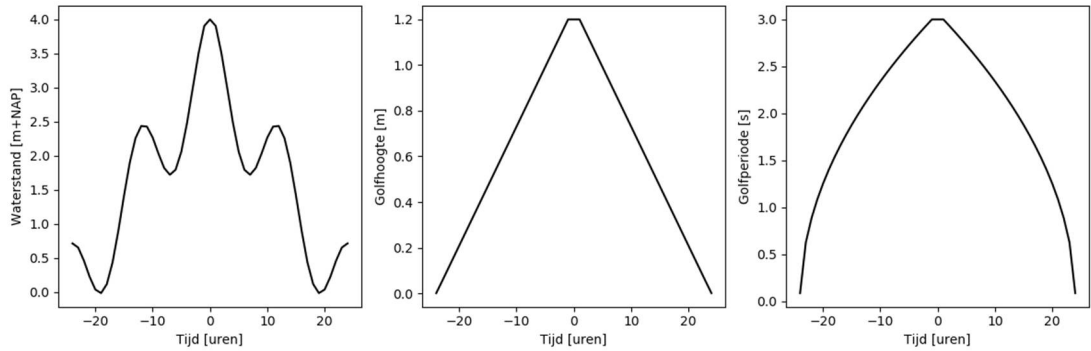
Voor watersystemen behorende bij de Kust wordt in RWS (2019) een waterstandsverloop voorgesteld dat bestaat uit een getijsignaal met hierop gesuperponeerd een trapeziumvormige windopzet. Golfcondities verlopen via een trapeziumverloop. In de 'plug-in' wordt dit verloop (reekstypetype = 2 ) als volgt geconstrueerd:

$$\begin{aligned}
 h(-0.5T_{basis} : dt : +0.5T_{basis}) &= A_{getij} \cos\left(2\pi \frac{time}{\omega_{getij}}\right) + \\
 &\quad (h_{piek} - A_{getij}) - \left(\max\left(\left|\frac{time - 0.5T_{piek}}{0.5T_{piek}}\right|; \right)\right) \frac{\partial h}{\partial t}_{flank, getij} \\
 H_{m0}(-0.5T_{basis} : dt : +0.5T_{basis}) &= H_{m0, piek} - \left(\max\left(\left|\frac{time - 0.5T_{piek}}{0.5T_{piek}}\right|; \right)\right) \frac{\partial H_{m0}}{\partial t}_{flank} \quad (2.4) \\
 T_{m-1,0}(-0.5T_{basis} : dt : +0.5T_{basis}) &= \left(H_{m0} \frac{T_{m-1,0, piek}^2}{H_{m0, piek}}\right)^{0.5} \\
 \theta(-0.5T_{basis} : dt : +0.5T_{basis}) &= \theta_{piek}
 \end{aligned}$$

Hierin is:

$$\frac{\partial h}{\partial t}_{flank, getij} = \frac{h_{piek} - A_{getij}}{0.5(T_{basis} - T_{piek})} \quad (2.5)$$

In Figuur 2-2 is een voorbeeld van de geconstrueerde tijdreeks voor reekstypetype = 2 getoond. Het verloop van de golfhoogte en golfperiode is gelijk aan het verloop getoond voor reekstypetype = 1, omdat hier ook een trapezium wordt gehanteerd. Het verloop van de waterstand laat duidelijk de getijcomponent in het verloop zien. Ook is duidelijk dat de piek van de opzet samenvalt met de piek van het getij-signaal: dit is overeenkomstig met RWS (2019).



Figuur 2-2: Voorbeeld geconstrueerd tijdsverloop (reeksotype =2),  $h_{piek} = 4.0$  [m+NAP],  $A_{getij} = 0.75$  [m],  $H_{m0,piek} = 1.2$  [m],  $T_{m-1,0,piek} = 3.0$  [s].

#### 2.1.4 Meerpeilopzet met trapezium voor opzet en trapezium golfcondities (reeksotype =3)

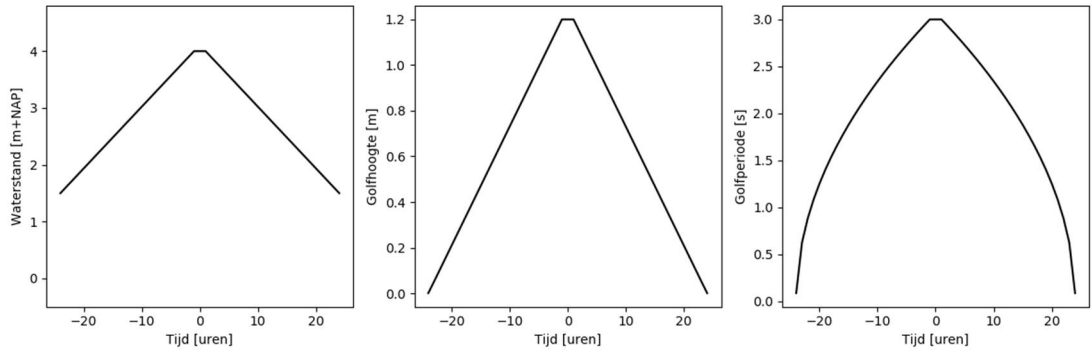
Voor het merengebied kan een verloop van de waterstand worden gehanteerd dat bestaat uit het meerpeil met hierop gesuperponeerd een trapeziumverloop van de windopzet. De golfcondities volgen een trapezium verloop. In de 'plug-in' wordt dit verloop (reeksotype = 3) als volgt geconstrueerd:

$$\begin{aligned}
 h(-0.5T_{basis} : dt : +0.5T_{basis}) &= h_{meerpeil} + \\
 &\quad \left( h_{piek} - h_{meerpeil} \right) - \left( \max \left( \left| \frac{time - 0.5T_{piek}}{0.5T_{piek}} \right| ; \right) \right) \frac{\partial h}{\partial t}_{flank,meer} \\
 H_{m0}(-0.5T_{basis} : dt : +0.5T_{basis}) &= H_{m0,piek} - \left( \max \left( \left| \frac{time - 0.5T_{piek}}{0.5T_{piek}} \right| ; \right) \right) \frac{\partial H_{m0}}{\partial t}_{flank} \quad (2.6) \\
 T_{m-1,0}(-0.5T_{basis} : dt : +0.5T_{basis}) &= \left( H_{m0} \frac{T_{m-1,0,piek}^2}{H_{m0,piek}} \right)^{0.5} \\
 \theta(-0.5T_{basis} : dt : +0.5T_{basis}) &= \theta_{piek}
 \end{aligned}$$

Hierin is:

$$\frac{\partial h}{\partial t}_{flank,meer} = \frac{h_{piek} - h_{meerpeil}}{0.5(T_{basis} - T_{piek})} \quad (2.7)$$

In Figuur 2-3 is een voorbeeld van een geconstrueerde tijdreeks volgens reeksotype = 3 getoond. Te zien is dat de waterstand begint bij het niveau overeenkomstig het meerpeil (NAP +1.5 meter) en daarna een trapeziumvormig verloop volgt. Het verloop van de golfcondities is gelijk aan het verloop getoond bij de andere reeksotypen (1 en 2).



Figuur 2-3: Voorbeeld geconstrueerd tijdsverloop (reekstypen = 2),  $h_{piek} = 4.0$  [m+NAP],  $h_{meerpeil} = 1.5$  [m],  $H_{m0,piek} = 1.2$  [m],  $T_{m-1,0,piek} = 3.0$  [s].

We herhalen hier voor de volledigheid dat reekstype 3 alleen voor het IJsselmeer (RegioID = 7) gebruikt kan worden omdat in andere watersystemen het meerpeil op een andere wijze door Hydra-Ring wordt aangeleverd.

## 2.2 Grasbekleding Erosie Buitentalud (GEBU) – golfklap

Gras op het buitentalud wordt blootgesteld aan belasting ten gevolge van golfklappen en golfploop. In het Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium (BOI) kan een beoordeling worden uitgevoerd door allereerst de Hydraulische Belastingen te berekenen en deze vervolgens te gebruiken in de Basismodule Gras (RWS, 2017). Bij het koppelen van de mechanismen GEBU-klap, GEBU-oploop en GEKB is het van belang dat deze mechanismen voor vele invoercombinaties (automatisch) worden doorgerekend. Om deze reden wordt de beschrijving van het faalmechanisme gras uit Deltares (2015a) in de “plug-in” geïmplementeerd. Hieronder volgt een beschrijving van de gehanteerde implementatie, als ook de aanpassingen ten behoeve van de probabilistische berekening in Hydra-Ring.

### 2.2.1 Implementatie

In de “plug-in” is de faalmechanismebeschrijving voor gras in de golfklapzone overgenomen uit Deltares (2015a). De invoer voor het faalmechanisme bestaat uit:

- Gegeneerde tijdreeks zoals beschreven in 2.1 (waterstand  $h(t)$ ,  $H_{m0}(t)$  en  $\theta(t)$ )
- Dijknormaal ( $^{\circ}N$ )
- Niveau ondergrens grasbekleding ( $h_{trans}$ )
- Niveau bovengrens grasbekleding ( $h_{kruin}$ )
- Stapgrootte voor bepaling niveaus die beoordeeld moeten worden ( $\Delta z$ )
- Tijdstapgrootte voor bepaling moment van falen ( $\Delta t$ )
- Sterkte-eigenschappen: coëfficiënten a, b, c
- Zandfractie ( $F_{sand}$ )
- Gecombineerde laagdikte ( $D_{combined}$ )

Voor aanvang van de berekening wordt de golfhoogte gereduceerd om het effect van de hoek van golfval te verdisconteren middels:

$$H_{m0}(t) = \max\left(0.35; \cos\left(\frac{\beta_t}{180}\pi\right)^{0.67}\right) H_{m0,in}(t) \quad (2.8)$$

Hierin is:

$$\beta_t = \min\left(\left|\theta_{golf} - \theta_{dijk}\right|; \left|\theta_{golf} - \theta_{dijk} - 360\right|\right) \quad (2.9)$$

De berekening van het faalmechanisme start met het opstellen van een “grid/matrix” met de volgende assen:

- Horizontaal: tijd ( $t$ ), van  $-0.5T_{\text{basis}}$  tot  $+0.5T_{\text{basis}}$  met stappen van  $\Delta t$ ; in totaal  $N_t$  punten
- Verticaal: niveaus ( $z$ ), van  $h_{\text{trans}}$  tot  $h_{\text{crest}}$  met stappen van  $\Delta z$ ; in totaal ?

Vervolgens wordt per combinatie van niveau en tijd (dus alle punten in de matrix) de belasting  $t_{\text{load}}(t, z)$  en de twee sterkte waarden  $t_{\text{strength,top}}(t, z)$  en  $t_{\text{strength,sub}}(t, z)$  bepaald volgens:

$$\begin{aligned}
 z_{\text{impact}} &= z \geq h(t) - 0.5H_{m0}(t) \ \& \ z < h(t) \\
 t_{\text{load}} \left( \left[ H_{m0}(t) > c \ \& \ H_{m0}(t) < a + c \right], \left[ z_{\text{impact}} \right] \right) &= \Delta t \\
 t_{\text{load}} \left( \left[ H_{m0}(t) \leq c \right], \left[ z_{\text{impact}} \right] \right) &= 0 \\
 t_{\text{load}} \left( \left[ H_{m0}(t) \geq a + c \right], \left[ z_{\text{impact}} \right] \right) &= \Delta t
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

$$\begin{aligned}
 t_{\text{strength,top}} \left( \left[ H_{m0}(t) > c \ \& \ H_{m0}(t) < a + c \right], \left[ z_{\text{impact}} \right] \right) &= \frac{1}{b} \ln \left( \frac{H_{m0}(t) - c}{a} \right) \\
 t_{\text{strength,top}} \left( \left[ H_{m0}(t) \leq c \right], \left[ z_{\text{impact}} \right] \right) &= 1000 \\
 t_{\text{strength,top}} \left( \left[ H_{m0}(t) \geq a + c \right], \left[ z_{\text{impact}} \right] \right) &= 0.001
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

if  $a = 0 \mid D_{\text{combined}} < 0.2$

$$t_{\text{strength,sub}}(t, z) = 0.001$$

elseif  $D_{\text{combined}} \geq 0.5$

$$t_{\text{strength,sub}} \left( \left[ H_{m0}(t) \leq 0.5 \right], \left[ z_{\text{impact}} \right] \right) = 1000 \tag{2.12}$$

$$t_{\text{strength,sub}} \left( \left[ H_{m0}(t) > 0.5 \right], \left[ z_{\text{impact}} \right] \right) = \frac{\min(D_{\text{combined}}; 0.5) - 0.2}{c_d \tan \alpha^{1.5} H_{m0}(t)}$$

else

$$t_{\text{strength,sub}} \left( \left[ H_{m0}(t) > 0.5 \right], \left[ z_{\text{impact}} \right] \right) = \frac{\min(D_{\text{combined}}; 0.5) - 0.2}{c_d \tan \alpha^{1.5} H_{m0}(t)}$$

Waarin  $\tan(\alpha)$  een vaste waarde heeft van 1/3 (zie ook Deltares(2015a)) en  $c_d$  als volgt is gedefinieerd:

$$c_d = 1.1 + \max(0; 8 \cdot (F_{\text{sand}} - 0.7)) \tag{2.13}$$

Vervolgens kunnen per niveau en per tijdstap (de gehele matrix) de faalfracties  $F_{\text{top}}$ ,  $F_{\text{sub}}$ ,  $F_{\text{top,sub}}$  bepaald worden door:

$$F_{top}(t, z) = \frac{t_{load}(t, z)}{t_{strength,top}(t, z)}$$

$$F_{sub}(t, z) = \frac{t_{load}(t, z)}{t_{strength,sub}(t, z)} \quad (2.14)$$

$$F_{top,sub}(t, z) = \frac{t_{load}(t, z)}{t_{strength,top}(t, z) + t_{strength,sub}(t, z)}$$

Het bepalen van totale faalfractie ( $F_{cum}$ ) wordt geschied door per niveau de faalfracties te sommeren. Hierbij wordt tot  $t_{top}(z)$  (moment van falen van de toplaag,  $F_{cum,top}(t, z) = 1$ ) de som over  $F_{top,sub}$  genomen, daarna over  $F_{sub}$ :

$$F_{cum}(z) = \sum_{t=-0.5T_{basis}}^{t=t_{top}(z)} F_{top,sub}(t, z) + \sum_{t=t_{top}(z)}^{t=0.5T_{basis}} F_{sub}(t, z) \quad (2.15)$$

Het moment van falen van de toplaag wordt bepaald op basis van  $F_{cum,top}(t, z)$ , welke als volgt gedefinieerd is::

$$F_{cum,top}(t, z) = \sum_{t=-0.5T_{basis}}^{t=0.5T_{basis}} F_{top}(t, z) \quad (2.16)$$

De Factor of Safety (FoS) voor het mechanisme GEBU-klap ( $FoS_{GEBU-klap}$ ) wordt nu als volgt bepaald:

$$FoS_{GEBU-klap} = \frac{1}{\max(F_{cum}(z))} \quad (2.17)$$

### 2.2.2 Validatie

De in de “plug-in” geïmplementeerde mechanismedescriptie is gevalideerd door een vergelijking te maken met de resultaten van de Basismodule Gras. Hiervoor zijn de volgende variaties gehanteerd:

- Reekstype: 0, 1, 2, 3
- Open/gesloten graszode:
  - Open:  $a=0.8$ ,  $b=-0.070$ ,  $c=0.25$
  - Gesloten:  $a=1.0$ ,  $b=-0.035$ ,  $c=0.25$
- $F_{sand}$ : 0.5, 0.99<sup>1</sup> [-]
- $D_{combined}$ : 0.1, 0.6 meter
- $H_{m0,pijk}$ : 0., 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 meter

Voor alle validatie berekeningen zijn de volgende invoer variabelen vast gezet:

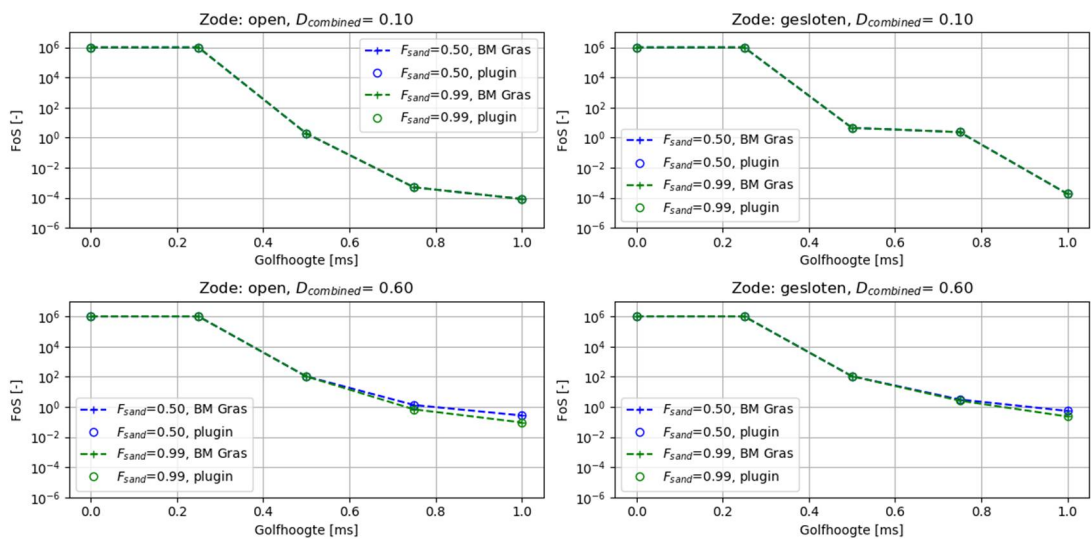
- $T_{basis} = 48$  uur
- $T_{pijk} = 2$  uur
- $A_{getij} = 1$  meter
- $h_{basis} = 0.5$  m+NAP

<sup>1</sup> Een waarde van  $F_{sand}$  van 0.99 [-] zal in de praktijk niet voorkomen, maar is hier gebruikt om in de validatie de uitersten op te zoeken.

- $h_{\text{piek}} = 2.0 \text{ m+NAP}$
- golfrichting ( $\theta$ ) =  $35^\circ\text{N}$
- $dt = 0.25 \text{ uur}$
- dijknormaal =  $35^\circ\text{N}$
- berm = niet aanwezig

Figuur 2-4 toont het resultaat van de validatie voor reekstype = 3. Te zien is dat de BasisModule Gras Buitentalud (BM Gras) en de “plug-in” identieke resultaten geven. Hierbij wordt opgemerkt dat er voor  $D_{\text{combined}} = 0.1$  geen verschil te zien is tussen verschillende waarden van  $F_{\text{sand}}$ . Dit is het gevolg van het feit dat bij een waarde van 0.1 voor  $D_{\text{combined}}$  de sterkte van de sub-laag niet wordt meegeteld (en dus heeft zandfractie in de laag geen effect op het resultaat). Resultaten voor andere reekstypen zijn opgenomen in Bijlage B.

Op basis van deze validatie wordt geconcludeerd dat de beschrijving van het faalmechanisme GEBU-klap op een juiste wijze is geïmplementeerd in de “plug-in”.

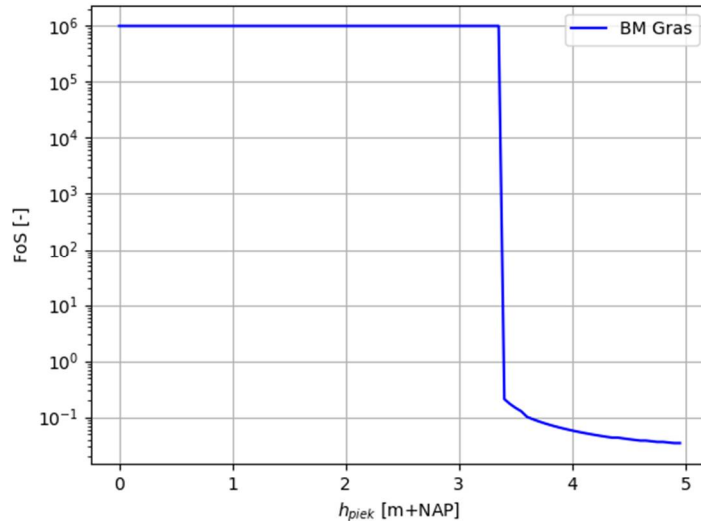


Figuur 2-4: Validatie implementatie GEBU-klap. Links: open zode, rechts gesloten zode. Boven:  $D_{\text{combined}} = 0.1$ , onder:  $D_{\text{combined}} = 0.6$ . Blauw:  $F_{\text{sand}} = 0.5$ , groen:  $F_{\text{sand}} = 0.9$ . ‘+’: resultaat BM Gras, ‘o’: resultaat “plug-in”.

### 2.2.3 Aanpassingen ten behoeve van probabilistische omgeving

Het toepassen van de in sectie 2.2.1 beschreven faalmechanisme in een probabilistische context leidde tot het inzicht dat het faalmechanisme een discontinuïteit bevatte, waardoor zeer dure rekentechnieken benodigd waren (leidend tot rekentijden in orde van uren). De discontinuïteit is het gevolg van het feit dat niveaus net boven de piekwaterstand geen belasting kennen, terwijl niveaus op of onder de piekwaterstand wel een belasting kennen. Dit leidt tot een discontinuïteit in FoS bij een piekwaterstand gelijk aan het beschouwde niveau zoals getoond in Figuur 2-5.





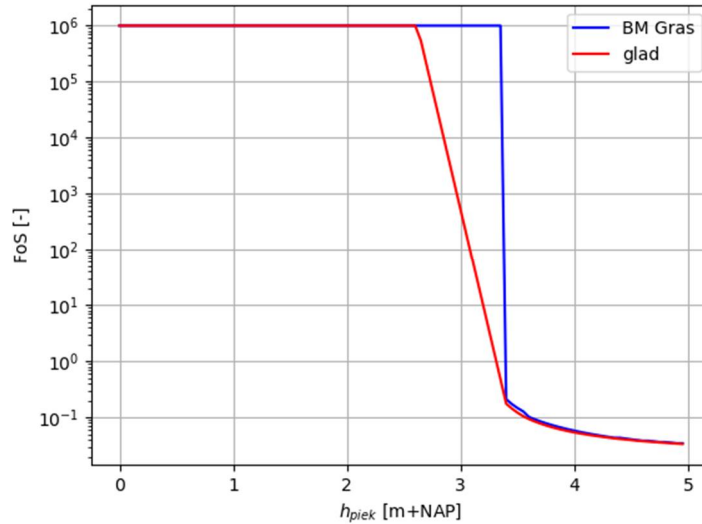
Figuur 2-5: Voorbeeld van discontinuïteit in faalmechanisme beschrijving GEBU-klap. FoS voor niveau NAP +3.4m.

Deze discontinuïteit is weggenomen door een gladde functie toe te voegen aan het mechanisme volgens:

$$\begin{aligned}
 t_{load} \left( \begin{array}{l} [H_{m0}(t) > c \ \& \ H_{m0}(t) < a + c], \\ [z > h(t)] \end{array} \right) &= \Delta t \exp \left( -\lambda_1 \frac{\max(z - h(t); 0)}{H_{m0}^{\lambda_2}} \right) \\
 t_{load} \left( \begin{array}{l} [H_{m0}(t) \leq c], \\ [z > h(t)] \end{array} \right) &= 0 \\
 t_{load} \left( \begin{array}{l} [H_{m0}(t) \geq a + c], \\ [z > h(t)] \end{array} \right) &= \Delta t \exp \left( -\lambda_1 \frac{\max(z - h(t); 0)}{H_{m0}^{\lambda_2}} \right)
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

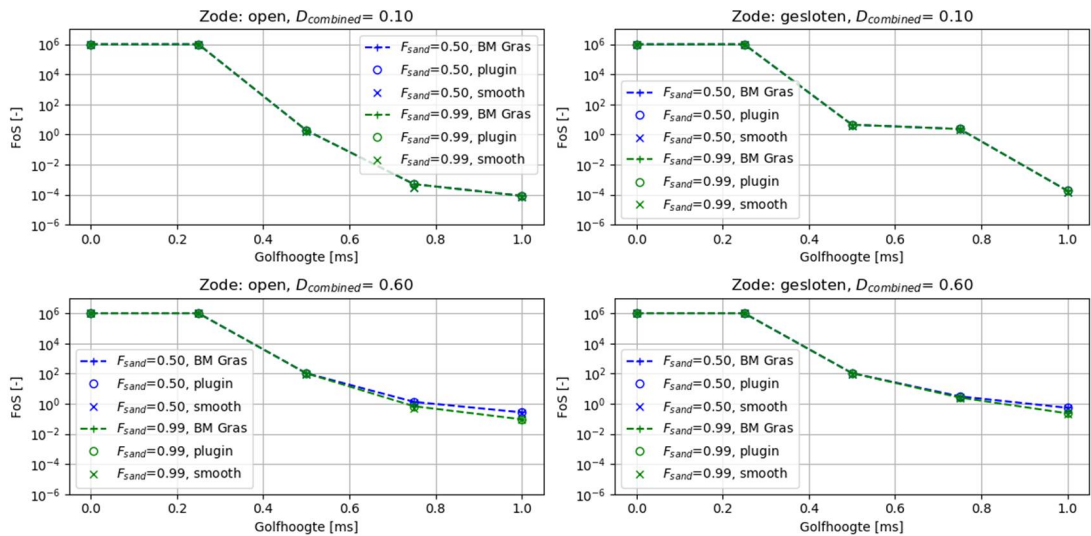
De waarden voor  $t_{strength,top}(t, z)$  en  $t_{strength,sub}(t, z)$  kunnen bepaald worden volgens vergelijking (2.11) en (2.12), waarbij  $z \geq h(t) - 0.5H_{m0}(t)$  &  $z < h(t)$  vervangen wordt door  $z > h(t)$ .

De toevoeging van de gladde (exponentiële functie) leidt ertoe dat ook niveaus boven de (piek)waterstand een bepaalde mate van belasting krijgen. Dit is ten opzichte van de faalmechanisme beschrijving een conservatieve benadering, afhankelijk van de gekozen waarden voor de coëfficiënten  $\lambda_1$  en  $\lambda_2$ . Proefondervindelijk is vastgesteld dat met  $\lambda_1 = 20$  en  $\lambda_2 = 0$  een voldoende gladde oplossing verkregen wordt zonder dat dit leidt tot een bijzonder veilige benadering. Figuur 2-6 toont een voorbeeld van het effect van de toevoeging van de gladde functie: falen (FoS = 1) treedt bij een orde 0.09 meter lagere waterstand op dan verwacht mag worden op basis van de discontinue beschrijving van het faalmechanisme.



Figuur 2-6: Voorbeeld van discontinuïteit in faalmechanisme beschrijving GEBU-klap. FoS voor niveau NAP +3.4m. Blauw: oorspronkelijke beschrijving, rood: met toevoeging van de gladde functie.

Voor de volledigheid is het effect van de toevoeging van de gladde functie ook in beeld gebracht voor reekstype 3. Figuur 2-7 toont dezelfde informatie als Figuur 2-4, uitgebreid met het resultaat na toevoeging van de gladde functie. Te zien is dat de FoS voor de beschouwde gevallen slechts beperkt wijzigt door de toevoeging van de gladde functie (de markers 'x' zijn nauwelijks te onderscheiden van de oorspronkelijke markers).



Figuur 2-7: Validatie implementatie GEBU-klap. Links: open zode, rechts gesloten zode. Boven:  $D_{combined}=0.1$ , onder:  $D_{combined}=0.6$ . Blauw:  $F_{sand}=0.5$ , groen:  $F_{sand}=0.9$ . '+-': resultaat BM Gras, 'o': resultaat "plug-in", 'x': resultaat met toevoeging gladde functie (smooth).

## 2.3 Grasbekleding Erosie Buitentalud (GEBU) – golfloop

Voor de implementatie van het mechanisme GEBU-oploop wordt in de basis gebruik gemaakt van de beschrijving van het faalmechanisme gras zoals beschreven in Deltares (2015b). Hieronder volgt een beschrijving van de gehanteerde implementatie, als ook de aanpassingen ten behoeve van de probabilistische berekening in Hydra-Ring.

### 2.3.1 Implementatie

In de “plug-in” is de faalmechanismedescriptie voor gras in de golfloopzone overgenomen uit Deltares (2015b). De invoer voor het faalmechanisme bestaat uit:

- Gegeneerde tijdreeks zoals beschreven in 2.1 (waterstand  $h(t)$ , golfhoogte  $H_{m0}(t)$ , golfperiode  $T_{m-1,0}(t)$  en golfrichting  $\theta(t)$ )
- Dijknormaal ( $^{\circ}N$ )
- Taludhelling ondertalud ( $\tan\alpha_{lower}$ ), boventalud ( $\tan\alpha_{upper}$ )
- Niveau onderzijde ondertalud ( $h_{toe}$ )
- Niveau overgang onder/boventalud is gelijk aan het niveau van de berm
- Niveau berm ( $h_{berm}$ ) en bermlengte ( $L_{berm}$ )
- Niveau ondergrens grasbekleding ( $h_{trans}$ )
- Niveau bovengrens grasbekleding ( $h_{kruin}$ )
- Ruwheidscoëfficiënt voor het talud ( $\gamma_{f,talud}$ )
- Zone met afwijkende ruwheidscoëfficiënt:
  - Ruwheidscoëfficiënt  $\gamma_{f,zone}$
  - Niveau onderzijde afwijkende ruwheidscoëfficiënt ( $\gamma_{zone,min}$ )
  - Niveau bovenzijde afwijkende ruwheidscoëfficiënt ( $\gamma_{zone,max}$ )
- Stapgrootte voor bepaling niveaus die beoordeeld moeten worden ( $\Delta z$ )
- Tijdstapgrootte voor bepaling moment van falen ( $\Delta t$ )
- Sterkte-eigenschappen:
  - Kritieke stroomsnelheid:  $U_c$
  - Invloedscoëfficiënten overgangen:  $\alpha_M(z)$ ,  $\alpha_S(z)$
  - Coëfficiënt  $c_u$
  - Kritieke cumulatieve overbelasting  $D_{crit}$

Als eerste wordt op basis van de tijdreeksen van waterstand  $h(t)$ , golfhoogte  $H_{m0}(t)$ , golfperiode  $T_{m-1,0}(t)$  en golfrichting  $\theta(t)$ , en de dikeigenschappen (dijk normaal, berm niveau en bermlengte), de 2% golfploophoogte ( $z_{2\%}$ ) per tijdstap bepaald. Hierbij wordt gebruik gemaakt van formules (5a) en (5b) uit TAW (2002):

$$z_{2\%} = \min \left( \begin{array}{l} 1.65\gamma_b\gamma_f\gamma_\beta \tan\alpha \left( \frac{gT_{m-1,0}^2}{2\pi H_{m0}} \right)^{0.5} H_{m0}; \\ \gamma_f\gamma_\beta \left( 4.0 - 1.5 \tan\alpha \left( \frac{2\pi H_{m0}}{gT_{m-1,0}^2} \right)^{0.25} \right) H_{m0} \end{array} \right) \quad (2.19)$$

De gemiddelde taludhelling ( $\tan\alpha$ ) wordt (in een iteratief proces) bepaald op basis van de formulering uit TAW (2002), waarbij rekening wordt gehouden met de gespecificeerde taludhellingen van onder- en boventalud (respectievelijk  $\tan\alpha_{lower}$  en  $\tan\alpha_{upper}$ ), de aanwezigheid van de berm en de golfploophoogte ( $z_{2\%}$ ).

De invloedscoëfficiënten  $\gamma_b$  en  $\gamma_f$  worden in een iteratief proces bepaald volgens TAW (2002) en formuleringen daarvoor worden hier niet herhaald. Opgemerkt wordt dat het als gevolg van het meenemen van de invloed coëfficiënten kan voorkomen dat de oploophoogte niet

toeneemt bij toenemende waterstand aan de teen van de dijk (of zelfs afneemt) als gevolg van de combinatie van  $\gamma_b$  en  $\gamma_f$ . Dit kan leiden tot irreguliere faalgebieden, leidend tot convergentieproblemen in de probabilistische berekening (vooral methode FORM heeft een last van). Geadviseerd wordt om (zeker als geldt:  $\gamma_{f,talud} \neq \gamma_{f,zone}$ ) de resultaten van de probabilistische som te controleren en waar nodig de gehanteerde rekentechniek aan te passen (bijvoorbeeld naar Directional Sampling).

De berekening van het faalmechanisme start met het opstellen van een “grid/matrix” met de volgende assen:

- Horizontaal: tijd (t), van  $-0.5T_{basis}$  tot  $+0.5T_{basis}$  met stappen van  $\Delta t$ : in totaal  $N_t$  punten
- Verticaal: niveaus (z), van  $h_{trans}$  tot  $h_{crest}$  met stappen van  $\Delta z$ : in totaal  $N_z$  punten

Vervolgens wordt per combinatie van niveau en tijd (dus alle punten in de matrix) de veiligheidsfactor (FoS) bepaald:

$$FoS(t, z) = \frac{D_{crit}}{D_{load}(t, z)} \quad (2.20)$$

Hierin wordt  $D_{load}(t, z)$  bepaald door voor  $N=10000$  golven/oploopgebeurtenissen de verwachtingswaarde van de belasting te bepalen en deze vervolgens te schalen met het aantal golven binnen de beschouwde tijdstap:

$$D_{load,N}(t, z) = \frac{\Delta t}{0.92T_{m-1,0}} \sum_{i=1}^N \left( \alpha_m(z) U_i(t, z)^2 - \alpha_s(z) U_c^2 \right) \quad (2.21)$$

De stroomsnelheid op niveau z per oploopgebeurtenis wordt als volgt bepaald:

$$U_i(t, z) = c_u \sqrt{g \cdot Ru_i(t)} \cdot \max \left( 0; \min \left( 1; \frac{Ru_i(t) - z}{0.25 \cdot Ru_i(t)} \right) \right) \quad (2.22)$$

De oploophoogte  $Ru_i$  per oploopgebeurtenis wordt als volgt bepaald:

$$Ru_i(t) = Ru_{2\%}(t) \left( \frac{\ln(P_i)}{\ln(0,02)} \right)^{0.5} \quad (2.23)$$

De kansverdeling van oploophoogtes wordt als volgt gediscrètiseerd;

$$P_i = 1.0 - \frac{i}{N+1} \quad (2.24)$$

Effectief wordt dus voor  $N_t$  maal  $N_z$  maal  $N=10000$  oploopgebeurtenissen de  $U_i$  bepaald en gesommeerd per tijdstap per niveau.

### 2.3.2 Validatie mechanisme GEBU

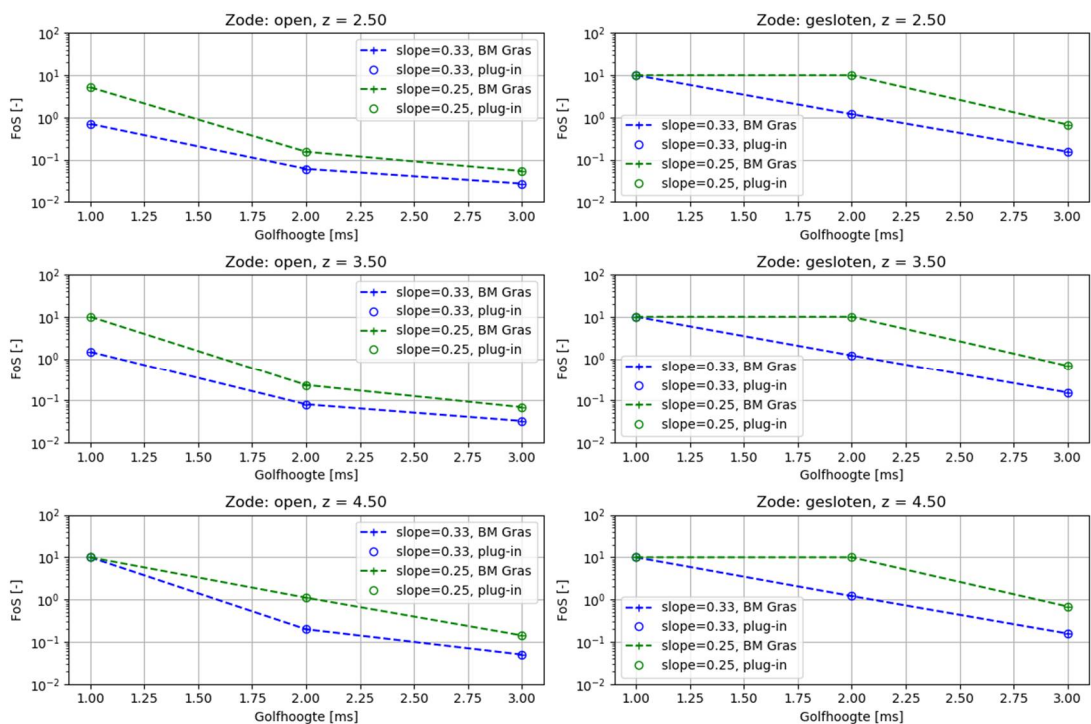
De in de “plug-in” geïmplementeerde mechanismebescrijving is gevalideerd door een vergelijking te maken met de resultaten van de BM Gras. Hiervoor zijn de volgende variaties gehanteerd:

- Reekstype: 0, 1, 2, 3
- Open/gesloten graszode:
  - Open:  $U_{crit}=4.3$  [m/s],  $D_{crit}=7000$  [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]
  - Gesloten:  $U_{crit}=6.6$  [m/s],  $D_{crit}=7000$  [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]
- Taludhelling ( $\tan(\alpha)$ ): 0.25, 0.33 [-]
- Niveaus (z): 2.5, 3.5, 4.5 [m+NAP]
- $H_{m0,peik}$ : 0., 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 meter

Voor alle validatie berekeningen zijn de volgende invoer variabelen vast gezet:

- $T_{basis}$  = 48 uur
- $T_{peik}$  = 2 uur
- $A_{getij}$  = 1 meter
- $h_{basis}$  = 0.5 m+NAP
- $h_{peik}$  = 2.0 m+NAP
- golfrichting ( $\theta$ ) = 35°N
- $dt$  = 0.25 uur
- dijknormaal = 35°N
- berm = niet aanwezig
- taludhelling ondertalud=taludhelling boventalud
- zone met afwijkende ruwheid = niet aanwezig

Figuur 2-8 toont het resultaat van de validatie voor reekstype = 3. Te zien is dat de BM Gras en de “plug-in” identieke resultaten geven. Resultaten voor andere reekstypen zijn opgenomen in Bijlage B. Op basis van deze validatie wordt geconcludeerd dat de beschrijving van het faalmechanisme GEBU-klap op een juiste wijze is geïmplementeerd in de “plug-in”.



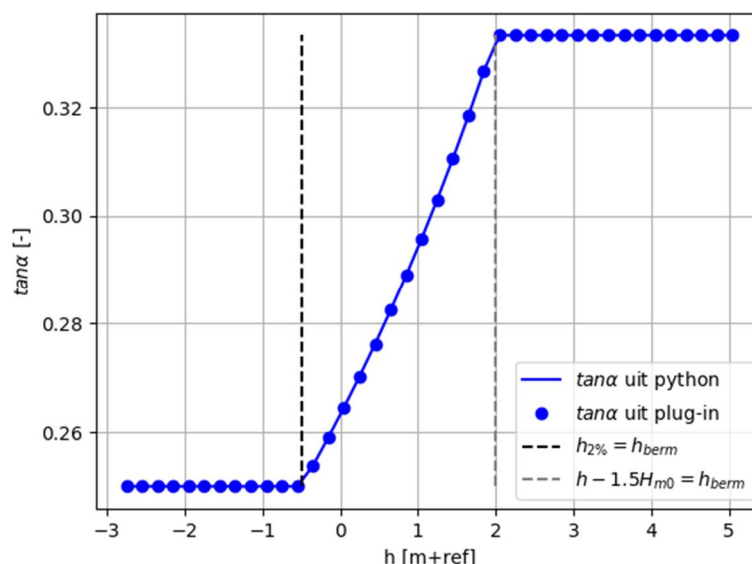
Figuur 2-8: Validatie implementatie GEBU-oploop. Links: open zode, rechts gesloten zode. Boven:  $z = 2.50$  [m+NAP], midden:  $z = 3.5$  pm+NAP], onder:  $z = 4.5$  [m+NAP]. Blauw:  $\tan\alpha = 0.33$  Groen:  $\tan\alpha = 0.25$ . '+': resultaat BM Gras, 'o': resultaat “plug-in”.

### 2.3.3 Validatie golfloopberekening ( $z_{2\%}$ ) met ongelijke hellingen onder- en boventalud

De in sectie 2.3.2 beschreven validatie gaat uit van een uniforme taludhelling. De plug-in biedt de mogelijkheid om ongelijke taludhellingen voor boven- en ondertalud te specificeren. Het hanteren van ongelijke taludhellingen beïnvloedt de gemiddelde taludhelling en daarmee de  $z_{2\%}$ . De bepaling van de gemiddelde taludhelling bij ongelijke onder- en taludhelling is middels een consistentiecheck uitgevoerd. In deze consistentie check is gerekend met:

- Taludhelling ondertalud ( $\tan\alpha_{lower}$ ) = 0.25 [-]
- Taludhelling boventalud ( $\tan\alpha_{upper}$ ) = 0.33 [-]
- Niveau berm ( $h_{berm}$ ) = +0.5 [m+ref]
- Golfhoogte ( $H_{m0}$ ) = 1.0 [m]
- Golfploophoogte  $z_{2\%}$  = 1.0 [m]

Vervolgens is de waterstand ( $h$ ) gevarieerd van -3.0 [m+ref] tot +5.0 [m+ref]. Het resulterende verloop van de gemiddelde taludhelling als functie van de waterstand wordt getoond in Figuur 2-9 (zowel het resultaat van een python implementatie als het resultaat uit de plug-in). De afbeelding laat zien dat de gemiddelde taludhelling start met een waarde van 0.25 [-] (gehele ophoophoogte ligt onder de berm) totdat  $h + z_{2\%}$  gelijk is aan het niveau van de berm (bij  $h = -0.5$  [m + ref]). Vanaf deze waterstand neemt de taludhelling langzaam toe (de ophoophoogte ligt steeds meer op het steilere boventalud), totdat geldt dat  $h - 1.5H_{m0} = h_{berm}$ . Vanaf dat moment ligt de gehele ophoophoogte op het boventalud en wordt een taludhelling van 0.33 [-] gevonden. Op basis van deze analyse wordt gesteld dat de bepaling van de gemiddelde taludhelling juist is geïmplementeerd.



Figuur 2-9: Verloop gemiddelde taludhelling als functie van waterstand. Blauw: berekende gemiddelde taludhelling (lijn uit python implementatie, bolletjes uit "plug-in"), zwarte "--": waterstand waarbij  $h + z_{2\%} = h_{berm}$ , grijze "--": waterstand waarbij  $h - 1.5H_{m0} = h_{berm}$ .

### 2.3.4 Validatie golfloopberekening ( $z_{2\%}$ ) met zone afwijkende ruwheidscoëfficiënt

De in sectie 2.3.2 beschreven validatie is uitgevoerd met  $\gamma_{f,talud} = \gamma_{f,zone}$ . De plug-in biedt ook de mogelijkheid om een zone met afwijkende ruwheid te specificeren. Het hanteren van een zone met afwijkende ruwheid beïnvloedt de gemiddelde ruwheidscoëfficiënt en daarmee de  $z_{2\%}$ . De bepaling van de gemiddelde ruwheidscoëfficiënt is middels een consistentiecheck uitgevoerd.

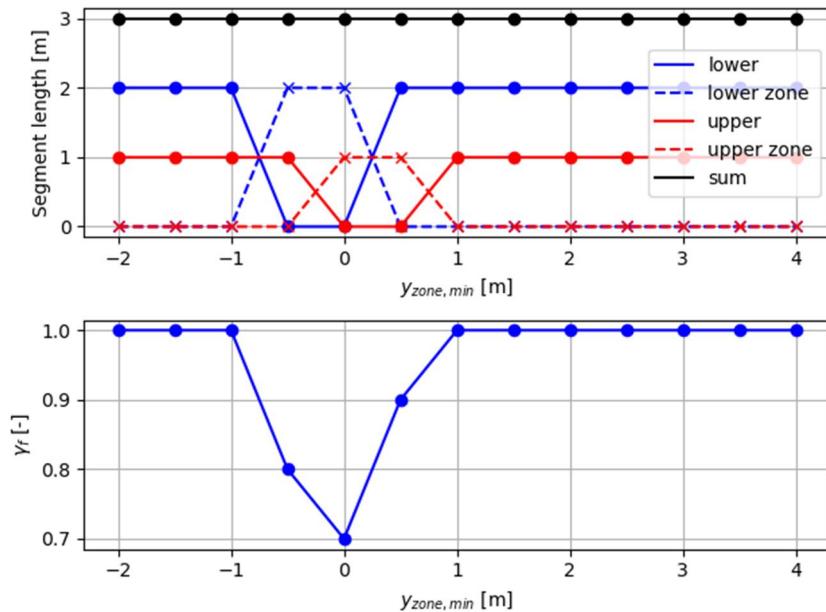
In deze consistentiecheck is gerekend met:

- Taludhelling ondertalud ( $\tan\alpha_{lower}$ ) = 0.25 [-]
- Taludhelling boventalud ( $\tan\alpha_{upper}$ ) = 0.25 [-]
- Niveau berm ( $h_{berm}$ ) = +0.5 [m+ref]
- Waterstand ( $h$ ) = +0.25 [m+ref]
- Golfploophoogte  $z_{2\%}$  = 1.0 [m]
- Niveau bovenzijde afwijkende ruwheidscoëfficiënt ( $y_{zone,max}$ ) =  $y_{zone,min} + 1.0$  meter
- Ruwheidscoëfficiënt voor het talud ( $\gamma_{f,talud}$ ) = 1.0 [-]
- Ruwheidscoëfficiënt  $\gamma_{f,zone}$  = 0.7 [-]

Voor verschillende niveaus (van -2.0 [m+ref] tot +4.0 [m+ref]) van de onderzijde van de zone met afwijkende ruwheidscoëfficiënt ( $y_{zone,min}$ ) is vervolgens de gemiddelde ruwheidscoëfficiënt  $\gamma_f$  bepaald volgens TAW (2002). In deze consistentiecheck zijn ook de lengtes van de segmenten binnen het invloedsgebied van de ruwheid geanalyseerd, omdat deze effectief de weegfactoren zijn waarmee de gemiddelde ruwheidscoëfficiënt wordt bepaald.

Voor de consistentiecheck is het van belang te weten dat het invloedsgebied van de ruwheid van  $h - 0.25z_{2\%}$  tot  $h + 0.5z_{2\%}$  loopt. In dit voorbeeld betekent dat het invloedsgebied loopt van 0.0 [m+ref] tot 0.75 [m+ref]. Gegeven de gehanteerde waarde voor  $h_{berm}$  van +0.5 [m+ref] geldt dat 2/3 van het invloedsgebied (2 meter horizontaal) op het ondertalud ligt en 1/3 van het invloedsgebied (1 meter horizontaal) op het boventalud ligt. Als de zone met aangepaste ruwheid hier buiten valt, dan wordt de gemiddelde ruwheidscoëfficiënt  $\gamma_f$  volledig bepaald door de ruwheidscoëfficiënt  $\gamma_{f,talud}$ . Als sprake is van een overlap tussen invloedsgebied en zone, dan wordt de gemiddelde ruwheidscoëfficiënt  $\gamma_f$  bepaald door een weging van de horizontale lengte van de verschillende segmenten. Er zijn vier segmenten gedefinieerd, uitsplitsing naar onder- of boventalud en uitsplitsing naar wel/geen overlap met de zone met afwijkende ruwheid.

Figuur 2-10 toont de het resultaat van de consistentiecheck. Te zien is dat bij een lage ligging van de zone er geen sprake is van overlap (de lengte van de segmenten met overlap, gelabeld "zone" is nul en  $\gamma_f = \gamma_{f,talud}$ ). Naarmate de zone hoger ligt is er sprake van meer overlap (vanaf  $y_{zone,min} = -1.0$  [m+ref]), totdat de zone in zijn geheel boven het invloedsgebied ligt ( $y_{zone,min} = 1.0$  [m+ref]). Uit de afbeelding is ook af te leiden dat bij  $y_{zone,min} = 0.0$  [m+ref] is de zone in exact overlapt met het invloedsgebied, waardoor  $\gamma_f = \gamma_{f,zone}$ .



Figuur 2-10: Validatie berekening gemiddelde ruwheidscoëfficiënt  $\gamma_f$ . Lijn ('-' en '--'): resultaat van losse python implementatie, markers ('o' en 'x'): resultaat van de "plug-in". Boven: segment lengtes gebruikt in de weging van ruwheidscoëfficiënten, zwart: totale horizontale lengte van het invloedsgebied van de ruwheid, blauw: lengtes van segmenten gelegen onder het niveau  $h_{berm}$  ('-': buiten zone met afwijkende ruwheid, '--': binnen zone met afwijkende ruwheid), rood: lengtes van segmenten gelegen boven het niveau  $h_{berm}$ . Onder: gemiddelde ruwheidscoëfficiënt.

### 2.3.5 Aanpassingen ten behoeve van probabilistische omgeving

Het toepassen van de in sectie 2.3.1 beschreven faalmechanismebeschrijving in de probabilistische context leidde tot extreem hoge rekentijden. Daarnaast is de beschrijving in 2.3.1 niet helemaal zuiver in een probabilistische context omdat:

1. de discretisatie van de kansverdeling van oploophoogtes (vergelijking (2.24)) de bijdrage van de hoge oploophoogtes onderschat. Vanwege de beschrijving van de oploopsnelheid en de kwadratische bijdrage van de oploopsnelheid aan de cumulatieve belasting wegen juist de hoge oploophoogtes relatief zwaar mee;
2. de gehanteerde aanpak voor de bepaling van  $z_{2\%}$  gaat uit van de verwachtingswaarde van de oloploop, terwijl deze in een probabilistische context onzeker is: de in de TAW (2002) genoemde variatie dient in rekening te worden gebracht;
3. de huidige aanpak ook met een juiste discretisatie van de kansverdeling van golfoploophoogtes geen rekening houdt met de natuurlijke variabiliteit van de oploophoogtes als gevolg van een beperkt aantal golven (zoals het geval bij het doorrekenen van tijdafhankelijke situaties).

Met inachtneming van het bovenstaande is besloten om het mechanisme GEBU-oploop op een andere wijze te implementeren. Uitgangspunt hierbij is nog steeds de cumulatieve overbelasting zoals beschreven in Deltares (2015b), maar een andere rekenkundige aanpak voor de bepaling van de cumulatieve belasting:

$$FoS = \frac{D_{crit}}{D_{load,N}} = \frac{D_{crit}}{(1 + v_f c_{v,N}) E(D_{load,N})} \quad (2.25)$$



Hierin is  $v_f$  een standaardnormaal verdeelde stochast en  $c_{v,N}$  een constante (de variatiecoëfficiënt van  $D_{load,N}$ ) welke het stochastisch karakter van  $D_{load,N}$  als gevolg van een beperkt aantal golven beschrijven. In de huidige implementatie wordt voor ieder tijdsinterval binnen dezelfde sterkteberekening dezelfde waarde voor  $v_f$  gehanteerd. Dit is een conservatieve aanname omdat hiermee geïmpliceerd wordt dat de onzekerheid als gevolg van het beperkt aantal golven binnen een storm dan volledig gecorreleerd is in de tijd.

$D_{load,N}$  is als volgt gedefinieerd:

$$c_{v,N} = \frac{\sqrt{\text{var}(D_{load,N})}}{E(D_{load,N})} \quad (2.26)$$

De verwachtingswaarde van de belasting  $E(D_{load,N})$  volgt uit de continue variant van vergelijking (2.21):

$$E(D_{load,N}) = N \int_{U_i=U_{crit}}^{\infty} f_{Ru_i}(Ru_i) (\alpha_m U_i^2 - \alpha_s U c^2) dU_i \quad (2.27)$$

Hierin is  $f(Ru_i)$  de kansdichtheidsfunctie van de golfploophoogtes, welke een Rayleigh verdeling volgt:

$$f_{Ru_i}(Ru_i) = \frac{Ru_i}{\sigma^2} e^{-Ru_i^2/(2\sigma^2)} \quad (2.28)$$

De individuele stroomsnelheden op niveau  $z$  als gevolg van de golfploophoogte is (overeenkomstig vergelijking (2.22)) als volgt gedefinieerd:

$$U_i = c_u \sqrt{g \cdot Ru_i(t)} \cdot \max \left( 0; \min \left( 1; \frac{Ru_i(t) - z}{0.25 \cdot Ru_i(t)} \right) \right) \quad (2.29)$$

De vergelijkingen (2.27) tot en met (2.29) leiden tot de onderstaande integraal welke de verwachtingswaarde van  $D_{load,N}$  beschrijft. Deze integraal is analytisch opgelost en geïmplementeerd in de "plug-in".

$$E(D_{load,N}) = N \left( \int_{\frac{\sqrt{2}Ru_{minhigh}}{2\sigma}}^{\infty} 2x \left( -U_c^2 \alpha_s + \sqrt{2} \alpha_m c u^2 g \sigma x \right) e^{-x^2} dx + \int_{\frac{\sqrt{2}Ru_{minlow}}{2\sigma}}^{\frac{2\sqrt{2}z}{3\sigma}} 2x \left( -U_c^2 \alpha_s + \frac{8.0 \sqrt{2} \alpha_m c u^2 g (\sqrt{2} \sigma x - z)^2}{\sigma x} \right) e^{-x^2} dx \right) \quad (2.30)$$

Hierin is:

$$Ru_{\min,low} = \max \left( z, \min \left( \frac{4z}{3}, \frac{0.03125 \left( U_c^2 \alpha_s + U_c \sqrt{\alpha_s} \sqrt{U_c^2 \alpha_s + 64.0 \alpha_m c u^2 g z} + 32.0 \alpha_m c u^2 g \right)}{\alpha_m c u^2 g} \right) \right) \quad (2.31)$$

$$Ru_{\min,high} = \max \left( \frac{4z}{3}, \frac{U_c^2 \alpha_s}{\alpha_m c u^2 g} \right) \quad (2.32)$$

$$x = \frac{\sqrt{2} Ru_i}{2\sigma} \quad (2.33)$$

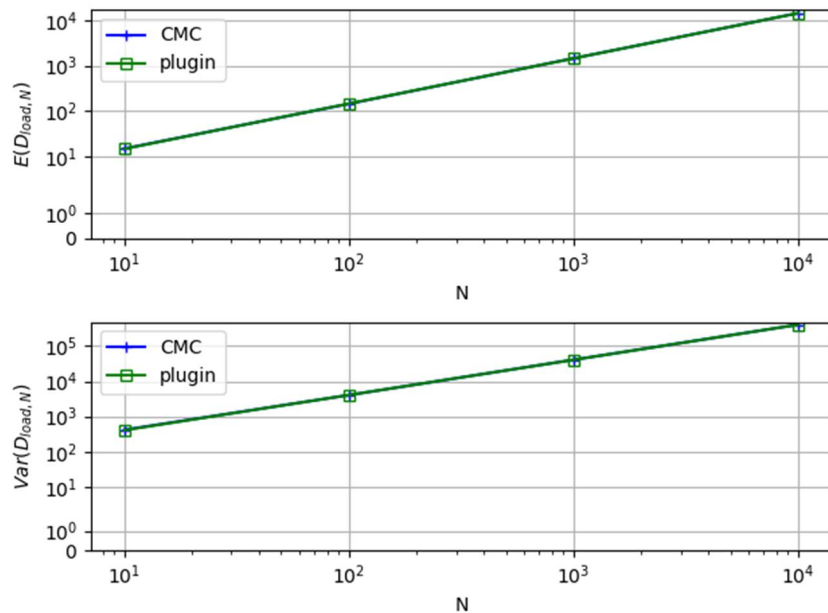
$$\sigma = \left( \frac{-z_{2\%}^2}{2 \ln(0.02)} \right)^{0.5} \quad (2.34)$$

De 2% overschreden golfploophoogte wordt bepaald op basis van vergelijkingen (5a) en (5b) uit TAW (2002) en wordt getoond in vergelijking (2.19), rekening houdend een de variatiecoëfficiënt van 0.07.

De variantie van  $D_{load,N}$  kan op vergelijkbare wijze worden bepaald en leidt tot de onderstaande integraal, welke eveneens analytisch is opgelost en opgenomen is in de "plug-in".

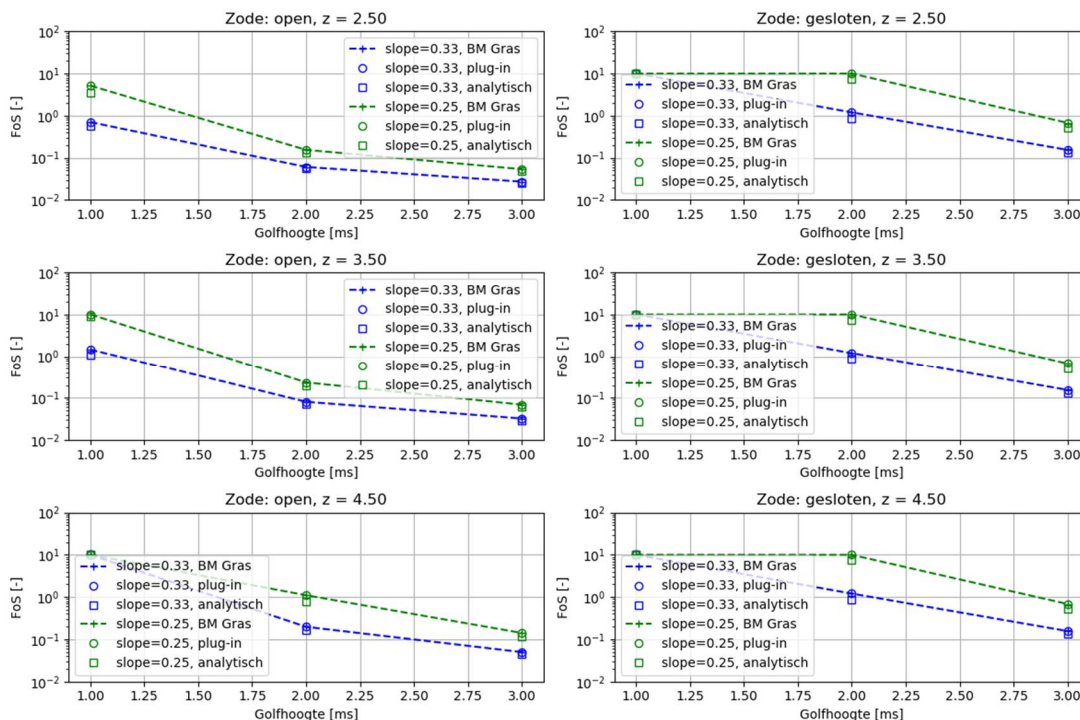
$$Var(D_{load,N}) = N \left( \int_{Ru_{minlow}}^{\frac{4z}{3}} \frac{Ru_i e^{-\frac{Ru_i^2}{2\sigma^2}}}{\sigma^2} \left( -U_c^2 \alpha_s + \frac{16.0 \alpha_m c u^2 g (Ru_i - z)^2}{Ru_i} \right)^2 dRu_i + \int_{Ru_{minhigh}}^{\infty} \frac{Ru_i e^{-\frac{Ru_i^2}{2\sigma^2}}}{\sigma^2} (Ru_i \alpha_m c u^2 g - U_c^2 \alpha_s)^2 dRu_i - \left( \frac{E(D_{load,N})}{N} \right)^2 \right) \quad (2.35)$$

De afleiding en implementatie van vergelijkingen (2.30) en (2.35) is geverifieerd door een vergelijking te maken met een Crude Monte Carlo (CMC) aanpak (met  $N$  random trekkingen voor de individuele golfoploophoogte uit de Rayleigh kansverdeling). Figuur 2-11 toont het resultaat van deze vergelijking ( $z_{2\%}=4.0$  meter) als functie van het aantal golven. Te zien is dat het antwoord van de analytische oplossing en de CMC aanpak convergeren met het aantal golven ( $N \rightarrow \infty$ ). Voor kleinere waarden van  $N$  wijken de resultaten af omdat hier de variabiliteit in de CMC een rol speelt. Geconcludeerd wordt dat de implementatie van vergelijkingen (2.30) en (2.35) correct is uitgevoerd.



Figuur 2-11: Vergelijking Crude Monte Carlo aanpak met “plug-in”/analytische oplossing (vergelijkingen (2.30) en (2.35)). Boven: vergelijking  $E(D_{load,N})$ , onder:  $var(D_{load,N})$ . Blauw: Crude Monte Carlo (CMC), groen: “plug-in”/analytische oplossing.

Voor de volledigheid is het resultaat van de analytische aanpak ook vergeleken met het resultaat van de BM Gras. Het gaat hierbij om de vergelijking van de verwachtingswaarde van  $D_{load,N}$  omdat de BM Gras geen rekening houdt met de variatie als gevolg van een beperkt aantal golven. Figuur 2-12 toont het resultaat van de BM Gras, de “plug-in versie van de BM Gras” en de analytische oplossing voor reekstype = 3. Te zien is dat, conform verwachting, de analytische oplossing tot iets lagere waarde van de FoS leidt omdat ook de extreme oploophoogtes meegewogen worden in de verwachtingswaarde. Voor de volledig probabilistische benadering wordt dan ook de aangepaste (analytische) benadering gebruikt (vanaf dit moment gelabeld als “plug-in”).



Figuur 2-12: Validatie implementatie GEBU-oploop inclusief analytische oplossing (reekstype = 3). Links: open zode, rechts gesloten zode. Boven:  $z = 2.50$  [m+NAP], midden:  $z = 3.5$  [m+NAP], onder:  $z = 4.5$  [m+NAP]. Blauw:  $\tan\alpha = 0.33$ , groen:  $\tan\alpha = 0.25$ . '+': resultaat BM Gras, 'o': resultaat "plug-in", '□' resultaat analytische oplossing.

## 2.4 Grasbekleding Erosie Krui en Binnentalud (GEKB)

Voor het mechanisme Gras Erosie Krui en Binnentalud (GEKB) wordt gebruik gemaakt van de zuivere cumulatieve overbelastingbenadering, zoals ook beschreven in Deltares (2020). Deze beschrijving van het mechanisme GEKB voorkomt het introduceren van aannames zoals nu is opgenomen in het BOI, waaronder gebruik van golfhoogte klassen en vaste golfsteilheid. Hieronder volgt een beschrijving van de gehanteerde implementatie, als ook de aanpassingen ten behoeve van de probabilistische berekening.

### 2.4.1 Implementatie

De invoer voor het faalmechanisme GEKB bestaat uit:

- Gegeneerde tijdreeks zoals beschreven in 2.1 (waterstand  $h(t)$ , golfhoogte  $H_{m0}(t)$ , golfperiode  $T_{m-1,0}(t)$  en golfrichting  $\theta(t)$ )
- Dijknormaal ( $^{\circ}N$ )
- Taludhelling ondertalud ( $\tan\alpha_{lower}$ ), boventalud ( $\tan\alpha_{upper}$ )
- Niveau onderzijde ondertalud ( $h_{toe}$ )
- Niveau overgang onder/boventalud is gelijk aan het niveau van de berm
- Niveau berm ( $h_{berm}$ ) en bermlengte ( $L_{berm}$ )
- Kruihoogte ( $h_{krui}$ )
- Ruwheidscoëfficiënt voor het talud ( $\gamma_{f,talud}$ )
- Zone met afwijkende ruwheidscoëfficiënt:
  - Ruwheidscoëfficiënt  $\gamma_{f,zone}$
  - Niveau onderzijde afwijkende ruwheidscoëfficiënt ( $\gamma_{zone,min}$ )
  - Niveau bovenzijde afwijkende ruwheidscoëfficiënt ( $\gamma_{zone,max}$ )
- Tijdstapgrootte voor bepaling moment van falen ( $\Delta t$ )

- Sterkte-eigenschappen:
  - Kritieke stroomsnelheid:  $U_c$
  - Invloedscoëfficiënten overgangen:  $\alpha_M, \alpha_S$
  - Invloedscoëfficiënt voor versnelling op het binnentalud:  $\alpha_a$
  - Coëfficiënt  $c_u$
  - Kritieke cumulatieve overbelasting  $D_{crit}$

De Factor of Safety (FoS) voor het mechanisme GEKB is op eenzelfde wijze gedefinieerd als voor het mechanisme GEBU-oploop, omdat de aanpak van cumulatieve overbelasting vergelijkbaar is:

$$FoS = \frac{D_{crit}}{D_{load,N}} = \frac{D_{crit}}{(1 + v_f c_{v,N}) E(D_{load,N})} \quad (2.36)$$

Hierin is  $v_f$  een standaardnormaal verdeelde stochast en  $c_{v,N}$  een constante (de variatiecoëfficiënt van  $D_{load,N}$ ) welke het stochastisch karakter van  $D_{load,N}$  als gevolg van een beperkt aantal golven beschrijven. In de huidige implementatie wordt voor ieder tijdsinterval binnen dezelfde sterkteberekening dezelfde waarde voor  $v_f$  gehanteerd. Dit is een conservatieve aanname omdat hiermee geïmpliceerd wordt dat hiermee de onzekerheid als gevolg van het beperkt aantal golven binnen een storm dan volledig gecorreleerd is in de tijd.

$D_{load,N}$  is als volgt gedefinieerd:

$$c_{v,N} = \frac{\sqrt{\text{var}(D_{load,N})}}{E(D_{load,N})} \quad (2.37)$$

De verwachtingswaarde van de belasting  $E(D_{load,N})$  volgt uit de continue variant van vergelijking (2.21):

$$E(D_{load,N}) = N \int_{U_i=U_{crit}}^{\infty} f_{Ru_i}(Ru_i) (\alpha_m \alpha_a^2 U_i^2 - \alpha_s U c^2) dU_i \quad (2.38)$$

Hierin is  $f(Ru_i)$  de kansdichtheidsfunctie van de golfploophoogtes, welke een Rayleigh verdeling volgt:

$$f_{Ru_i}(Ru_i) = \frac{Ru_i}{\sigma^2} e^{-Ru_i^2/(2\sigma^2)} \quad (2.39)$$

De stroomsnelheden op de kruin behorende bij individuele oploopgebeurtenissen zijn als volgt gedefinieerd (met  $R_c$  gedefinieerd als het aanwezige vrijboord:  $h_{kruin} - h(t)$ ):

$$U_i = c_u \cdot (g \cdot (Ru_i - R_c))^{0.5} \quad (2.40)$$

De vergelijkingen (2.38) tot en met (2.40) leiden tot de onderstaande integraal welke de verwachtingswaarde van  $D_{load,N}$  beschrijft. Deze integraal is analytisch opgelost en geïmplementeerd in de "plug-in":

$$E(D_{load,N}) = N \left( \frac{-R_c \alpha_m \alpha_a^2 c u^2 g + R u_{min} \alpha_m \alpha_a^2 c u^2 g - U_c^2 \alpha_s - \sqrt{2} \sqrt{\pi} \alpha_m \alpha_a^2 c u^2 g \sigma e^{\frac{R u_{min}^2}{2\sigma^2}} \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2} R u_{min}}{2\sigma}\right)}{2} + e^{-\frac{R u_{min}^2}{2\sigma^2}} \right) \quad (2.41)$$

Hierin is:

$$\sigma = \left( \frac{-z_{2\%}^2}{2 \ln(0.02)} \right)^{0.5} \quad (2.42)$$

De 2% overschreden golfploophoogte wordt bepaald op basis van vergelijkingen (5a) en (5b) uit TAW (2002) en getoond in vergelijking (2.19), rekening houdend een de variatiecoëfficiënt van 0.07.

De variantie van  $D_{load,N}$  kan als volgt worden beschreven:

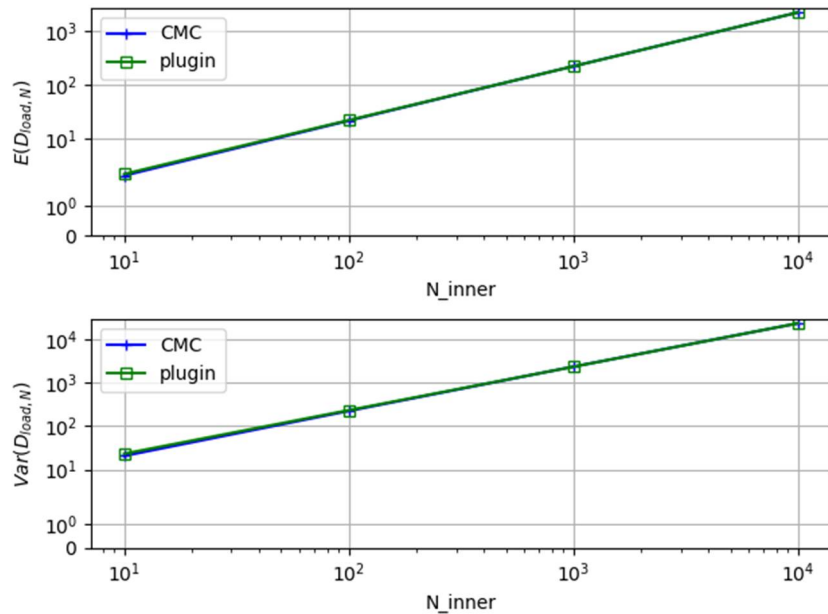
$$\operatorname{var}(D_{load,N}) = N \left( \int_{R u_{min}}^{\infty} \frac{R u_i e^{-\frac{R u_i^2}{2\sigma^2}}}{\sigma^2} \left( -U_c^2 \alpha_s + \alpha_m \alpha_a^2 c u^2 g (-R_c + R u_i) \right)^2 dR u_i - \left( \frac{E(D_{load,N})}{N} \right)^2 \right) \quad (2.43)$$

Deze uitdrukking voor  $\operatorname{var}(D_{load,N})$  is analytisch opgelost en geïmplementeerd in de "plug-in".

## 2.4.2 Validatie

Vanwege het feit dat er voor het mechanisme GEKB gebruik wordt van een nog niet in BOI geïmplementeerde beschrijving is een vergelijking met bestaande BOI-instrumenten niet zinnig. Dat betekent echter niet dat er helemaal geen validatie kan plaatsvinden. Om te beginnen is het mogelijk om de afleiding en implementatie van vergelijkingen (2.41) en (2.43) te verifiëren door deze te vergelijken met een Crude Monte Carlo (CMC) aanpak.

Figuur 2-13 toont de resultaten van een vergelijking tussen de implementatie en een Crude Monte Carlo aanpak voor een geval met  $z_{2\%}=4.0$  meter (als voorbeeld), met N random trekkingen voor de individuele golfploophoogte uit de Rayleigh kansverdeling. Te zien is dat de beide aanpakken convergeren met de toename van het aantal golven ( $N_{inner}$ ). Het verschil bij de lage waarde van  $N_{inner}$  is het gevolg van de variabiliteit van  $D_{load,N}$  bij een beperkt aantal golven: hierdoor is de waarde van  $D_{load,N}$  afhankelijk van de trekkingen in de Crude Monte Carlo analyse.

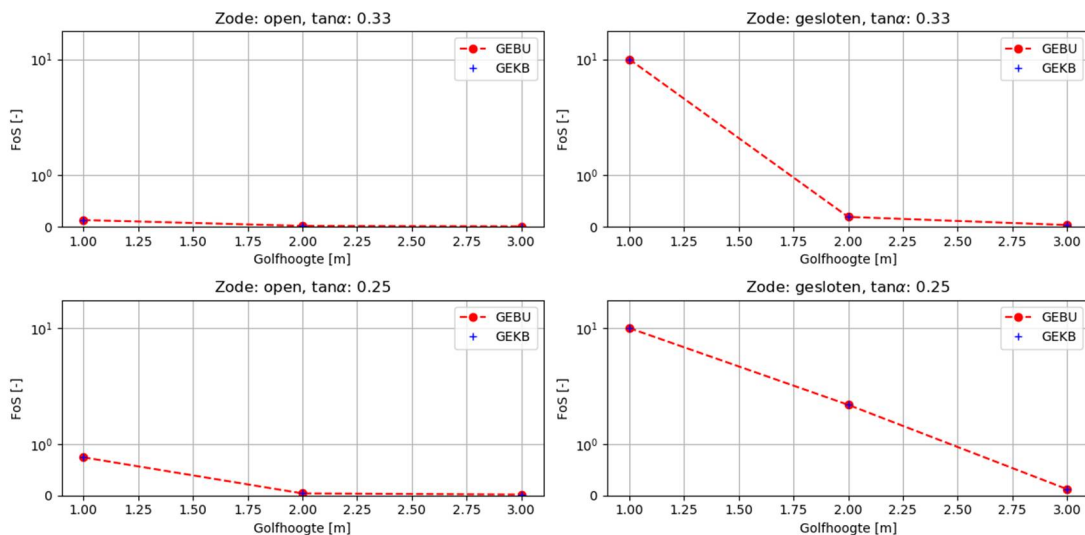


Figuur 2-13: Vergelijking Crude Monte Carlo aanpak GEKB met “plug-in”/analytische oplossing. Boven: vergelijking  $E(D_{load,N})$ , onder:  $var(D_{load,N})$ . Blauw: Crude Monte Carlo (CMC), groen: “plug-in”/analytische oplossing (vergelijking (2.41) en (2.43)). Case:  $z_{2\%} = 4$  meter.

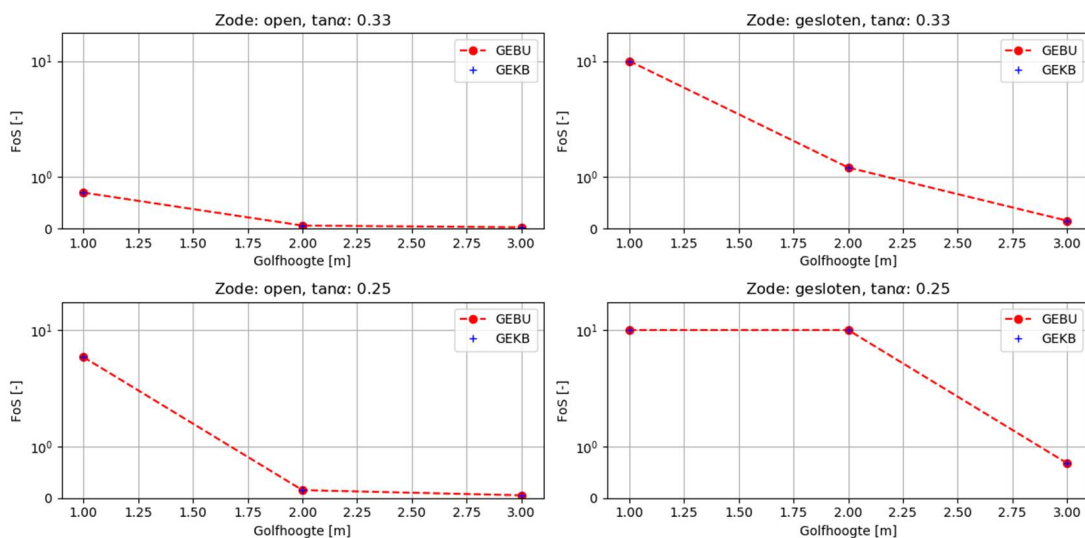
Een tweede vergelijking die gemaakt kan worden is de vergelijking met de resultaten van GEBU-oploop. Immers, de beschrijving van het mechanisme is in generieke zin hetzelfde, enkel de “coëfficiënten” verschillen. De beide mechanismen zouden hetzelfde resultaat moeten geven als:

- de waterstand in beide analyses constant is (dus reekstypen 0 en 1)
- in GEBU-oploop een niveau gelijk aan de waterstand wordt beschouwd
- in GEKB een vrijboord van 0 meter wordt beschouwd
- de waarde voor  $c_u$  gelijk wordt gekozen (normaliter is deze ongelijk)
- de waarden voor  $U_c$  en  $D_{crit}$  gelijk worden gekozen

In Figuur 2-14 en Figuur 2-15 is voor respectievelijk reekstype 0 en 1 vergeleken of de implementaties van GEBU-oploop en GEKB hetzelfde resultaat geven indien aan bovenstaande eisen wordt voldaan. Te zien is dat dit het geval is. Dit geeft een aanvullende onderbouwing dat de implementatie van GEKB in de “plug-in” correct is.



Figuur 2-14: Validatie implementatie GEKB op basis van GEBU-oploop (reekstypen = 0). Links: open zode, rechts gesloten zode. Boven:  $\tan\alpha = 0.33$  [-], onder:  $\tan\alpha = 0.25$  [-]. Blauw: FoS volgens GEKB, rood: FoS volgens GEBU.



Figuur 2-15: Validatie implementatie GEKB op basis van GEBU-oploop (reekstypen = 1). Links: open zode, rechts gesloten zode. Boven:  $\tan\alpha = 0.33$  [-], onder:  $\tan\alpha = 0.25$  [-]. Blauw: FoS volgens GEKB, rood: FoS volgens GEBU.



## 3 Probabilistisch model

### 3.1 Grasbekleding Erosie Buitentalud (GEBU) – golfklap

Het in sectie 2.2 beschreven mechanisme aangesloten op het probabilistische model Hydra-Ring. Het probabilistische model vraagt niet om een FoS gegeven een combinatie van stochasten, maar om een Z-waarde (= Sterkte-Belasting). De FoS kan worden vertaald naar een Z-waarde door  $Z = FoS - 1$  of  $Z = \log_{10}(FoS)$ . In beide gevallen geldt dat falen ( $FoS=1$ ) optreedt bij  $Z=0$ . Vanwege de grootte van de FoS in geval van niet falen is gekozen voor de optie  $Z = \log_{10}(FoS)$ , zodat andere correcties eenvoudiger worden. Naast deze vertaling zijn er nog twee aanvullende correcties toegevoegd, leidend tot het volgende functievoorschrift:

$$Z_{GEBU-klap} = \min \left\{ \log_{10}(FoS_{GEBU-klap}) + \max(0; h_{trans} - h_{piek}); h_{kruin} - h_{piek} \right\} \quad (3.1)$$

Een eerste correctie is toegevoegd omdat de Z-functie constant is als de piekwaterstand (ver) onder de ondergrens van de grasbekleding ( $h_{trans}$ ) ligt. Om een monotoon dalende functie (bij toenemende belasting) te krijgen wordt gecorrigeerd met het verschil tussen  $h_{trans}$  en  $h_{piek}$ , maar alleen indien de piekwaterstand lager is dan de ondergrens van de grasbekleding (er dus geen falen kan optreden). Tot slot wordt het minimum genomen met het verschil tussen kruinhoogte ( $h_{kruin}$ ) en piekwaterstand ( $h_{piek}$ ) zodat er bij overloop falen optreedt.

De Z-functie en de resultaten van de probabilistische analyse zijn vervolgens geanalyseerd voor de 3 locaties beschreven in Bijlage A (en 12 windrichtingen per locatie) door een probabilistische som uit te voeren met de GEBU-klap implementatie in de ontwikkelde “plug-in”. De som is uitgevoerd zonder statistische en modelonzekerheden, zodat er twee basisstochasten (meerpeil en windsnelheid) per locatie/windrichting resteren. Hiervoor kan dan per windrichting een plot gepresenteerd worden waarbij de Z-waarde in kleur is weergegeven als functie van meerpeil en windsnelheid, zoals in Figuur 3-1. Voor de sterkte-eigenschappen is uitgegaan van “gesloten zoden” en geen overgangen (alle invloedscoëfficiënten gelijk aan 1.0).

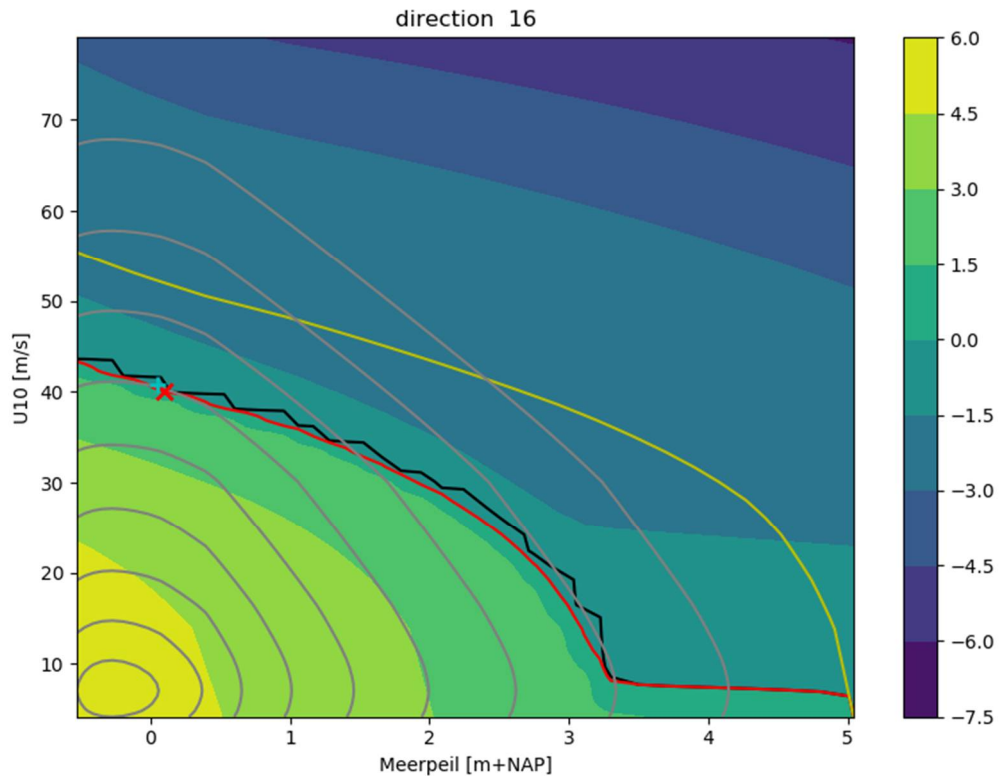
In dezelfde figuur is ook een rode contourlijn geplott voor  $Z=0$  (de combinatie belasting en sterkte gelijk zijn). Specifiek voor dit mechanisme is in aanvulling ook de  $Z=0$  contour geplott in geval er géén gladde functie zou zijn gebruikt (zwarte lijn). Tevens is met een gele lijn weergegeven bij welke condities sprake zou zijn van overloop. Tot slot zijn met de grijze lijn de lijnen met gelijke afstand tot punt (0,0) in de U-ruimte weergegeven. De faalkans voor het mechanisme wordt bepaald door de kortste afstand in U-ruimte tussen de lijn  $Z=0$  en de oorsprong in U-ruimte: deze afstand is de beta. Voor een nadere toelichting op de U-ruimte en het omrekenen van beta naar kans<sup>2</sup> wordt verwezen naar Deltares (2019a).

Uit de figuur valt op te maken dat de rode lijn (de gladde  $Z=0$  functie) de onderzijde volgt van de “trapjes-lijn” behorende bij de oorspronkelijke/discontinue beschrijving van het faalmechanisme GEBU-klap. Het toevoegen van de gladde functie heeft daarmee een beperkt effect op de Z-functie omdat de afstand tot de kortste afstand tot de oorsprong in U-ruimte nauwelijks wijzigt. Verder is ook op te maken dat de gele lijn ver boven de rode lijn ligt, wat betekent dat overloop geen invloed heeft op de ligging van de rode lijn en dus op de faalkans.

---

<sup>2</sup> De omrekening van faalkans naar beta kan in excel met  $Beta = \text{norm.s.inv}(1-\text{faalkans})$  en omgekeerd  $\text{faalkans} = 1 - \text{norm.s.dist}(beta; \text{waar})$

De afbeelding toont eveneens het gevonden ontwerppunt op basis van zowel de trekentechniek FORM (rode "x") als de rekentechniek Directional Sampling (blauwe "+"). De afbeelding laat zien dat het resultaat van FORM (snelle maar minder nauwkeurige rekentechniek) nagenoeg gelijk is aan het resultaat van Directional Sampling (dure maar nauwkeurige rekentechniek). In dit geval (locatie, windrichting, mechanisme) kan dus een voldoende nauwkeurig antwoord worden verkregen met de rekentechniek FORM.



*Figuur 3-1: GEBU-klap, kleurencontour: Z-waarde als functie van meerpeil en windsnelheid, grijze contourlijnen: Lijnen met gelijke afstand tot (0,0) in de U-ruimte (1 tot en met 10), rode lijn: Z=0 functie, zwarte lijn: Z=0 functie ongecorrigeerd faalmechanisme, gele lijn: overloop.*

De bovenstaande analyse is uitgevoerd voor 3 locaties (700090, 700094 en 700101), met elk 12 windrichtingen. De hierbij behorende afbeeldingen zijn opgenomen in Bijlage D. In sommige gevallen blijkt sprake te zijn van bijzondere Z=0 lijnen of ligt het resultaat van FORM ver af van het resultaat van Directional Sampling. Dit is echter te wijten aan afluisterende wind-/golfrichtingen en wordt als acceptabel verondersteld, omdat de gevonden faalkansen dan dusdanig laag zijn dat ze niet bijdragen aan de totale faalkans.

Uit de analyses voor de drie locaties volgt dat voor dit mechanisme de rekentechniek FORM gehanteerd kan worden. Wel wordt aanbevolen om na te gaan of de berekeningen met FORM geconvergeerd zijn en eventueel ter controle een berekening met Directional Sampling uit te voeren.

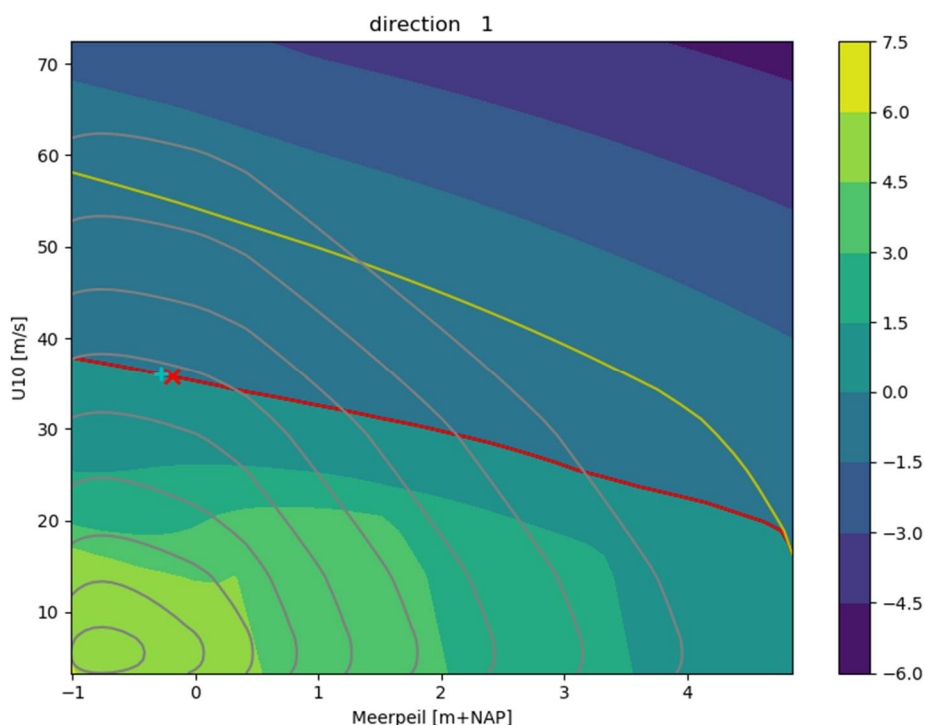
### 3.2 Grasbekleding Erosie Buitentalud (GEBU) – golfoploop

Ook het mechanisme GEBU-oploop is in de probabilistische tool Hydra-Ring opgenomen en net als het mechanisme GEBU-klap wordt de FoS vertaald naar een Z-waarde. Ook hier is voor de optie  $Z = \log_{10}(FoS)$  gekozen vanwege de grote waarde van de FoS in geval van geen falen. Omdat het mechanisme GEBU-oploop al monotoon daalt als functie van de belasting is er geen noodzaak voor het toevoegen van een extra term om dit te realiseren. Wel wordt omwille van stabiliteit de correctie “falen bij overloop” toegevoegd. Deze toevoeging is vooral gericht op de afluiddige windrichtingen, waarbij er geen golfaanval plaats vindt en als gevolg hiervan falen eigenlijk niet kan optreden. Het geheel leidt tot de volgende Z-functie voor GEBU-oploop:

$$Z_{GEBU\text{-oploop}} = \min \left\{ \log_{10}(FoS_{GEBU\text{-oploop}}); h_{kruin} - h_{piek} \right\} \quad (3.2)$$

Net als voor GEBU-klap is de Z-functie (zonder statistische en modelonzekerheden en sterkte eigenschappen behorende bij gesloten zoden zonder overgangen) geplot in U-ruimte, zie Figuur 3-2. Hierin is met de rode lijn de Z=0 contour geplot en met de gele lijn de lijn waarvoor geldt  $h_{kruin} = h_{piek}$  (overloop). Te zien is dat de lijn Z=0 ver onder de lijn van overloop ligt, alleen bij extreem hoge meerpeilen in combinatie met lage windsnelheden wordt de situatie met overloop relevant (gele lijn ligt op rode lijn). Dit betreft echter condities welke ver van de relevante condities af liggen ( $\beta \gg 10$ ) en dus heeft het meenemen van overloop geen invloed op de gevonden faalkans.

Figuur 3-2 toont eveneens de resultaten van de probabilistische som: rode “x” geeft het resultaat op basis van FORM en de blauwe “+” het resultaat op basis van Directional Sampling. Te zien is dat deze resultaten nagenoeg gelijk zijn, waaruit geconcludeerd kan worden dat voor dit geval de rekentechniek FORM tot een voldoende nauwkeurig antwoord zal leiden.



Figuur 3-2: GEBU-oploop, kleurencontour: Z-waarde als functie van meerpeil en windsnelheid, grijze contourlijnen: lijnen met gelijke afstand tot (0,0) in de U-ruimte (1 tot en met 10), rode lijn: Z=0 functie, zwarte lijn: Z=0 functie ongecorrigeerd faalmechanisme, gele lijn: overloop.

De bovenstaande analyse is uitgevoerd voor 3 locaties (700090, 700094 en 700101), met elk 12 windrichtingen. De hierbij behorende afbeeldingen zijn opgenomen in Bijlage E. In sommige gevallen blijkt sprake te zijn van bijzondere Z=0 lijnen of ligt het resultaat van FORM ver af van het resultaat van Directional Sampling. Dit is echter te wijten aan afluiddige wind-/golfrichtingen en wordt als acceptabel verondersteld, omdat de gevonden faalkansen dan dusdanig laag zijn dat ze niet bijdragen aan de totale faalkans.

Uit deze analyses voor de drie locaties volgt dat voor GEBU-oploop de rekentechniek FORM gehanteerd kan worden. Wel wordt aanbevolen om na te gaan of de berekeningen met FORM geconvergeerd zijn en eventueel ter controle een berekening met Directional Sampling uit te voeren.

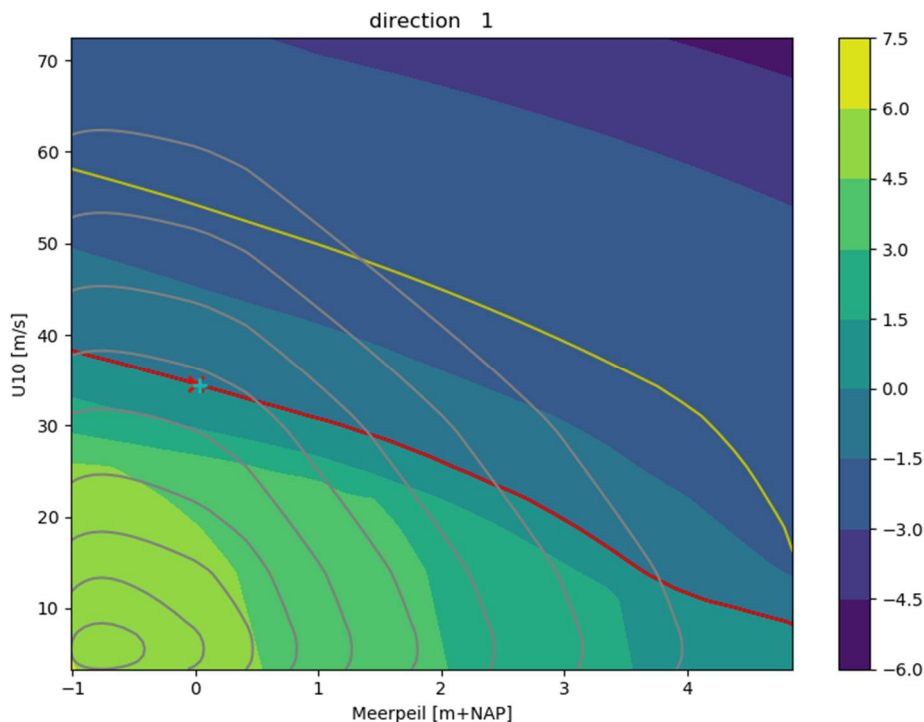
### 3.3 Grasbekleding Erosie Kruin en Binnentalud (GEKB)

Als laatste is het mechanisme GEKB toegevoegd aan de probabilistische berekening. Net als voor GEBU-oploop is hier de FoS vertaald naar Z-waarde middels  $Z = \log_{10}(FoS)$  en is overloop toegevoegd aan de Z-functie, leidend tot de volgende Z-functie voor GEKB:

$$Z_{GEKB} = \min \left\{ \log_{10}(FoS_{GEKB}); h_{kruin} - h_{piek} \right\} \quad (3.3)$$

Figuur 3-3 toont de contourplot van de resulterende Z-waarde voor combinaties van meerpeil en windsnelheid (zonder statistische en modelonzekerheden en de verwachtingswaarde van de sterkte eigenschappen behorende bij gesloten zoden zonder overgangen). Daarnaast wordt met de rode lijn Z=0 weergegeven en met de gele lijn wederom condities die tot overloop leiden. Te zien is dat de lijn waarvoor geldt Z=0 glad is er (ver) onder de overloop lijn ligt. Voor deze situatie is overloop dan ook niet relevant.

De resultaten verkregen met FORM (rode "x") en Directional Sampling (blauwe "+") laten zien dat het gebruik van FORM voor deze situatie tot een voldoende nauwkeurig antwoord leidt.



Figuur 3-3: GEKB, kleurencontour: Z-waarde als functie van meerpeil en windsnelheid, , grijze contourlijnen: lijnen met gelijke afstand tot (0,0) in de U-ruimte (1 tot en met 10), rode lijn: Z=0 functie, zwarte lijn: Z=0 functie ongecorrigeerd faalmechanisme, gele lijn: overloop.

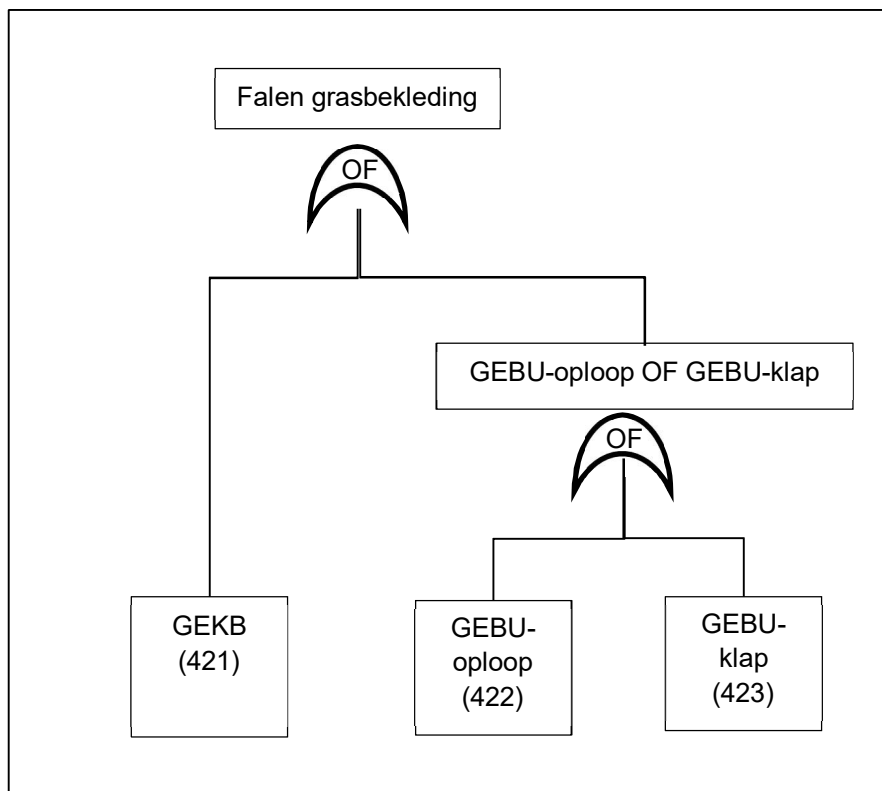
De bovenstaande analyse is uitgevoerd voor 3 locaties (700090, 700094 en 700101), met elk 12 windrichtingen. De hierbij behorende afbeeldingen zijn opgenomen in Bijlage F. In sommige gevallen blijkt sprake te zijn van bijzondere Z=0 lijnen of ligt het resultaat van FORM ver af van het resultaat van Directional Sampling. Dit is echter te wijten aan afluiddige wind-/golfrichtingen en wordt als acceptabel verondersteld, omdat de gevonden faalkansen dan dusdanig laag zijn dat ze niet bijdragen aan de totale faalkans.

Uit deze analyses voor de drie locaties volgt dat voor GEBU-oploop de rekentechniek FORM gehanteerd kan worden. Wel wordt aanbevolen om na te gaan of de berekeningen met FORM geconvergeerd zijn en eventueel ter controle een berekening met Directional Sampling uit te voeren.

### 3.4 Combinatie van mechanismen

De laatste stap voor het beoordelen en ontwerpen van de grasbekleding GEBU en GEKB bestaat uit het combineren van de faalmechanismen. Deze combinatie wordt gerealiseerd binnen Hydra-Ring, door een foutenboom op te stellen. Hydra-Ring bepaald eerst de kans op falen per (deel)faalmechanisme en combineert de faalkansen dan volgens de foutenboom, zie Deltares (2019a).

Voor het gecombineerd beoordelen en ontwerpen van de grasbekleding is de volgende foutenboom geïmplementeerd in Hydra-Ring:



Figuur 3-4: Foutenboom voor combineren GEBU-klap, GEBU-oploop en GEKB

In de foutenboom heeft elk faalmechanisme een ID gekregen: GEKB: 421, GEBU-oploop: 422 en GEBU-klap: 423. Deze ID's kunnen worden gebruikt bij een nadere inspectie van de resultaten. De foutenboom combineert eerst de mechanismen GEBU-oploop en GEBU-klap via een OF-poort. Vervolgens wordt de combinatie gemaakt met GEKB via eveneens een OF-poort. Bij het combineren van de mechanismen via de OF-poort wordt rekening gehouden met de mate waarin het falen van individuele gebeurtenissen onder zelfde omstandigheden optreedt. Voor een gedetailleerde beschrijving van de achterliggende rekentechniek wordt verwezen naar Deltares (2019a).

Tabel 3-1 toont een voorbeeld resultaat van het combineren van de verschillende mechanismen voor locatie 700101. Allereerst wordt per windrichting per mechanisme de gevonden beta gepresenteerd. Vervolgens wordt het resultaat van de combinatie GEBU-klap en GEBU-oploop getoond en tot slot de combinatie van alle mechanismen. Te zien is dat voor de meeste richtingen de beta van de gecombineerde mechanismen gedomineerd wordt door het mechanisme GEKB.

Opgemerkt wordt dat in de drie mechanismen ook overloop als mechanisme is opgenomen (omwille van stabiliteit van de probabilistische berekening). Dit betekent effectief dat overloop drie keer bijdraagt aan de faalkans. Omdat overloop normaliter alleen in de uiterste gevallen dominant is wordt dit effect als verwaarloosbaar verondersteld.

Windrichting [graden t.o.v. Noord]	0	22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5
GEKB	5.59	6.75	8.97	11.05	10.25	10.69	10.10	10.09
GEBU-oploop	5.68	6.85	8.90	10.07	11.81	14.02	10.10	10.09
GEBU-klap	6.61	7.89	8.51	10.08	10.09	10.10	10.10	10.09
GEBU-oploop+klap	5.68	6.85	8.50	10.01	10.09	10.10	10.10	10.09
GEKB+GEBU-oploop+klap	5.59	6.75	8.50	10.01	10.08	10.10	10.10	10.09

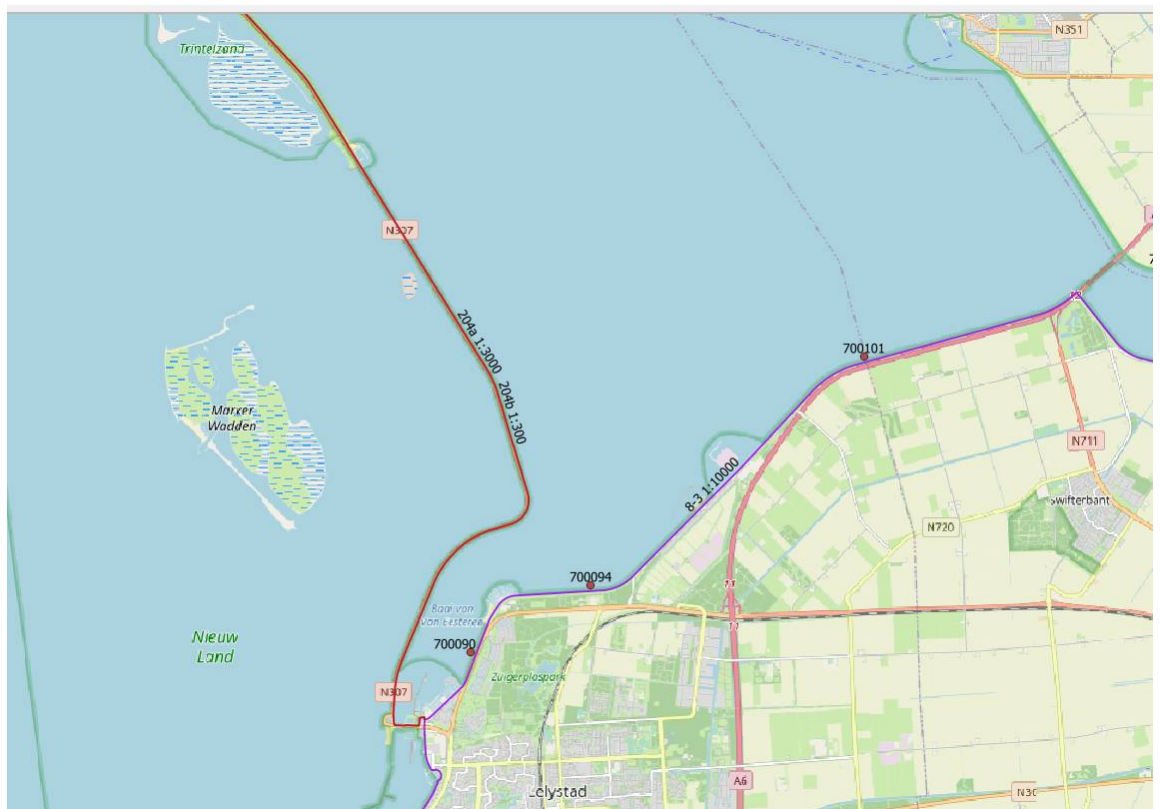
Windrichting [graden t.o.v. Noord]	180	202.5	225	247.5	270	292.5	315	337.5
GEKB	10.09	13.36	9.08	7.84	6.21	5.31	4.98	4.99
GEBU-oploop	10.09	13.06	8.79	7.83	6.48	5.55	5.16	5.09
GEBU-klap	10.09	10.08	13.50	9.94	7.16	6.17	5.90	5.98
GEBU-oploop+klap	10.09	10.08	8.79	7.83	6.48	5.55	5.16	5.09
GEKB+GEBU-oploop+klap	10.09	10.08	8.79	7.82	6.21	5.31	4.98	4.98

Tabel 3-1: Voorbeeld van beta's per mechanisme/combinatie mechanismen per windrichting voor locatie 700101.

## 4 Integratie tests

In hoofdstuk 2 is de validatie van de afzonderlijke componenten gerapporteerd, waarna in hoofdstuk 3 de toepassing (per mechanisme, per windrichting) in een probabilistische context is gevalideerd. De laatste stap is het valideren van het samenvoegen van de losse componenten tot één probabilistisch model. Een 1-op-1 validatie is niet mogelijk omdat er geen vergelijkbaar model beschikbaar is. Wel is het mogelijk om de consistentie van de resultaten te verifiëren door gevoeligheidsberekeningen uit te voeren. Daarnaast kan een vergelijking gemaakt worden met de in de eerste fase van dit project gebruikte Crude Monte Carlo analyse. Met betrekking tot het laatste moet opgemerkt worden dat als gevolg van verschillen in mechanismebesrijving een 1-op-1 vergelijking niet mogelijk is.

De integratie tests zijn uitgevoerd voor de drie locaties getoond Figuur 2-1, met dwarsprofielen zoals beschreven in Tabel 4-1. Voor de sterkte van de grasmat is uitgegaan van “gesloten zoden”. Een zuivere vergelijking is niet mogelijk vanwege (kleine) verschillen in de faalmechanisme beschrijvingen, maar met enkele aanpassingen kan een zo goed mogelijk vergelijk gemaakt worden.



Figuur 4-1 Beschouwde locaties in deze studie



Kenmerk	Locatie 700101	Locatie 700094	Locatie 700090
Oriëntatie [°N]	345	355	295
Kruinhoogte [m+NAP]	5.1	5.0	3.6
Taludhelling [-]	1-op-3	1-op-3	1-op-3
Niveau berm [m+NAP]	1.92	1.82	1.82
Lengte berm [m]	7.0	7.0	7.0
Overgang gras [m+NAP]	3.4	3.4	1.82

Tabel 4-1: Kenmerken dwarsprofielen

## 4.1 Vergelijk probabilistisch model met Crude Monte Carlo

Naast de validatie van de implementatie per mechanisme zoals getoond in Hoofdstuk 3 is ook een vergelijking gemaakt met de Crude Monte Carlo aanpak (gevoed met belastingsamples uit Hydra-Ring, maar met faalmechanisme beschrijvingen buiten Hydra-Ring om) zoals gebruikt in de eerste fase van dit project (en gerapporteerd in Bijlage A). De Crude Monte Carlo analyse had tot doel om aan te tonen of het bij elkaar voegen van GEBU en GEKB toegevoegde waarde heeft (of er sprake is van sterke correlatie tussen het optreden van falen door GEBU of GEKB). Om de betreffende Crude Monte Carlo analyse hanteerbaar te houden zijn een aantal uitgangspunten gehanteerd, welke van invloed zijn op de hiernavolgende vergelijking:

- Voor GEKB is in de Crude Monte Carlo analyse gerekend met het faalmechanisme “PC Overslag”, in combinatie met een rekenwaarde van het kritieke overslagdebiet. Om de vergelijking met Hydra-Ring/de “plug-in” mogelijk te maken is een rekenwaarde voor het kritieke overslagdebiet gefit op de zuivere cumulatieve overbelasting (invloedscoëfficiënten voor overgangen en versnelling behorende bij de binnentoe, volgens Deltares (2019b)) welke tot vergelijkbare uitkomsten leidt voor GEKB voor locatie 700101. De resulterende waarde is 40 l/s/m, waarbij opgemerkt wordt dat deze waarde locatie-afhankelijk is.
- Voor de belasting van de grasbekleding is een blokvorming tijdsverloop gehanteerd met een piekduur van 4 uur, gebaseerd op 2 uur echte piekduur en 1 uur voor en na de piek om de flanken te representeren. In de Hydra-Ring berekeningen is voor de vergelijking een constant waterstands- en golfverloop (reekstype = 0) gehanteerd met een duur van 4 uur om de vergelijking zuiver te maken.
- De invloed van de hoek van golfval op de golfoploop en golfoverslag wijkt in de Crude Monte Carlo analyse (voor grote hoeken van inval) af van de formuleringen in de “plug-in”. Dit maakt dat voor locaties waarvoor de dominante golfaanval onder een (grote) hoek binnenvalt de resultaten van Crude Monte Carlo en Hydra-Ring niet 1 op 1 vergelijkbaar zijn.
- De extrapolatie techniek, welke gebruikt wordt voor de bepaling van de lokale waterstand en golfcondities gegeven een windsnelheid en meerpeil, verschilt tussen de Crude Monte Carlo aanpak en Hydra-Ring, waardoor er in het extreme bereik verschillen kunnen ontstaan.

Tijdens de vergelijking van de resultaten is gebleken dat de bepaling van de invloed van de berm op de golfoploophoogte niet helemaal correct geïmplementeerd was in de Crude Monte Carlo implementatie. De Crude Monte Carlo aanpak is hierop aangepast, waardoor resultaten in de onderstaande tabellen afwijken van Bijlage A. De correctie van de Monte Carlo analyse heeft geen invloed op de conclusie van Bijlage A (GEBU en GEKB falen nog steeds bij vergelijkbare stormen).

Tabel 4-2 toont de faalkansen zoals berekend voor locatie 700101. De berekeningsresultaten van de Crude Monte Carlo aanpak en de Hydra-Ring aanpak zijn zeer vergelijkbaar. Zowel de faalkans per mechanisme als de (logischerwijs) hieruit volgende combinatie van mechanismen. Verschil in faalkans tussen beide aanpakken is slechts orde 3-4%. Een volledig zuivere vergelijking tussen de Crude Monte Carlo aanpak en Hydra-Ring is niet mogelijk vanwege verschillen in gehanteerde uitgangspunten, maar de gevonden verschillen worden acceptabel geacht. In zowel de Crude Monte Carlo aanpak als de Hydra-Ring aanpak geldt dat de faalkans gedomineerd wordt tototo het mechanisme GEKB en dat falen door GEBU veelal tegelijkertijd plaats vindt met falen door GEKB: in beide aanpakken wordt een vergelijkbare correlatie tussen falen door GEKB en GEBU gevonden.

Faalkansberekening	Faalkans per jaar (Crude Monte Carlo)	Faalkans per jaar (Hydra-Ring)
$P(FoS_{GEKB} < 1)$	9.49e-05	9.77e-05
$P(FoS_{GEBU} < 1)$	4.75e-05	5.19e-05
$P(FoS_{gras}) = P(FoS_{GEKB} < 1 \cup Fos_{GEBU} < 1)$	9.97e-05	1.08e-04

Tabel 4-2: Locatie 700101, berekende faalkansen volgens Monte Carlo analyse en Hydra-Ring.

De berekeningsresultaten voor locatie 700094 zijn opgenomen in Tabel 4-3. Ook voor deze locatie zijn de berekeningsresultaten in absolute vergelijkbaar: in de orde van procenten, met de grootse afwijking voor GEKB (veroorzaakt door het feit dat de rekenwaarde van het kritieke overslagdebiet voor een andere locatie en dus andere golfcondities is gefit). De verschillen zijn acceptabel gegeven de verschillen in uitgangspunten en rekentechnieken. Net als voor locatie 700101 wordt hier een vergelijkbare correlatie tussen falen door GEKB en GEBU gevonden.

Faalkansberekening	Faalkans per jaar (Crude Monte Carlo)	Faalkans per jaar (Hydra-Ring)
$P(FoS_{GEKB} < 1)$	4.02e-05	4.30e-05
$P(FoS_{GEBU} < 1)$	1.09e-05	1.41e-05
$P(FoS_{gras}) = P(FoS_{GEKB} < 1 \cup Fos_{GEBU} < 1)$	4.02e-05	4.41e-05

Tabel 4-3: Locatie 700094, berekende faalkansen volgens Monte Carlo analyse en Hydra-Ring.

De berekeningsresultaten voor locatie 700090 zijn opgenomen in Tabel 4-4. Te zien is dat de verschillen tussen beide aanpakken voor deze locatie relatief groot zijn. Voor GEKB wordt dit veroorzaakt door het feit dat de rekenwaarde van het kritieke overslagdebiet niet meer past bij de golfcondities van deze locatie: deze rekenwaarde had (veel) hoger moeten zijn; lagere golfcondities betekent lagere stroomsnelheden en leidt daarmee tot een hogere rekenwaarde van het kritieke overslagdebiet.

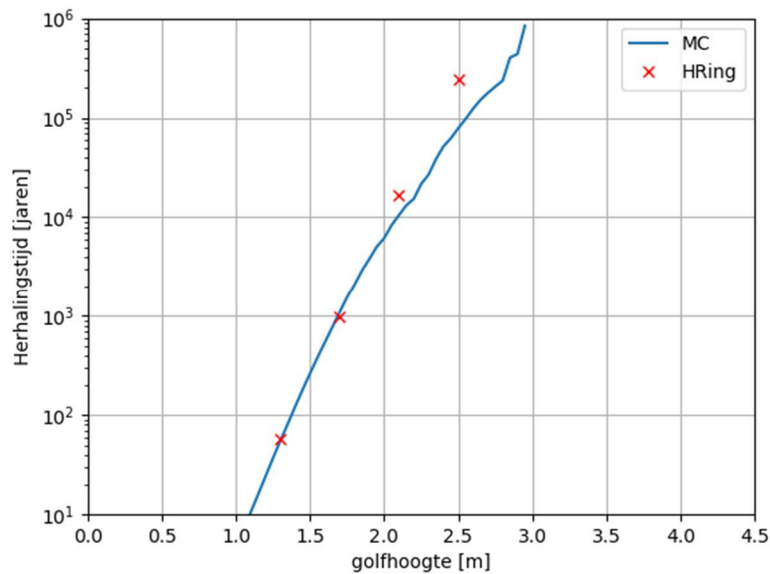
Voor GEBU wordt het verschil vooral veroorzaakt door het verschil in extrapolatie techniek voor condities die buiten het bereik van de database fysica vallen in combinatie met het

verschil in tijdsverloop van de golfhoogte binnen een storm. Dit is te terug te zien in als de overschrijdingscurves van de golfhoogtes met elkaar worden vergeleken, zie Figuur 4-2.

Los van de verschillen is ook hier te zien dat er sprake is van een sterke correlatie tussen optreden van falen door GEKB en GEBU, waarbij voor deze locatie GEBU het bepalende mechanisme is.

Faalkansberekening	Faalkans per jaar (Crude Monte Carlo)	Faalkans per jaar (Hydra-Ring)
$P(FoS_{GEKB} < 1)$	2.36e-05	4.56e-06
$P(FoS_{GEBU} < 1)$	1.67e-04	6.63e-04
$P(FoS_{gras}) = P(FoS_{GEKB} < 1 \cup Fos_{GEBU} < 1)$	1.87e-04	6.64e-04

Tabel 4-4: Locatie 700090, berekende faalkansen volgens Monte Carlo analyse en Hydra-Ring.



Figuur 4-2: Overschrijdingscurve golfhoogte voor locatie 700090: blauw: Crude Monte Carlo analyse, rood: Hydra-Ring.

Op basis van de vergelijking met de Crude Monte Carlo analyse wordt geconcludeerd dat een zeer vergelijkbare kansbijdrage van de individuele faalmechanismen wordt gevonden. Daarnaast wordt geconcludeerd dat de gecombineerde kans  $P(FoS_{gras} > 1)$  uit de Crude Monte Carlo analyse overeenkomt met de gevonden gecombineerde kans  $P(FoS_{gras} > 1)$  met de “plug-in”. De gevonden mate van correlatie tussen falen door de mechanismen GEBU en GEKB is zeer vergelijkbaar.

## 4.2 Consistentie checks

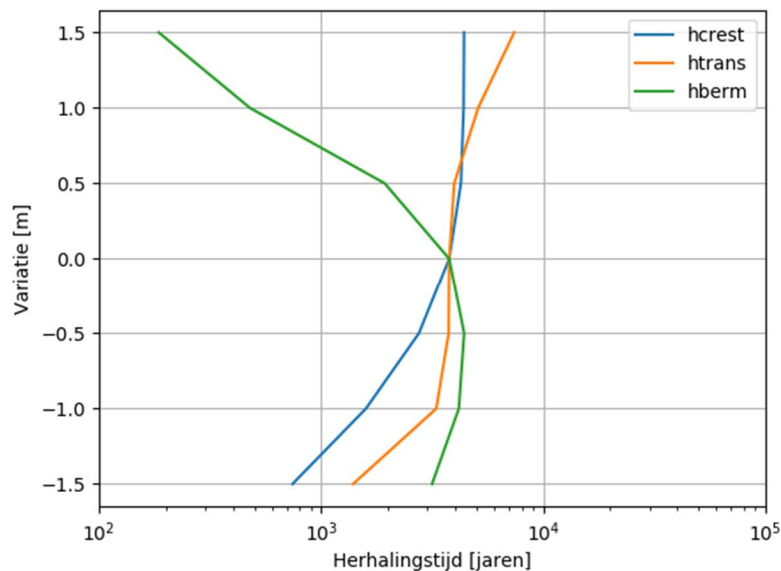
Ten behoeve van de validatie van het volledig probabilistische model zijn voor de drie beschouwde locaties gevoeligheidsberekeningen uitgevoerd. Het betreft variaties van de hoogteligging (-1.5 meter tot +1.5 meter met stappen van 0.5 meter) van de belangrijkste componenten van het dijkprofiel:

- Variatie van de kruinhoogte: “ $h_{crest}$ ”
- Variatie van de overgang harde/grasbekleding: “ $h_{trans}$ ”
- Variatie van de hoogte van de berm: “ $h_{berm}$ ”

Opgemerkt wordt dat variaties per variabele zijn toegepast: gecombineerde variaties zijn niet beschouwd.

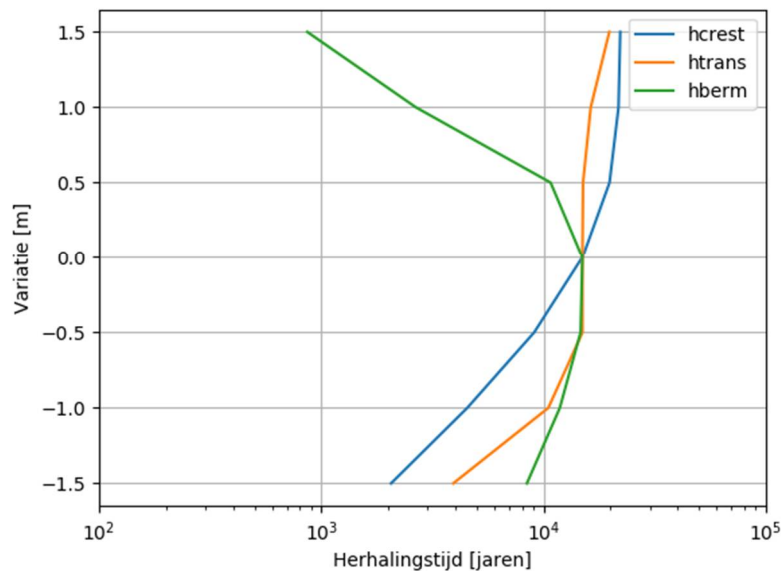
Figuur 4-3 toont de resultaten van de gevoeligheidsanalyse voor locatie 700101. De afbeelding laat zien dat met een afname van de kruinhoogte ( $h_{crest}$ ) de faalkans toeneemt, maar dat met een toename van de kruinhoogte de faalkans slechts beperkt afneemt. Dit is het gevolg van het feit dat bij hogere kruinhoogtes de faalkans gedomineerd wordt door het mechanisme GEBU. Omgekeerd laat de variatie in de hoogte van de overgang ( $h_{trans}$ ) zien dat in het domein waarover de faalkans door GEKB wordt gedomineerd (-0.5 tot +0.5 meter) de variatie in hoogte van de overgang geen invloed heeft, maar dat daarbuiten wel een effect van de hoogte van de overgang te zien is.

Tot slot is te zien dat de effectiviteit van de berm afneemt met een toenemende hoogte: de berm ligt dan (gegeven de overige geometrische eigenschappen) te ver in de oploophoogte om nog een significant effect te hebben op de belasting van het buitentalud.



Figuur 4-3: Gevoeligheidsanalyse locatie 700101. Blauw: variatie kruinhoogte, oranje: variatie hoogte overgang hard/gras en groen: variatie hoogte berm.

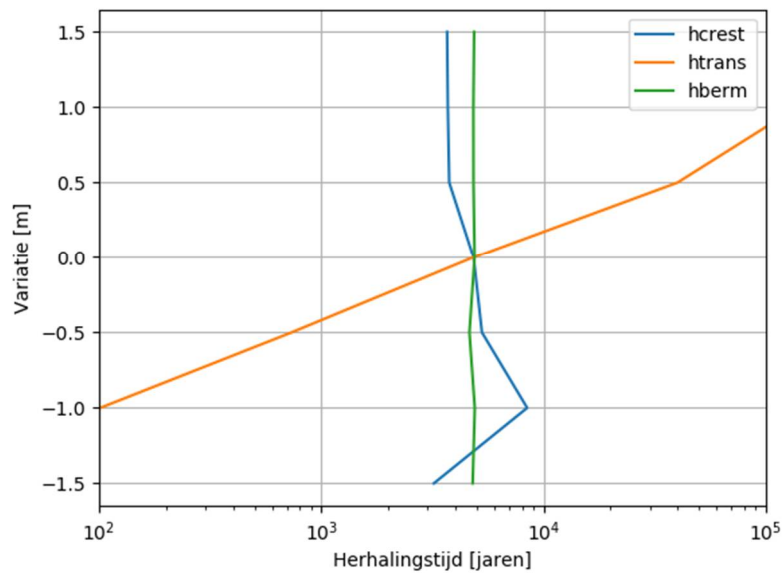
Voor locatie 700094 wordt een vergelijkbaar beeld gevonden, zie Figuur 4-4. Ook hier heeft het verhogen van de kruin met meer dan 1.0 meter geen invloed meer op de faalkans omdat het falen dan gedomineerd wordt door het mechanisme GEBU. Omgekeerd heeft een variatie van de hoogte van de overgang pas effect als deze ervoor zorgt dat GEBU dominant is.



Figuur 4-4: Gevoeligheidsanalyse locatie 700094. Blauw: variatie kruinhoogte, oranje: variatie hoogte overgang hard/gras en groen: variatie hoogte berm.

Tot slot is dezelfde analyse uitgevoerd voor locatie 700090. Voor deze locatie geldt dat de faalkans gedomineerd wordt door het mechanisme GEBU en niet door GEKB. Als gevolg hiervan is een sterke gevoeligheid voor de hoogte van de overgang (“htrans”) te zien over het gehele bereik en geen/nauwelijks gevoeligheid voor de hoogte van de kruin of de hoogte van de berm.

De getoonde gevoeligheid van de faalkans voor de kruinhoogte laat een (beperkte) toename van de faalkans zien bij toename van de kruinhoogte: deze afname is het gevolg van het feit dat de berekening met FORM niet altijd convergeert: deze variatie valt binnen de nauwkeurigheid van de hier gehanteerde rekentechniek en moet genegeerd worden. Voor deze locatie (en nabijgelegen locaties) geldt dat in sommige gevallen Directional Sampling toegepast dient te worden om een stabiel antwoord te verkrijgen.



Figuur 4-5: Gevoeligheidsanalyse locatie 700090. Blauw: variatie kruinhoogte, oranje: variatie hoogte overgang hard/gras en groen: variatie hoogte berm.

## 5 Gebruikershandleiding

### 5.1 Omschrijving uitlevering

De “plug-in” voor het berekenen van gecombineerd GEBU en GEKB wordt (na ondertekening gebruikersovereenkomst) uitgeleverd in een zip-file met de volgende inhoud:

Map “0.plugin” met de volgende bestanden:

- “CombinedGEKBandGEBU\_v1.0\_i686.dll”: de “plug-in”
- diverse ondersteunende bibliotheken

Map “1.testcases” met de volgende sub-mappen:

- 0.HRD: de HRD en HLCD voor dijktraject 8-3a
- 700090/700094/700101: voorbeeld berekeningen

Map “2.documentatie” met de volgende bestanden:

- deze rapportage
- Hydra-Ring Technical Reference Manual
- Hydra-Ring Technical Design

### 5.2 Berekeningen uitvoeren met de plug-in met Hydra-Ring

#### 5.2.1 Voorbereidende activiteiten

Voordat berekeningen uitgevoerd kunnen worden met de “plug-in” dient Riskeer geïnstalleerd te worden. De “plug-in” is ontwikkeld en getest voor gebruik met “Riskeer 19.1.1.2” (waarvan Hydra-Ring 19.1.1 een onderdeel is).

Verder wordt geadviseerd om de uitgeleverde zip-file uit te pakken en te controleren of de inhoud overeen komt met de beschrijving in sectie 5.1. Geadviseerd wordt om de directory “0.plugin” lokaal op de PC te zetten (en niet op een netwerk-locatie). De locatie van deze directory is later benodigd om berekeningen te kunnen klaarzetten.

#### 5.2.2 Testen installatie

De installatie van de “plug-in” kan getest worden door de testcases (“1.testcases”) te kopiëren naar een lokale schijf. Let op dat voor deze test ook de directory “0.HRD” wordt gekopieerd en dat deze eveneens onder “1.testcases” staat (er wordt gebruik gemaakt van een relatieve pad-verwijzing).

Ga vervolgens naar een directory met een voorbeeld berekening (bijv. “1.testcases\700101”). Open het bestand “run.bat” met een teksteditor om daarin de volgende wijzigingen door te voeren:

- Vervang “PAD\_NAAR\_PLUGIN” door het werkelijke pad naar de “plug-in”, bijvoorbeeld: “c:\0.plugin\”
- Controleer en pas eventueel de locatie van de Hydra-Ring installatie (specifiek de locatie van “MechanismComputation.exe”) binnen Riskeer aan. Default installatie van Hydra-Ring is als volgt: “c:\Program Files(x86)\BO\Riskeer19.1.1.2\bin\HydraRing\MechanismComputation.exe”

Sla de aanpassingen in “run.bat” op en dubbelklik op “run.bat”: de berekening is gestart. De installatie is succesvol als er een bestand “designTable.txt” is aangemaakt, waarin de berekende faalkans voor deze berekening is weergegeven.

### 5.2.3 Zelf berekeningen definiëren en uitvoeren

Voor het zelf definiëren en uitvoeren van berekeningen kan het beste gestart worden met een voorbeeld case als basis. Vervolgens kan de berekening aangepast worden met behulp van onderstaande beschrijving.

#### 5.2.3.1 Aanpassingen “1.ini”

In het bestand “1.ini” kunnen de volgende invoervelden aangepast worden:

- *Configdbfilename*: dit veld beschrijft de locatie en naam van het te hanteren config-bestand (configuratie-database). In de voorbeeld bestanden staat hier “.\config\_CombinedGEKBandGEBU\_v1.0.sqlite”, wat betekent dat het config-bestand in de directory van de invoer gehanteerd wordt. Eventueel kan het configuratie bestand ergens anders opgeslagen worden, maar dan dient hier de locatie ook aangepast te worden.
- *Hydraulicdbfilename*: dit veld beschrijft de locatie van de te hanteren HLCD (en HRD), welke per dijktraject beschikbaar zijn via de Helpdesk Water. De voor dijktraject 8-3a relevante HLCD (zichtjaar 2023) en HRD zijn meegeleverd met de uitlevering.
- *convergenceOutputInner* en *convergenceOutputInner*: deze velden geven aan of informatie aangaande convergentie weggeschreven moet worden in de uitvoer. Geadviseerd wordt om deze informatie weg te laten schrijven door hier “sqlite” in te voeren.

#### 5.2.3.2 Aanpassingen “1.sql”:

In het bestand “1.sql” kunnen de volgende invoervelden worden aangepast:

- [Sections] VALUES (1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 700090, 700090, 100, 345, 0):  
de te gebruiken locatie uit de Hydraulische Database kan hier gewijzigd worden (rood gemarkeerd). Let op: de LocatieID moet twee keer aangepast worden.
  - [DesignTables] VALUES (1, 101, 1, 1, 3, 15, 0, 1.82, 1.82, 0.2, 0, 0, 0):  
Hydra-Ring berekent de faalkans gegeven de sterkte eigenschappen. Het is mogelijk om Hydra-Ring een reeks berekeningen te laten uitvoeren voor een range aan waarden voor een specifieke sterkte variabele. De te variëren sterkte-eigenschap kan worden aangegeven door de 6<sup>de</sup> waarde (in dit geval “15”) te wijzigen. De nummers van de sterktevariabelen worden onderstaand toegelicht. De 7<sup>de</sup>, 8<sup>ste</sup> en 9<sup>de</sup> waarden specificeren de startwaarde, de eindwaarde en de stapgrootte waarmee waarde van de variabele gewijzigd moet worden. In het bovenstaande voorbeeld wordt er 1 faalkansberekening gedaan: variabele 15 met een waarde van 1.82 (start- en eindwaarde zijn immers hetzelfde).
1. [Numerics] VALUES (1, 101, 1, 1, 421, 1, 8, 500, 0.15, 0.005, 0.005, 0.005, 1, 3, 100, 40000, 0.1, 0.0, 6.0, 60);  
In de meegeleverde voorbeelden wordt gebruik gemaakt van de rekentechniek FORM. Verwacht wordt dat dit veelal toegepast kan worden en dat aanpassing van de rekentechniek niet noodzakelijk is. Indien een berekening desondanks niet convergeert, dan is het mogelijk om per mechanisme de rekentechniek (FORM, Directional Sampling) en de startmethode aan te passen, zie Deltares (2019a) voor de mogelijkheden. Voor het gebruik Directional Sampling dient de 6<sup>de</sup> waarde gewijzigd te worden van “1” naar 4 (Directional Sampling) of 12 (Directional sampling met FORM voor het ontwerp punt).



- [CalcWindDirections] VALUES (1, 101, 1, 0);  
Het is mogelijk om specifieke windrichtingen aan te geven die meegenomen moeten worden bij de faalkansberekening (standaard worden alle windrichtingen meegenomen). Het specificeren van windrichtingen kan door per windrichting (3<sup>de</sup> veld) aan te geven in het 4<sup>de</sup> veld of deze wel (1) of niet (0) meegenomen moet worden in de berekening. In de voorbeeld bestanden is een regel per windrichting opgenomen, maar uitgecommentarieerd. Dit kan geactiveerd worden door de "--" aan het begin van de regel te verwijderen.
- [VariableDatas] VALUES (1, 101, 1, 1, VariableID, waarde, kansverdeling, mu, sigma, lower, upper, 1, 0.00, 300);  
De regels met "VariableDatas" vormen de kern van de invoer; hier worden alle sterkte-eigenschappen voor de plug-in gekwantificeerd. Deze kwantificering vindt plaats met de velden 5 t/m 11, afhankelijk van het type informatie:
  - 5<sup>de</sup> veld: VariabeleID: niet wijzigen, te gebruiken in tabel DesignTables
  - 6<sup>de</sup> veld: waarde: indien de variabele een determinist is, dan kan hier de getalswaarde worden ingevuld
  - 7<sup>de</sup> veld: kansverdeling: indien de variabele een stochast is, dan kan hier de verdelingstype worden aangegeven (0 = deterministisch, 19 is getrunceerde normale verdeling, voor andere verdelingen zie Deltares (2019a))
  - 8<sup>ste</sup> veld: gemiddelde waarden (mu) van de gedefinieerde kansverdeling
  - 9<sup>de</sup> veld: standaardafwijking (sigma) van de gedefinieerde kansverdeling
  - 10<sup>de</sup> veld: ondergrens van de getrunceerde kansverdeling
  - 11<sup>de</sup> veld: bovengrens van de getrunceerde kansverdeling

Voor de "plug-in" moeten 5 groepen van variabelen gezet worden: (i) variabelen met betrekking tot belastingen, (ii) variabelen aangaande de dijkgeometrie en (iii)-(v) variabelen behorende bij de drie faalmechanismen. Onderstaande tabellen geven per groep een beschrijving van de variabelen en waar relevant een voorgestelde waarde. Let op: voor elke variabele dient ofwel een vaste waarde ofwel een stochast gedefinieerd te worden: lege velden zijn niet toegestaan.

Naam	VariableID	Voorgestelde waarde	Stochast	Toelichting
Reekstype	1	3 [-]	verdelingstype=0	Zie beschrijving in sectie 2.1
Basisduur	2	48 [uur]	verdelingstype=0	Zie beschrijving in sectie 2.1
Piekduur	3	2 [uur]	verdelingstype=0	Zie beschrijving in sectie 2.1
Getijamplitude	4	1.0 [meter]	verdelingstype=0	Zie beschrijving in sectie 2.1
$\Delta t$	5	0.25 [uur]	verdelingstype=0	Zie beschrijving in sectie 2.1
varF_runup	6	N.v.t. (kies dus bijv. 0)	verdelingstype=19 Mu = 1, Sigma =0.07 Lower=0.0 Upper=5.0	Variatie van $z_{2\%}$
varF_Dload	7	N.v.t. (kies dus bijv. 0)	verdelingstype=19 Mu = 0, Sigma =1.0 Lower=-1.0 Upper=5.0	Coëfficiënt $v_f$ in vergelijking (2.25)

Tabel 5-1: Variabelen met betrekking tot de belastingen

Naam	VariableID	Voorgestelde waarde	Stochast	Toelichting
<b>Slope<sub>lower</sub> (<math>\tan\alpha</math>)</b>	10	[-]	verdelingstype=0	Taludhelling ondertalud
<b>Slope<sub>upper</sub> (<math>\tan\alpha</math>)</b>	11	[-]	verdelingstype=0	Taludhelling boventalud
<b>Teen niveau</b>	12	[m+NAP]	verdelingstype=0	
<b>Berm niveau</b>	13	[m+NAP]	verdelingstype=0	Waarde moet liggen tussen Teen niveau en Kruinhoogte
<b>Berm lengte</b>	14	[meters]	verdelingstype=0	Berm lengte (-9 = geen berm)
<b>Kruinhoogte</b>	15	[m+NAP]	verdelingstype=0	Moet groter zijn dan overgang hard/zacht
<b>Dijk normaal</b>	16	[°N]	verdelingstype=0	Waarde tussen 0° en 360°
$\gamma_{f,talud}$	17	[-]	verdelingstype=0	Zie TAW (2002)
<b>Overgang hard/zacht</b>	18	[m+NAP]	verdelingstype=0	Moet kleiner zijn dan kruinhoogte
<b><math>\Delta z</math></b>	19	0.1 meter	verdelingstype=0	Stapgrootte voor beoordeling GEBU tussen overgang hard/zacht en kruinhoogte
$\gamma_{f,zone}$	50	[-]	verdelingstype=0	Zie TAW (2002)
$y_{zone,min}$	51	[m+NAP]	verdelingstype=0	Waarde moet liggen tussen Teen niveau en Kruinhoogte
$y_{zone,min}$	52	[m+NAP]	verdelingstype=0	Waarde moet liggen tussen Teen niveau en Kruinhoogte EN groter zijn dan $y_{zone,min}$

Tabel 5-2: Variabelen met betrekking tot het dijkprofiel

Naam	VariableID	Voorgestelde waarde	Stochast	Toelichting
<b><math>\Delta t</math></b>	20	900 [s]	verdelingstype=0	
<b><math>U_c</math></b>	21	[m/s]	verdelingstype=19 Lower=0.0 Upper=12.0	Mu en sigma conform Deltares (2019b)
<b><math>\alpha_M</math></b>	22	1.1 [-]	verdelingstype=0	Conform Deltares (2019b), zie onderstaand
<b><math>\alpha_a</math></b>	23	1.4 [-]	verdelingstype=0	Conform Deltares (2019b), zie onderstaand
<b><math>\alpha_s</math></b>	24	1.0 [-]	verdelingstype=0	Conform Deltares (2019b), zie onderstaand
<b><math>c_u</math></b>	25	1.45 [-]	verdelingstype=0	
<b><math>D_{crit}</math></b>	26	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	verdelingstype=19 Lower=0.0 Upper=10000	Mu en sigma conform Deltares (2019b)

Tabel 5-3: Variabelen met betrekking tot het mechanisme GEKB

In geval van het mechanisme GEKB dient voor de waarden van  $\alpha_M$ ,  $\alpha_a$  en  $\alpha_s$  de kritieke combinatie gehanteerd te worden. De waarden voor de coëfficiënten (en  $U_c$ ) variëren mogelijk langs de kruin en het binnentalud. Op basis van Deltares (2019b) kan voor elk deel van het talud de waarde van  $\alpha_M$ ,  $\alpha_a$  en  $\alpha_s$  worden bepaald. De kritieke combinatie betreft de combinatie met de laagste waarde voor:

$$\frac{\alpha_S U_c}{\alpha_M \alpha_a^2} \quad (5.1)$$

Naam	VariableID	Vaste waarde	Stochast	Toelichting
$\Delta t$	30	900 [s]	Nee	
$U_c$	31	6.6 [m/s]	Nee	Zie RWS (2019) voor waarde $U_c$
$\alpha_{M,overgang}$	32	1.0 [-]	Nee	Coëfficiënt voor overgang hard/zacht conform RWS (2019)
$\alpha_{S,overgang}$	33	1.0 [-]	Nee	Coëfficiënt voor overgang hard/zacht conform RWS (2019)
$c_u$	34	1.1 [-]	Nee	
$D_{crit}$	35	7000 [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	Nee	Zie RWS (2019) voor waarde $D_{crit}$
$\alpha_{M,helling}$	36	1.0 [-]	Nee	Coëfficiënt voor helling conform RWS (2019)
$\alpha_{S,helling}$	37	1.0 [-]	Nee	Coëfficiënt voor helling conform RWS (2019)

Tabel 5-4: Variabelen met betrekking tot het mechanisme GEBU-oploop

Naam	VariableID	Voorgestelde waarde	Stochast	Toelichting
$\Delta t$	40	900 [s]	Nee	
<b>a</b>	41	[-]	Nee	Zie RWS (2019) voor waarde a
<b>b</b>	42	[-]	Nee	Zie RWS (2019) voor waarde b
<b>c</b>	43	[-]	Nee	Zie RWS (2019) voor waarde c
$F_{sand}$	44	[-]	Nee	Zie RWS (2019) voor waarde $F_{sand}$
$D_{combined}$	45	[meters]	Nee	Zie RWS (2019) voor waarde $D_{combined}$
$\lambda_2$	46	20 [-]	Nee	Coëfficiënt gladde functie (2.18)
$\lambda_2$	47	0 [-]	Nee	Coëfficiënt gladde functie (2.18)

Tabel 5-5: Variabelen met betrekking tot het mechanisme GEBU-klap

### 5.2.3.3 Aanpassingen “run.bat”:

Het bestand “run.bat” dient aangepast te worden zoals beschreven in sectie 5.2.2.

De berekening kan gestart worden door te dubbelklikken op de “run.bat”. De berekening is succesvol afgerond als het “command window” verdwijnt en er geen bestand is aangemaakt met de naam “last\_error.txt”.

### 5.2.3.4 Sommen maken met losse mechanismen

Het is mogelijk om ook sommen te maken met de individuele mechanismen GEKB, GEBU-oploop of GEBU-golfklap. Hierbij wordt dus niet de in sectie 3.4 getoonde foutenboom gebruikt, maar een faalboom met slechts 1 tak en 1 mechanisme. Een dergelijke berekening

kan worden uitgevoerd door in het bestand "1.sql" het nummer van de te hanteren foutenboom (default=1017) aan te passen:

```
INSERT INTO [SectionFaultTreeModels] VALUES (1, 101, 1, 1, 1017);
```

Hiervoor zijn de volgende opties beschikbaar:

- 1017: gecombineerd GEKB, GEBU-oploop en GEBU-golfklap
- 1021: alleen mechanisme GEKB
- 1022: alleen mechanisme GEBU-oploop
- 1023: alleen mechanisme GEBU-golfklap

## 5.3 Inspectie van resultaten

Nadat een berekening is uitgevoerd dient als eerste vastgesteld te worden dat er geen bestand is aangemaakt met de naam "last\_error.txt". Indien er toch een bestand met deze naam is aangemaakt, dan wordt in het bestand aangegeven waarom de berekening niet goed is afgerond.

Indien de berekening goed is afgerond, dan kan men in het bestand "designTable.txt" de berekende faalkans uitlezen (per doorgerekende invoervariatie). Aanbevolen wordt echter om de berekening nader te inspecteren op basis van onderstaande handreikingen.

Voor de nadere controle en duiding van de resultaten dient een sqlite-bestand te worden geopend. Hiervoor wordt aanbevolen gebruik te maken van de vrij beschikbare tool "DB Browser for SQLite", te vinden op <https://sqlitebrowser.org/>. De onderstaande handreiking gaat uit van het gebruik van deze tool.

## 5.4 Controle convergentie FORM

De "plug-in" is ontwikkeld met rekentechniek FORM als gewenste rekentechniek. De uitgevoerde testberekeningen laten zien dat FORM vaak in staat is de faalkans te berekenen. Uitzondering hierop zijn afluwindrichtingen, maar omdat deze niet significant bijdragen aan de faalkans is convergentie niet strikt noodzakelijk, mits de gevonden faalkans voor deze richtingen voldoende groot is ten opzichte van de dominante windrichtingen.

De convergentie van de uitgevoerde berekeningen kan gecontroleerd worden door het bestand "1-output.sqlite" te openen met "DB Browser for SQLite". Kies vervolgens voor het tabblad "Browse Data" en selecteer in het pull-down menu de tabel "ConvergenceResultsFORM", zie Figuur 5-1.

De tabel toont nu alle convergentieresultaten voor alle met FORM uitgevoerde faalkansberekeningen. Dit betreft een berekening per sterkte variatie (zoals gedefinieerd in DesignTables), welke hier gelabeld zijn met "OuterIterationId". Door in het veld bovenaan de kolom "OuterIterationID" "=1" in te vullen worden alleen de convergentie resultaten van de eerste variatie van de sterktevariabele getoond.

Voor deze eerste variatie zijn A x B x C berekeningen uitgevoerd:

A: 3 ten behoeve van de tijdsintegratie (gelabeld "PeriodID"),

B: 16 voor alle windrichtingen af te lopen (gelabeld "WindDirectionId")

C: 3 voor de beschouwde mechanismen (421=GEKB, 422=GEBU-oploop en 423=GEBU-klap)

Van belang is dat voor tenminste voor alle berekeningen binnen de laatste iteratie van de tijdsintegratie (= 1 x 16 x 3=48) convergentie is bereikt. Dit is te controleren door in het veld boven "PeriodId" de waarde "=3" in te vullen en vervolgens na te gaan of voor "ConvergenceType" overal een waarde 1 is opgenomen. Indien hier een waarde 0 (of -1) staat dan betekent dit dat FORM niet geconvergeerd is. Zoals eerder vermeld kan dit voorkomen voor afluiddige situaties. Om na te gaan of de niet-geconvergeerde berekeningen betrekking hebben op situatie met afluiddige wind kan gekeken worden naar de kolom "WindDirectionID" om vast te stellen om welke windrichting dit gaat.

De koppeling tussen "WindDirectionID" en de daadwerkelijke windrichting is te vinden in de tabel "WindDirections", welke te vinden is in het pull-down menu.

In het geval dat sprake is van geen convergentie voor dominante windrichtingen, wordt aanbevolen om over te stappen op de rekentechniek Directional Sampling (zie sectie 5.2.3.2).

OuterIterationId	PeriodId	SectionId	LayerId	AlternativeId	WindDirectionId	ClosingSituationId	SubmechanismId	CounterId	NumberIterations	ConvergenceType
1	1	1	1	1	1	1	421	1	18	1
2	1	2	1	1	1	1	421	4	14	1
3	1	3	1	1	1	1	421	7	17	1
4	1	1	1	1	2	1	421	10	18	1
5	1	2	1	1	2	1	421	13	14	1
6	1	3	1	1	2	1	421	16	17	1
7	1	1	1	1	3	1	421	19	20	1
8	1	2	1	1	3	1	421	22	11	1
9	1	3	1	1	3	1	421	25	22	1
10	1	1	1	1	4	1	421	28	24	1
11	1	2	1	1	4	1	421	31	25	1
12	1	3	1	1	4	1	421	34	25	1
13	1	1	1	1	5	1	421	37	19	1
14	1	2	1	1	5	1	421	40	14	1
15	1	3	1	1	5	1	421	43	14	1
16	1	1	1	1	6	1	421	46	34	1
17	1	2	1	1	6	1	421	49	33	1
18	1	3	1	1	6	1	421	52	33	1
19	1	1	1	1	7	1	421	55	34	1
20	1	2	1	1	7	1	421	58	35	1
21	1	3	1	1	7	1	421	61	35	1
22	1	1	1	1	8	1	421	64	34	1
23	1	2	1	1	8	1	421	67	35	1
24	1	3	1	1	8	1	421	70	35	1
25	1	1	1	1	9	1	421	73	34	1
26	1	2	1	1	9	1	421	76	35	1
27	1	3	1	1	9	1	421	79	35	1
28	1	1	1	1	10	1	421	82	44	1

Figuur 5-1: Snapshot van de tabel "ConvergenceResultsFORM"

## 5.5 Inspectie faalkansbijdragen mechanismen

Zoals eerder aangegeven wordt er een faalkans per mechanisme, per windrichting bepaald (en dat in drie iteraties voor de tijdsintegratie methode FBC). De gevonden faalkans na de laatste iteratie van de tijdsintegratie kan worden opgezocht in "1-output.sqlite".

Open hiervoor “1-output.sqlite” met behulp van “DB Browser for SQLite”. Kies vervolgens voor het tabblad “Browse Data” en selecteer in het pull-down menu de tabel “DesignBeta”, zie Figuur 5-2.

In geval van een berekening met meerdere variaties van de sterkte (opgegeven via DesignTables) dient eerst een variatie geselecteerd te worden door in het veld boven de kolom “OuterIterationId” het nummer van de variatie te kiezen (bijvoorbeeld “=1”). Vervolgens dient in het veld boven kolom “LevelTypeId” het volgende ingevoerd te worden: “=7”, zie Figuur 5-2. Wat resteert zijn dan de resultaten van de faalkansberekening per windrichting per mechanisme. In de kolom “BetaValue” zijn nu per windrichting en per mechanisme de faalkansen (uitgedrukt in beta) af te lezen. Het mechanisme met de laagste beta (per windrichting) heeft de grootste faalkansbijdrage.

Voor de volledigheid herhalen we hier de SubMechanismId's: GEKB: 421, GEBU-oploop: 422, GEBU-klap: 433. De WindDirectionId's zijn terug te vinden in de tabel “WindDirections”.

OuterIterationId	SectionId	LayerId	AlternativeId	FaultTreeId	LevelTypeId	SubMechanismId	PeriodId	WindDirectionId	ClosingSituationId	BetaValue
1	1	1	1	-999	7	421	3	1	1	5.30084
2	1	1	1	-999	7	422	3	1	1	5.98122
3	1	1	1	-999	7	423	3	1	1	4.88159
4	1	1	1	-999	7	421	3	2	1	5.94228
5	1	1	1	-999	7	422	3	2	1	6.71968
6	1	1	1	-999	7	423	3	2	1	5.67222
7	1	1	1	-999	7	421	3	3	1	6.98003
8	1	1	1	-999	7	422	3	3	1	8.15274
9	1	1	1	-999	7	423	3	3	1	7.02964
10	1	1	1	-999	7	421	3	4	1	8.60141
11	1	1	1	-999	7	422	3	4	1	9.77237
12	1	1	1	-999	7	423	3	4	1	6.24477
13	1	1	1	-999	7	421	3	5	1	6.25796
14	1	1	1	-999	7	422	3	5	1	6.25744
15	1	1	1	-999	7	423	3	5	1	6.25753
16	1	1	1	-999	7	421	3	6	1	6.25945
17	1	1	1	-999	7	422	3	6	1	6.25945
18	1	1	1	-999	7	423	3	6	1	6.2594
19	1	1	1	-999	7	421	3	7	1	6.25856
20	1	1	1	-999	7	422	3	7	1	6.25856
21	1	1	1	-999	7	423	3	7	1	6.25856
22	1	1	1	-999	7	421	3	8	1	6.25791
23	1	1	1	-999	7	422	3	8	1	6.25791
24	1	1	1	-999	7	423	3	8	1	6.25789
25	1	1	1	-999	7	421	3	9	1	6.25689
26	1	1	1	-999	7	422	3	9	1	12.7846
27	1	1	1	-999	7	423	3	9	1	6.25693
28	1	1	1	-999	7	421	3	10	1	9.03017
29	1	1	1	-999	7	422	3	10	1	8.44321

Figuur 5-2: Snapshot van de tabel “DesignBeta”

Naast de faalkansen per submechanisme per windrichting zijn ook de faalkansen na combineren van de mechanismen uit te lezen. Deze waarden kunnen worden afgelezen door in het veld boven “LevelTypeId” de waarde “=5” in te vullen. Per windrichting worden nu 2 faalbomen en bijbehorende faalkansen (uitgedrukt in beta) getoond:

- FaultTreeId = 1: de combinatie van GEBU-oploop en GEBU-klap
- FaultTreeId = 2: de combinatie van GEBU en GEKB (topgebeurtenis)

Indien een beta van de faalboom (nagenoeg) overeen komt met de laagste beta van de onderliggende mechanismen, dan treedt bij falen van dat mechanisme ook falen van het andere mechanisme op (volledige correlatie). Indien de beta ongelijk is aan de kleinste beta van de onderliggende mechanismen, dan treden de beide mechanismen (niet altijd) gelijktijdig op.

## 5.6 Inspectie ontwerp punt

Naast een controle van de convergentie en kansbijdrage wordt ook een controle van het ontwerp punt (de meest waarschijnlijke condities waarbij falen optreedt) aanbevolen. Hiervoor kan de tabel "DesignPointResults" in de file "1-output.sqlite" met behulp van "DB Browser for SQLite" geopend worden, zie Figuur 5-3.

In deze tabel wordt per windrichting en per mechanisme de waarde van een aantal uitvoer variabelen getoond, waarvan de onderstaande voor gebruik van de "plug-in" van belang zijn:

OutputVariableId	Naam	Eenheid
"2"	Lokale waterstand	"m+NAP"
"3"	Significante golfhoogte (Hs)	"m"
"7"	Spectrale golfperiode (Tm-1,0)	"s"
"8"	Hoek van golfinval	"°"
"854"	Niveau falen grasbekleding buitentalud door oploop	"m+NAP"
"856"	Niveau falen grasbekleding buitentalud door golfklap	"m+NAP"

Opgemerkt wordt dat de naamgeving voor OutputVariableId's 854 en 856 hard gecodeerd zijn met respectievelijk "Voorgescreven Pf door erosie" en "Overslagdebiet", waardoor in de tabel "OutputVariables" niet de juiste namen zijn opgenomen.

OuterIterationId	SectionId	LayerId	AlternativeId	SubMechanismId	PeriodId	WindDirectionId	JosingSituationId	OutputVariableId	Value	IsInterpolated
1	1	1	1	421	3	1	1	1	-0.000467086	NULL
2	1	1	1	421	3	1	1	2	2.62286	1
3	1	1	1	421	3	1	1	3	2.16195	1
4	1	1	1	421	3	1	1	7	4.37266	1
5	1	1	1	421	3	1	1	8	1.90937	1
6	1	1	1	422	3	1	1	1	-1.8469e-05	NULL
7	1	1	1	422	3	1	1	2	3.60002	1
8	1	1	1	422	3	1	1	3	2.3535	1
9	1	1	1	422	3	1	1	7	4.54539	1
10	1	1	1	422	3	1	1	8	1.1818	1
11	1	1	1	422	3	1	1	854	-999.0	NULL
12	1	1	1	423	3	1	1	1	0.124698	NULL
13	1	1	1	423	3	1	1	2	2.01937	1
14	1	1	1	423	3	1	1	3	1.91926	1
15	1	1	1	423	3	1	1	7	3.74263	1
16	1	1	1	423	3	1	1	8	0.929937	1
17	1	1	1	423	3	1	1	856	-999.0	NULL
18	1	1	1	423	3	1	1	857	1.3326	NULL
19	1	1	1	421	3	2	1	1	0.00142496	NULL
20	1	1	1	421	3	2	1	2	2.3911	1
21	1	1	1	421	3	2	1	3	2.37815	1
22	1	1	1	421	3	2	1	7	4.68402	1
23	1	1	1	421	3	2	1	8	7.09875	1
24	1	1	1	422	3	2	1	1	-0.00265035	NULL
25	1	1	1	422	3	2	1	2	3.60265	1
26	1	1	1	422	3	2	1	3	2.53056	1
27	1	1	1	422	3	2	1	7	4.82163	1
28	1	1	1	422	3	2	1	8	6.8049	1
29	1	1	1	422	3	2	1	854	-999.0	NULL

Figuur 5-3: Snapshot van de tabel "DesignPointResults"

## 5.7 Inspectie faalkansbijdragen stochasten

Tot slot kan ook de bijdrage van de stochasten aan de faalkans inzichtelijk worden gemaakt door de tabel "DesignAlpha" uit "1-output.sqlite" te openen met "DB Browser for SQLite". Door boven het veld "LevelTypeId" "=7" in te vullen wordt de relatieve kansbijdrage van de stochasten (uitgedrukt in invloedscoëfficiënt alpha) weergegeven per windrichting en per mechanisme. De koppeling tussen StochasticId en naam van de stochast kan gevonden worden in de tabel "Stochasts".

Op eenzelfde wijze kan de kansbijdrage per stochast na combineren worden verkregen door "=5" in te vullen boven het veld "LevelTypeId".



## 6 Consequenties voor GABI en GABU

Binnen de overstromingskansbenadering is het mogelijk om te schuiven met de faalkansbegroting. In het kader van dit project is een tool ontwikkeld waarbij de faalkansruimte van graserosie buitentalud (GEBU) en graserosie kruin en binnentalud (GEKB) wordt samengevoegd, om tot één probabilistisch ontwerp van de gehele grasbekleding te komen. Dit zal worden toegepast binnen de dijkversterking van de IJsselmeerdijk.

Binnen het WBI moet ook worden beoordeeld op sporen waarvoor geen (semi-)probabilistische veiligheidsfactoren zijn afgeleid. Gras Afschuiven Binnentalud en Buitentalud (GABI en GABU) zijn zulke mechanismen. De vraag is of de aannames en toepassingsvoorwaarden die ten grondslag liggen aan deze toetsregels voor GABI en GABU niet tot onveilige situaties leiden wanneer de faalkansruimte van GEBU en GEKB wordt samengevoegd.

### 6.1 Mogelijke gevolgen van samenvoegen faalkansruimte in het ontwerp

In de standaardfaalkansbegroting is voor GEKB 24% en voor GEBU 5% van de faalkansruimte ingeruimd. De lengte-effectfactoren zijn gelijk, maar in deze analyse verder niet van belang. Door het samenvoegen van de faalkansruimten van beide mechanismen ontstaat één gecombineerde faalkansruimte van 29%. Het is dus mogelijk dat zowel voor GEKB als voor GEBU minder strenge ontwerpcriteria hoeven te worden gehanteerd, zeker aangezien beide mechanismen behoorlijk gecorreleerd zijn voor dijktraject 8-3a. Tegelijkertijd is het niet aannemelijk dat voor GEKB de eisen veel soepeler zullen worden, aangezien hier de faalkansruimte slechts met ~20% toeneemt, wat in faalkansberekeningen een marginaal verschil is. In de praktijk zou het voornaamste verschil voor GEKB dus zijn dat er een marginaal hoger overslagdebiet kan worden toegelaten en dat er dus meer sprake is van infiltratie op het binnentalud wat de kans op afschuiven vergroot.

Voor GEBU kan dit iets anders liggen: één van de voornaamste motivaties om beide mechanismen samen te voegen is dat bij maatgevende situaties voor GEBU er vaak al significante overslag plaatsvindt en het criterium voor golfoverslag dus mogelijk ook al wordt overschreden. Daarnaast is de oorspronkelijke faalkansruimte voor GEBU een factor 6 kleiner dan de samengevoegde faalkansruimte nu. Dit kan er toe leiden dat de ontwerpcriteria voor GEBU aanzienlijk soepeler worden. Concreet zou dit drie gevolgen kunnen hebben:

- Er is een minder sterke graszode nodig om aan de eisen te voldoen,
- Er is minder reststerkte en daarmee een minder dikke onderliggende kleilaag nodig,
- De harde bekleding hoeft minder hoog op het talud te worden aangelegd waardoor de golfklapzone van het gras lager ligt .

In de volgende paragrafen werken we de potentiële gevolgen voor GABI en GABU verder uit.

### 6.2 Gevolgen voor gras afschuiven binnentalud (GABI)

In de situatie met een samengevoegde faalkansbegroting zal het overslagdebiet van de kering waarschijnlijk iets toenemen vanwege de minder strenge eis. Een beoordeling op GABI is nodig indien het overslagdebiet  $> 0.1$  l/m/s is, dat zal echter ook zonder samenvoegen waarschijnlijk het geval zijn.

De beoordelingsregels voor GABI zijn gegeven in Bijlage D van de Schematiseringshandleiding Grasbekleding (RWS, 2019). In Bijlage III van het WBI wordt

echter ook een groot aantal eenvoudige kenmerken gegeven op basis waarvan dit mechanisme geen rol speelt: het gaat dan om flauwe taluds, al dan niet gecombineerd met een stevige kleilaag en de aanwezigheid van drainage bij de binnenteen.

Binnen de beoordeling op GABI is het overslagdebiet geen specifieke parameter maar moet een freatische lijn geschematiseerd worden die recht doet aan de geohydraulische werking van de kering, inclusief de invloed van het overslagdebiet daarop. Omdat het verschil voor GEKB echter klein is, en daarmee het verschil in overslagdebiet ook, zal het effect op GABI beperkt zijn en wordt dat bovendien afgedekt wanneer in het ontwerp rekening wordt gehouden met de beoordeling voor het mechanisme GABI. Bij de IJsselmeerdijken is dat waarschijnlijk al geborgd door de aanwezigheid van drainage van de zandkern.

### 6.3 Gevolgen voor gras afschuiven buitentalud (GABU)

Het mechanisme GABU wordt beoordeeld aan de hand van de volgende formule (en een aantal toepassingsvoorwaarden, zie daarvoor RWS (2019)):

$$\frac{H_{m0}}{\Delta_g \cdot d_{\text{klei}} \cdot \cos \alpha} \leq 3$$

Waarbij  $H_{m0}$  de golfhoogte bij de norm is (berekend op basis van de marginale golfstatistiek),  $\Delta_g$  de relatieve dichtheid van de kleilaag,  $d_{\text{klei}}$  de dikte van de kleilaag en  $\alpha$  de taludhelling. Opgemerkt moet worden dat voor steenzettingen een vergelijkbaar criterium wordt gehanteerd voor afschuiven van de steenzetting (mechanisme ZAF).

Voor het buitentalud zijn drie mogelijke gevolgen van het samenvoegen van de faalkansruimtes benoemd. Ten eerste kan mogelijk een lagere zodekwaliteit ontstaan, echter uit bovenstaande formule blijkt dat de kwaliteit van de graszode geen rol speelt bij de beoordeling van de veiligheid voor GABU<sup>3</sup>. Ten tweede zou het kunnen voorkomen dat een minder dikke kleilaag nodig is. Hoewel het überhaupt de vraag is of dit een zinnig ontwerpcriterium is, kan dit direct worden meegenomen in bovenstaande regel. De derde factor van belang is het niveau van de overgang tussen harde en zachte bekleding. Deze kan mogelijk worden verlaagd wanneer er meer faalkansruimte voor GEBU beschikbaar is. In het geval van de IJsselmeerdijk is de belasting dusdanig ( $H_{m0} \approx 3$  m) dat de eisen aan GEBU, ongeacht de verruiming van de faalkansruimte, er niet toe zullen leiden dat gras in de golfklapzone kan worden toegepast. De overgang zal dus altijd boven de zone waar golfklap kan plaatsvinden moeten liggen. Dat maakt het mechanisme GABU dus in dit specifieke geval geen factor van betekenis.

Mocht dezelfde samenvoeging van faalkansruimte worden toegepast voor een kering waar sprake is van minder grote golfbelasting (zodanig dat gras voldoende sterkte biedt voor golfklap) dan kan daar nog het volgende van gezegd worden. In het geval dat er sprake is van kleinere golven is er waarschijnlijk ook sprake van zeer beperkte correlatie van waterstand en golven (bijv. een rivierdijk). In dat geval is het gebruik van de marginale golfhoogte in bovenstaande formule een zeer veilige keuze. Mocht er sprake zijn van gecorreleerde waterstand en golven met beperkte golfhoogte, dan kan het voorkomen dat gras in de golfklapzone voldoende sterkte biedt. De marginale golfhoogte is dan echter mogelijk lager dan de golfhoogte bij doorsnede-eis voor GEBU. In dat geval zou nader moeten worden beschouwd of het ontwerp op mechanisme GEBU ook voldoende veiligheid biedt voor GABU. Overigens is dat geen gevolg van het veranderen van de faalkansbegroting, maar überhaupt een gevolg van de opzet van de beoordelingsregel.

---

<sup>3</sup> In de fenomenologische beschrijving wordt wel geïmpliceerd dat treksterkte van de zode enige invloed kan hebben. Hierover is verder echter niets bekend.

## 6.4 Conclusie met betrekking tot GABI en GABU

Voor GABI geldt dat een veiligheidsbeoordeling wordt uitgevoerd op basis van de golfcondities in het illustratiepunt van overslag (GEKB). Daarom zijn er geen consequenties van het samenvoegen anders dan mogelijk iets andere invoer voor een beoordeling van GABI, mits dezelfde rekenregels gehanteerd blijven.

Voor GABU geldt dat voor de situaties van de IJsselmeerdijken een beoordeling van afschuiven niet van toepassing is omdat het gras enkel in de olopzone voldoende sterkte biedt, en dit mechanisme enkel op kan treden in de golfklapzone. Voor andere gevallen zijn er voor GABU geen specifieke aandachtspunten, die voortvloeien uit het samenvoegen van de faalkansruimte van GEBU en GEKB.

## 7 Conclusies en aanbevelingen

Waterschap Zuiderzeeland heeft een beoordeling uitgevoerd van de IJsselmeerdijken (normtraject 8-3a). Geconcludeerd is dat de overstromingskans groter is dan de ondergrenswaarde die in de wet is vastgelegd. De hoge overstromingskansen worden onder meer veroorzaakt door de kans op falen van de grasbekleding op de dijk (zowel op het buitentalud als op de kruin en het binnentalud).

Voor ontwerp en gedetailleerde beoordeling kan voor de beoordeling van de grasbekleding gebruik worden gemaakt van de gecombineerde kansruimte voor GEBU en GEKB (24% + 5% = 29%) indien de mechanismen GEBU en GEKB gecombineerd worden. Door per gebeurtenis te kijken naar zowel buitentalud als kruin en binnentalud wordt de hierboven geschetste discrepantie weggenomen: de gehele grasmat faalt op het buitentalud OF op de kruin/binnentalud. Deze rapportage beschrijft de ontwikkeling van een “plug-in” voor Hydra-Ring waarbij de drie genoemde mechanismen GEKB, GEBU-oploop en GEBU-golfklap gecombineerd kunnen worden.

De in dit project ontwikkelde “plug-in” maakt het mogelijk om in een probabilistische omgeving de gecombineerde kans van falen door de drie beschouwde mechanismen te bepalen. Hiervoor zijn de bestaande beschrijvingen van de faalmechanismen in aangepaste vorm geïmplementeerd. Waar mogelijk is deze implementatie vergeleken met bestaande implementaties. In gevallen waar dit niet mogelijk was, is een alternatieve vergelijking gemaakt.

De toepassing van de “plug-in” in het probabilistische model is uitgebreid geverifieerd door de resultaten in de genormaliseerde U-ruimte te beschouwen. Dit heeft voor het mechanisme GEBU-golfklap geleid tot het toevoegen van een gladde functie zodat ook met goedkopere rekentechnieken gerekend kan worden. De resulterende “plug-in” is vergeleken met de in de eerste fase van dit project gehanteerde Crude Monte Carlo analyse. Uit deze vergelijking (uitgevoerd met statistische en modelonzekerheden belastingen, maar met voornamelijk deterministische sterkte beschrijving) volgt dat ook met behulp van de “plug-in” een sterke correlatie tussen de mechanismen gevonden wordt, waardoor combineren van de mechanismen effect heeft.

Geconcludeerd wordt dat de ontwikkelde “plug-in” de faalmechanismen GEBU-klap, GEBU-oploop en GEKB op een juiste wijze combineert. De “plug-in” kan, bijvoorbeeld als onderdeel van een Toets op Maat, gebruikt worden voor het beoordelen en ontwerpen van grasbekleding als geheel. Hierbij kan veelal met de goedkope rekentechniek FORM gerekend worden. In sommige gevallen (indien FORM niet convergeert) is het noodzakelijk over te stappen op een duurdere rekentechniek (bijvoorbeeld Directional Sampling). Daarnaast wordt aanbevolen om na iedere berekening te verifiëren of sprake is van convergentie en of het zinnig is om over te stappen op Directional Sampling.

Specifiek voor de mechanismen GEBU-oploop en GEKB wordt nu als uitgangspunt de Rayleigh verdeling gehanteerd voor de beschrijving van de statistiek van de hoogte van individuele golfoploopgebeurtenissen. Mogelijk geldt voor ondiep water situaties een alternatieve statistische beschrijving (bv een samengestelde Weibull-verdeling). Hoewel analytische oplossingen daarvoor beschikbaar zijn, zijn deze nog niet geïmplementeerd in deze “plug-in”. Aanbevolen wordt om na te gaan of het zinvol is om deze aan de “plug-in” toe te voegen.

# Referenties

Deltares (2015a). Failure Mechanism Module Grass Wave Impact Zone Requirements and Functional Design. Deltares rapport 1220043-002-HYE-0025, final. J.P. de Waal en A. van Hoven. 1 oktober 2015.

Deltares (2015b). Failure mechanism module grass wave runup zone. Requirements and functional design. Deltares rapport 1220043-002-HYE-0004, versie 2. J.P. de Waal en A. van Hoven. 1 oktober 2015.

Deltares (2019a). Hydra-Ring, Technical Reference Manual. Deltares rapport 11203720-002-GEO-0014. Versie 5.0. April 2019.

Deltares (2019b). BOI Omgaan met overgangen bij faalmechanisme gras erosie kruin en binnentalud. Deltares rapport 11203720-025-GEO-0001, november 2019.

Deltares (2020). Toepassen cumulatieve overbelasting GEKB, Deltares memo 11205572-002-HYE-0002\_v0.1, A.J. Smale, Delft, 25 maart 2020.

RWS (2019). Schematiseringshandleiding grasbekleding WBI 2017, versie 4.0. 28 November 2019.



TAW (2002). Technisch Rapport Golfoploop en Golfoverslag bij Dijken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. Delft, mei 2002.

## A.Resultaat verkenning toegevoegde waarde bundelen GEBK en GEBU

## Memo

<b>Datum</b> 18 november 2020	<b>Ons kenmerk</b> 11206202-000-HYE-0001	<b>Aantal pagina's</b> 1 van 14
<b>Contactpersoon</b> Alfons Smale	<b>Doorkiesnummer</b> +31(0)88 335 8208	<b>E-mail</b> Alfons.Smale@deltares.nl

**Onderwerp**  
Verkenning toegevoegde waarde bundelen GEKB en GEBU

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Alfons Smale 	Han Knoeff 	Marcel van Gent 	

## 1 Inleiding

### 1.1 Achtergrond

Waterschap Zuiderzeeland heeft een beoordeling uitgevoerd van de IJsselmeerdijken (normtraject 8-3). Geconcludeerd is dat de overstromingskans groter is dan de ondergrenswaarde die in wet is vastgelegd. De hoge overstromingskansen worden onder meer veroorzaakt door de kans op falen van de grasbekleding op de dijk (zowel op het buitentalud als op kruin en binnentalud). Dit betekent dat er gewerkt gaat worden aan de versterkingsopgave voor deze dijk, met als eerstvolgende stap de verkenningfase.

Voor de beoordeling van de grasbekleding zijn - ten behoeve van de gedetailleerde toets op vak/mechanismeniveau - uit de norm op trajectniveau eisen op doorsnedeniveau afgeleid. Met een semi probabilistische analyse kan vervolgens worden gecontroleerd of aan deze eisen wordt voldaan. Voor de grasbekleding wordt daarbij onderscheid gemaakt tussen de mechanismen Gras Erosie Buitentalud (GEBU, grasbekleding in zowel golfklap als golfoploop) en Gras Erosie Kruin en Binnentalud (GEKB). Deze mechanismen worden onafhankelijk van elkaar beoordeeld, waarbij de kansbijdragen aan de totale faalkans van de dijk vooraf vastgelegd is in de faalkansbegroting, respectievelijk 5% en 24%. In een gedetailleerde toets op trajectniveau (niet ondersteund door het WBI) of Toets op Maat kan zonder of met een afwijkende kansverdeling worden gerekend.

Het vastleggen van de faalkansbegroting en loskoppelen van de beide mechanismen leidt soms tot bijzondere situaties. Zo wordt het gras juist aan de buitenzijde van de buitenkruinlijn met een factor 5 strengere eis beoordeeld ten opzichte van het gras aan de binnenzijde van de buitenkruinlijn, terwijl het gras door vergelijkbare gebeurtenissen wordt belast. Anders gezegd: bij de condities waarbij de grasbekleding op het buitentalud niet mag falen is de grasbekleding op de kruin mogelijk allang gefaald (en is reeds sprake van een doorbraak).

Vanuit het perspectief van de ontwikkeling van het beoordelingsinstrumentarium is te begrijpen waardoor deze situatie is ontstaan, maar met de kennis van nu is het mogelijk om dit anders in te vullen, namelijk door grasbekleding (op buitentalud EN kruin en binnentalud) als 1 mechanisme te beschouwen. Voor ontwerp en gedetailleerde beoordeling kan voor de beoordeling van de grasbekleding dan gebruik worden gemaakt van de gecombineerde kansruimte voor GEBU en GEKB (= 24% + 5% =29%). Door per gebeurtenis te kijken naar

zowel buitentalud als kruin en binnentalud wordt de hierboven geschetste discrepantie weggenomen: de gehele grasmat faalt op het buitentalud OF op de kruin/binnentalud. Hoewel het mogelijk is om ook de harde bekleding (met een eigen faalkansruimte van 5%) hierbij te betrekken, richt deze studie zich enkel op de grasbekleding.

## 1.2 Doelstelling

Dit project richt zich op de vraag of de mechanismen GEBU (golfklap en golfoploop) samengevoegd kunnen worden tot één mechanisme. Hiervoor wordt een stapsgewijze aanpak voorgesteld. In de eerste stap wordt de toegevoegde waarde van het combineren van faalkansruimte in beeld gebracht en in de tweede stap wordt een volledig probabilistische implementatie ontwikkeld. Dit memo beschrijft de eerste stap waarin de mechanismen GEBU en GEKB in een test-omgeving (Crude Monte Carlo) worden geïmplementeerd. Deze implementatie wordt vervolgens gebruikt om voor 3 doorsnedes de faalkans van de gecombineerde mechanismen vast te stellen en deze te vergelijken met de resultaten van de semi-probabilistische aanpak zoals in BOI wordt gebruikt. De vergelijking richt zich tenminste op de overall faalkans van de grasbekleding, maar ook op de (relatieve) bijdrage van de verschillende mechanismen.

Het doel van de vergelijking is om tot een advies te komen aangaande de toegevoegde waarde van de implementatie van de gecombineerde mechanismen in een probabilistische context. Hieruit volgt een advies voor het wel/niet implementeren van de gecombineerde mechanismen in een probabilistische omgeving.

## 2 Probabilistisch model

Voor deze studie wordt gebruik gemaakt van een Crude Monte Carlo analyse, omdat hierin eenvoudig sterktebeschrijvingen kunnen worden toegevoegd en gecombineerd zonder dat er problemen ontstaan met rekentechnieken. Feitelijk worden er kunstmatige tijdreeksen van belastingen gegenereerd, waarbij per tijdstap (gedefinieerd als een storm van 12 uur) de belastingen en sterkte met elkaar worden geconfronteerd. Hieruit volgt per tijdstap een Factor of Safety (FoS), waarbij sprake is van falen voor die tijdstappen waarvoor geldt dat  $FoS > 1$ . De totale kans op falen kan dan eenvoudig bepaald worden door het aantal tijdstippen met  $FoS > 1$  te "tellen".

Het gebruik van een Crude Monte Carlo analyse heeft een beperking ten aanzien van de te beschouwen herhalingsstijd, het aantal trekkingen (lengte van de tijdreeks) is gelimiteerd. Voor deze studie maken we gebruik van 10 miljoen trekkingen voor de zogenaamde snelle stochast (wind, met een rekenwaarde voor de duur van 12 uur) per windrichting (16 richtingen). Dit zijn in totaal 160 miljoen trekkingen, waarmee de meest extreme trekking een herhalingsstijd heeft van orde eens per 450.000 jaar. Vanwege het beperkt aantal trekkingen moeten de resultaten met een herhalingsstijd van tussen de eens per 50.000 jaar en 450.000 met zorg geïnterpreteerd worden.

Het gebruik van de Crude Monte Carlo heeft als voordeel dat het samenspel van de trage stochast (meerpeil, met een rekenwaarde voor de duur van 720 uur) en de snelle stochast (wind, met een rekenwaarde voor de duur van 12 uur) eenvoudiger en realistischer beschreven kan worden. Dit kan door eenvoudig 60 trekkingen van de wind te combineren met 1 trekking van het meerpeil (dat een trapeziumverloop heeft).

In de Hydra's (Hydra-Ring en Hydra-NL) wordt het samenspel van wind en meerpeil omwille van rekentijd benaderd. Het gevolg is dat met name in gebieden/voor mechanismen waarvoor het samenspel van belang is (meerpeil en wind ongeveer even belangrijk) de resultaten van de Crude Monte Carlo analyse zullen afwijken van de resultaten van de Hydra's. Verwacht



wordt dat dit voor de in de validatie beschouwde locaties en mechanismen niet significant zal zijn omdat de belastingen primair wind-gedreven zijn.

## 2.1 Belastingen

De belastingen die gebruikt worden in de Crude Monte Carlo aanpak zijn bepaald met behulp van Hydra-Ring (het probabilistisch rekenhart van Riskeer). Hiermee wordt geborgd dat de juiste basisstochasten worden gebruikt. Daarnaast wordt eveneens gebruik gemaakt van dezelfde databases fysica welke de vertaling van basisstochasten (in dit geval meerpeil, windsnelheid en windrichting) naar lokale belastingen (waterstand en golfcondities) verzorgen.

Voor de hier beschouwde locaties, niveau huidige overgang naar grasbekleding en condities zal de faalkans van de grasmat gedomineerd worden door golfoverslag en golfploop en niet door golfklap. In het merengebied geldt dat als gevolg van de relatief hoge golven veelal een bekleding noodzakelijk is in de golfklapzone. De overgang van harde naar zachte bekleding wordt dan gedomineerd door het niveau waarop de grasbekleding in de golfploopzone voldoet. Daarmee is golfploop het dominante mechanisme voor het buitentalud. Voor golfoverslag en golfploop zijn de condities op het moment van de piek van de storm dominant. Voor deze verkennende analyse wordt dan ook geen rekening gehouden met het stormverloop, anders dan dat de piek van het verloop 4 uur duurt.

## 2.2 Sterktebeschrijvingen

### 2.2.1 GEKB-overloop

Het falen van de grasbekleding op de kruin en het binnentalud kan op twee wijzen beschreven worden: (i) op basis van een tijdsgemiddeld kritiek overslagdebiet ( $q_{crit,d}$ ) of (ii) op basis van een cumulatie van overschrijding van een kritieke stroomsnelheid. Voor het beoordelen met het WBI wordt nu (ii) gebruikt (via een benadering), maar in de verkenningsfase van dit HWBP project wordt door het waterschap nog gewerkt met (i). Om aansluiting te hebben/houden met de verkenningsfase wordt in dit memo van (i) uitgegaan. Mocht het besluit genomen worden om over te gaan op een implementatie in Hydra-Ring, dan wordt overgestapt op (ii). Vanwege het feit dat de onderhavige studie vooral gaat over de relatieve bijdrage van de verschillende mechanismen wordt verwacht dat de vereenvoudigde beschrijving van het mechanisme GEKB via (i) geen significante impact heeft op de conclusies.

De berekening van het optredende overslagdebiet is conform TAW (2002), vergelijking 3a en 3b. Falen treedt op als  $FoS > 1$ , waarbij  $FoS$  is gedefinieerd als:

$$FoS = \frac{q}{q_{crit,d}} \quad (2.1)$$

Hierin is  $q$  het optredende overslagdebiet volgens TAW (2002) gegeven de waterstand en golfcondities behorende bij de beschouwde storm en  $q_{crit,d}$  het kritieke overslagdebiet. Ten behoeve van de aansluiting op de verkenning wordt voor  $q_{crit,d}$  een waarde van 10 l/s/m gehanteerd.

### 2.2.2 GEBU-golfklap

Het falen van de grasbekleding op het buitentalud als gevolg van golfklap wordt bepaald conform Deltares (2015a). Hierbij wordt voor niveaus ( $z$ ) in de golfklapzone ( $h - 0.5H_{m0} < z < h$ ) per storm/tijdstip de  $FoS$  wordt bepaald door:

$$FoS = \frac{T_{storm}}{\max\left(\frac{1}{b} \ln\left(\frac{H_{m0} - c}{a}\right); 0\right)} \quad (2.2)$$

Hierin is  $T_{storm}$  de duur van de storm (in deze studie 12 uur),  $H_{m0}$  is de optredende golfhoogte en  $a$ ,  $b$  en  $c$  zijn de sterkte eigenschappen van de grasmat. In deze studie wordt uitgegaan van een gesloten grasmat, waarvoor geldt:  $a = 1$ ,  $b = -0.035$  en  $c = 0.25$ . Buiten de golfklapzone geldt  $FoS = 0$ .

Opgemerkt wordt dat verwacht wordt dat GEBU-golfklap een zeer beperkte bijdrage zal hebben op de faalkans omdat het niveau van de overgang van harde naar zachte bekleding ver boven de golfklapzone zal liggen.

### 2.2.3 GEBU-oploop

Het falen van de grasbekleding op het buitentalud als gevolg van golfoploop wordt bepaald conform Deltares (2015b). Hierbij wordt voor niveaus ( $z$ ) in de golfoploopzone ( $z > h$ ) per storm de  $FoS$  wordt bepaald door:

$$FoS = \frac{\sum_{i=1}^N \max(\alpha_{M,z} U_{i,z}^2 - \alpha_{S,z} U_c^2; 0)}{D_{crit}} \quad (2.3)$$

Hierin wordt voor  $N$  golfoploop gebeurtenissen de stroomsnelheid op niveau  $z$  bepaald middels:

$$U_{i,z} = c_u \sqrt{g \cdot Ru_i} \cdot \max\left(0; \min\left(1; \frac{Ru_i - z}{0.25 \cdot Ru_i}\right)\right) \quad (2.4)$$

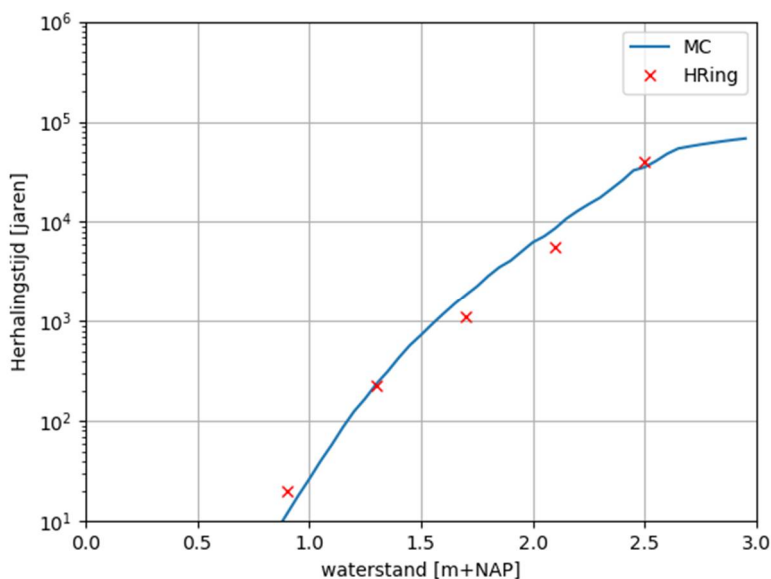
$$Ru_i = Ru_{2\%} \cdot \sqrt{\frac{\ln\left(1 - \frac{i}{N+1}\right)}{\ln(0.02)}} \quad (2.5)$$

Hierin zijn verder:  $\alpha_{M,z}$  en  $\alpha_{S,z}$  invloedscoëfficiënten voor overgangen (in deze studie gelijk gezet aan 1.0 [-]),  $c_u$  een constante met waarde 1.1 [-],  $U_c$  kritieke stroomsnelheid (gesloten zode  $U_c = 6.6$ ) en  $D_{crit}$  de kritieke cumulatieve belasting van 7000 [ $m^2/s^2$ ].

## 2.3 Validatie

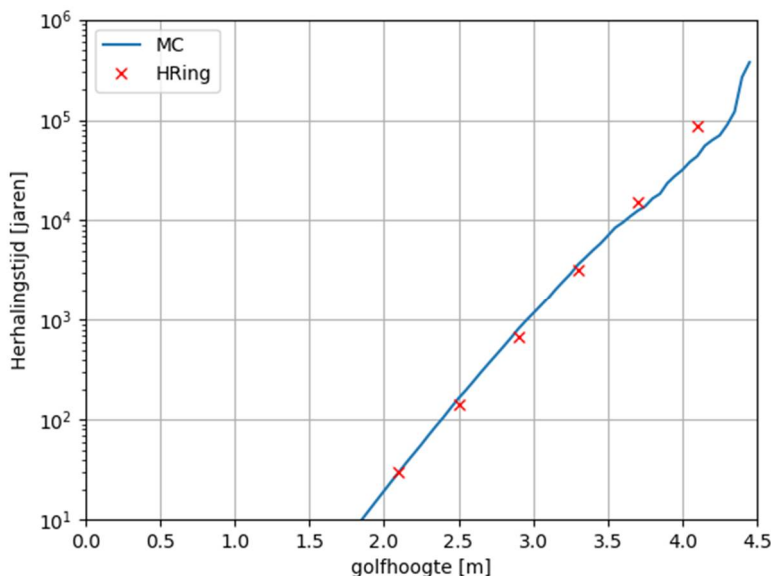
De Crude Monte Carlo analyse is gevalideerd met resultaten van Hydra's (Hydra-Ring en/of Hydra-NL). In deze sectie worden de overschrijdingscurves van waterstand, golfhoogte, overslagdebiet en 2% golfploophoogte vergeleken met de Hydra's (ofwel Hydra-Ring ofwel Hydra-NL, afhankelijk van de uitvoermogelijkheden van deze modellen). De vergelijking wordt uitgevoerd voor Hydra-locatie 700101 (YM\_2\_8-3a\_dk\_00557), gelegen halverwege tussen de Maxima-Centrale en de Ketelbrug.

Figuur 1 toont de berekende overschrijdingscurve van de waterstand (dus het gevolg van zowel meerpeilstatistiek als windopzet). Te zien is dat de resultaten zeer vergelijkbaar zijn. De overschrijdingscurve volgens de Crude Monte Carlo analyse vakt nabij een herhalingsjijd van  $10^5$  jaren af, wat veroorzaakt wordt door het beperkte aantal trekking (10 miljoen per windrichting). Bij de analyse van de resultaten dient hier rekening mee te worden gehouden.



Figuur 1 Overschrijdingscurve van de waterstand voor locatie 700101. Blauwe lijn'-': resultaat Crude Monte Carlo, 'x': resultaat volgens Hydra-Ring

Figuur 2 toont de overschrijdingscurve van de golfhoogte voor locatie 700101. Ook voor de golfhoogte zijn de resultaten van de Crude Monte Carlo en Hydra-Ring zeer vergelijkbaar. In tegenstelling tot de waterstand schiet de overschrijdingscurve volgens de Crude Monte Carlo analyse omhoog bij herhalingstijden van orde  $10^5$  jaar; dit is eveneens het gevolg van het beperkte aantal samples (10 miljoen per windrichting). Bij de analyse van de resultaten dient hier rekening mee te worden gehouden.



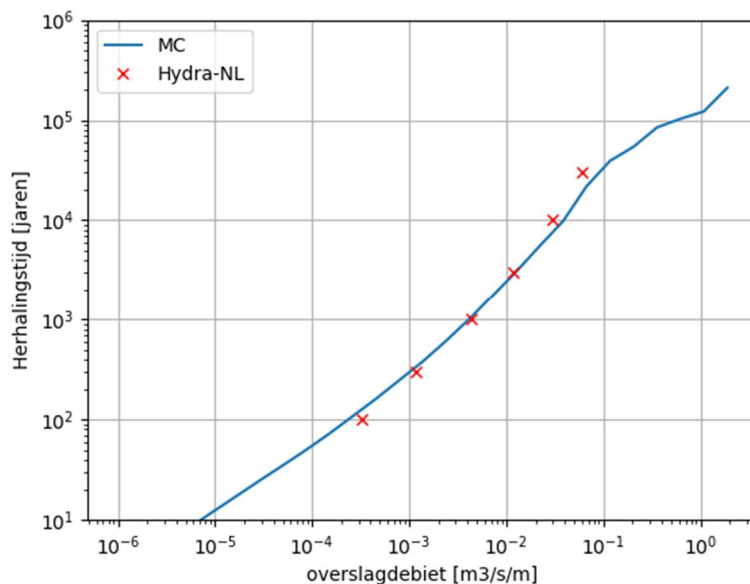
Figuur 2 Overschrijdingscurve van de golfhoogte voor locatie 700101. Blauwe lijn'-': resultaat Crude Monte Carlo, 'x': resultaat volgens Hydra-Ring

In Figuur 3 is een vergelijking gemaakt tussen de overschrijdingscurve van de overslagdebieten volgens de Crude Monte Carlo analyse en Hydra-NL. Voor deze analyse is gebruik gemaakt van het door het waterschap aangeleverde profiel. Het profiel is gecorrigeerd aan de teen van de dijk, vanwege een verschil tussen TAW (2002) en de in de Hydra's gehanteerde overslagformulering. De correctie van het profiel maakt dat de analyse in deze studie in absolute zin conservatief is ten opzichte van de Hydra's, maar voor de hier beoogde relatieve analyse heeft dit geen significant effect omdat het een relatieve studie betreft. Te

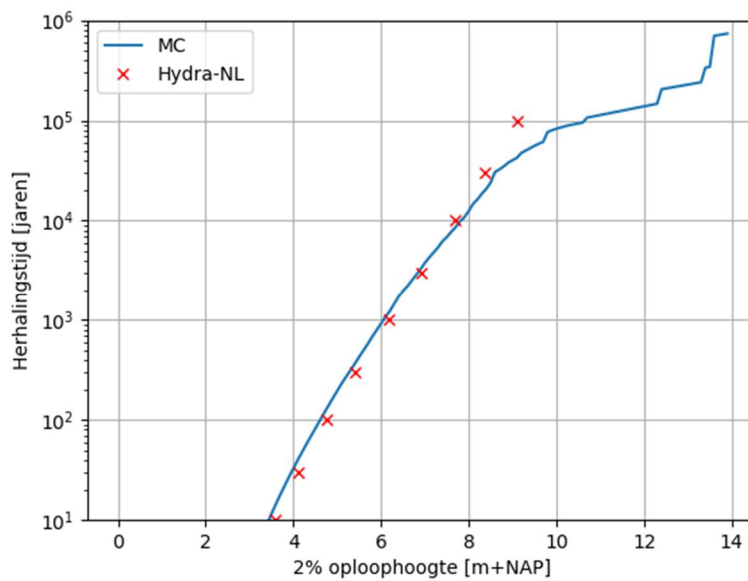
zien is dat de met de Crude Monte Carlo berekende overschrijdingscurve goed overeen komt met Hydra-NL. Omdat Hydra-NL geen uitvoer geeft voor overslagdebieten groter dan 100 l/s/m kan niet worden vastgesteld of de overschrijdingscurve volgens de Crude Monte Carlo teveel afvlakt, maar verwacht wordt dat dit het geval is. Hier dient bij de analyse van de resultaten rekening mee te worden gehouden.

De overschrijdingscurve van de 2% golfploophoogte is vergeleken in Figuur 4. Net als voor de voorgaande vergelijkingen geldt dat er een goede overeenkomst is tussen Crude Monte Carlo en Hydra-NL tot een herhalingstijd van orde  $10^5$  jaar. Voor grotere herhalingstijden geldt dat, net als voor de waterstand en het overslagdebiet sprake is van een te sterke afvlakking van de overschrijdingscurve volgens de Crude Monte Carlo analyse.

Al met al kan gesteld worden dat de resultaten van de validatie laten zien dat het Crude Monte Carlo tot een herhalingstijd van  $10^5$  jaar goed overeenkomen met de resultaten van de Hydra's. Voor grotere herhalingstijden geldt dat bij de analyse rekening dient te worden gehouden met een te sterke afvlakking van de overschrijdingscurve in de Crude Monte Carlo analyse.



Figuur 3 Overschrijdingscurve van overslagdebiet voor locatie 700101. Blauwe lijn'-': resultaat Crude Monte Carlo, 'x': resultaat volgens Hydra-NL

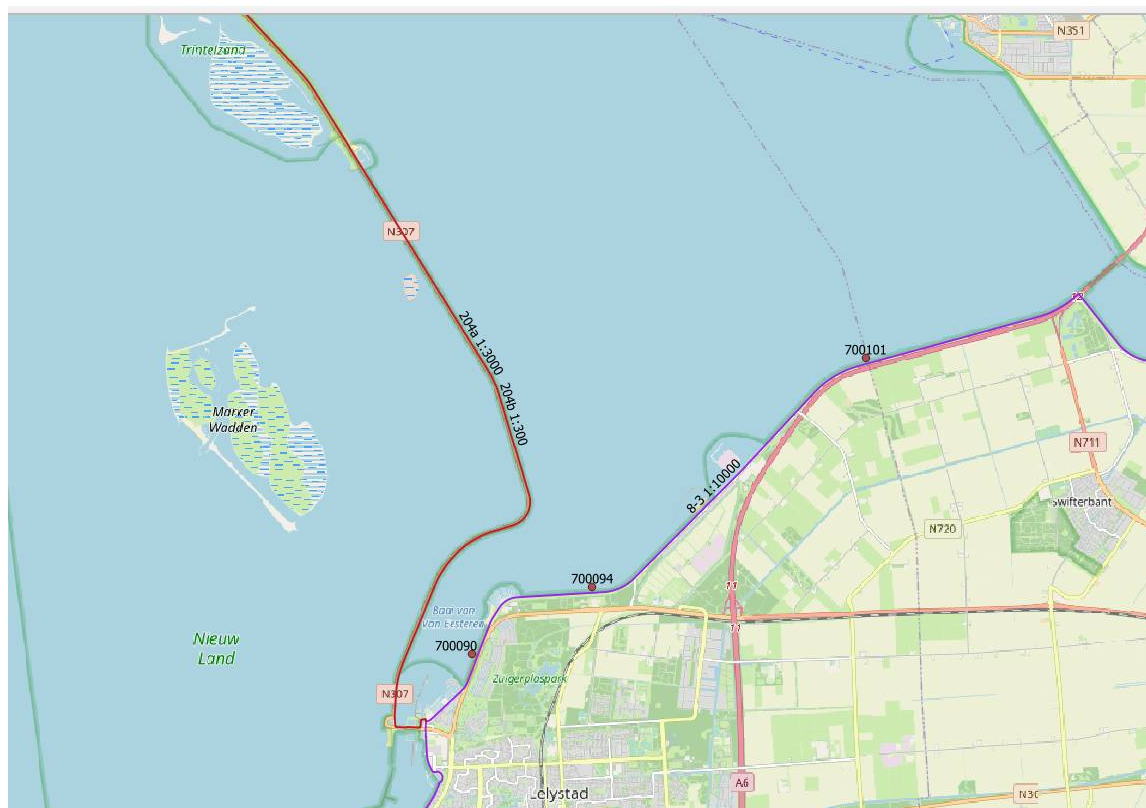


Figuur 4 Overschrijdingscurve van de 2% oploophoogte voor locatie 700101. Blauwe lijn'-: resultaat Crude Monte Carlo, 'x': resultaat volgens Hydra-NL

### 3 Resultaten Crude Monte Carlo analyse

#### 3.1 Beschouwde locaties en profielen

In overleg met waterschap Zuiderzeeland zijn drie locaties geselecteerd waarvoor de Crude Monte Carlo analyse wordt toegepast. Het betreft de locaties getoond in Figuur 5. Hierbij is locatie 700101 de locatie met de hoogste golfcondities en locatie 700090 de locatie met de laagste golfcondities. Het waterschap heeft voor deze drie locaties de gehanteerde dwarsprofielen beschikbaar gesteld. Voor deze studie zijn de dwarsprofielen vertaald naar kenmerkende getallen welke als input dienen voor de Crude Monte Carlo analyse. Tabel 1 geeft de gehanteerde kenmerkende getallen.



Figuur 5 Beschouwde locaties in deze studie

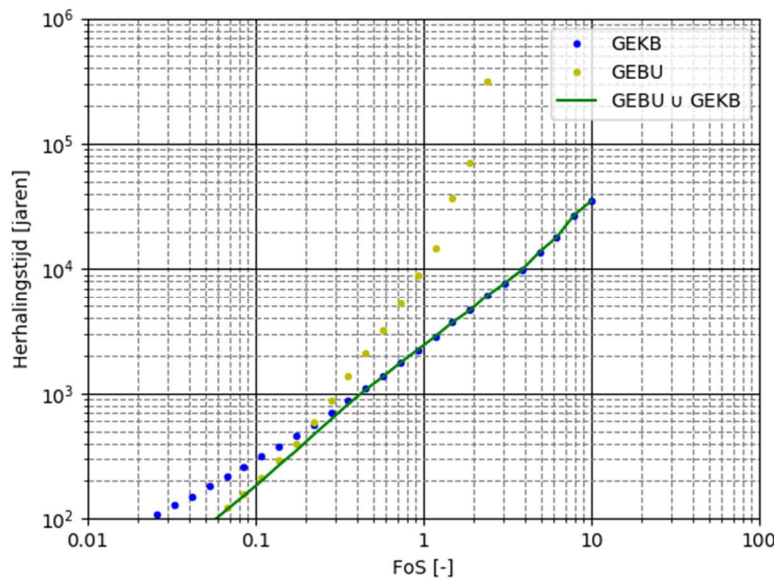
Kenmerk	Locatie 700101	Locatie 700094	Locatie 700090
Oriëntatie [°N]	345	355	295
Kruinhoogte [m+NAP]	5.1	5.0	3.6
Taludhelling [-]	0.333	0.333	0.333
Niveau berm [m+NAP]	1.92	1.82	1.82
Lengte berm [m]	7.0	7.0	7.0
Overgang gras [m+NAP]	3.4	3.4	1.82

Tabel 1 Kenmerken dwarsprofielen

### 3.2 Locatie 700101

Met behulp van de Crude Monte Carlo analyse kan de kans op falen van de grasmat op het buitentalud (GEBU) en de kans op falen van de grasmat op kruin en binnentalud worden bepaald (GEKB). Figuur 6 toont de berekende overschrijdingscurves van de FoS voor alleen GEKB (blauw), alleen GEBU (geel) en de combinatie GEKB  $\cup$  GEBU (groen).

Te zien is dat falen van de grasmat ( $FoS > 1$ ) voor GEBU (geel) optreedt met een herhalingsstijd van  $1 \cdot 10^4$  jaar, terwijl falen van de grasmat voor GEKB (blauw) met een herhalingsstijd van  $2.4 \cdot 10^3$  jaar voorkomt. De faalkans van de grasmat door GEKB  $\cup$  GEBU wordt daarmee gedomineerd door de faalkans behorende bij GEKB, zoals ook terug te zien in de overschrijdingscurve van de FoS (groene lijn).



Figuur 6 Overschrijdingscurve van FoS locatie 700101. Blauw: GEKB, geel: GEBU, groen: GEKB ∪ GEBU

Met de Crude Monte Carlo analyse wordt de faalkans van de grasmat gereconstrueerd volgens:

$$P(FoS_{gras} > 1)_{MC} = P(FoS_{GEBU} > 1) + P(FoS_{GEKB} > 1) - P(FoS_{GEBU} > 1 \cap Fos_{GEKB} > 1) \quad (3.1)$$

De vraag is nu hoe dit zich verhoudt tot de gehanteerde aanpak bij het beoordelen (BOI). In het BOI worden de mechanismen GEBU en GEKB afzonderlijk beschouwd waarbij deze volledig ongecorrleerd worden beschouwd. De gecombineerde faalkans wordt verkregen door de afzonderlijke bijdragen bij elkaar op te tellen:

$$P(FoS_{gras} > 1)_{BOI} = P(FoS_{GEBU} > 1) + P(FoS_{GEKB} > 1) = \omega_{GEBU} P(FoS_{gras} > 1) + \omega_{GEKB} P(FoS_{gras} > 1) \quad (3.2)$$

Voor beide mechanismen wordt daarnaast in BOI voor ontwerpverificaties een eigen faalkansruimte gereserveerd, respectievelijk 5% voor GEBU en 24% voor GEKB. Deze faalkansruimte leidt tot bovenmatig strenge eisen wanneer de verhouding tussen de  $P(FoS_{GEBU})$  en  $P(FoS_{GEKB})$  veel groter of kleiner is dan 5.

De bovengenoemde verschillen in aanpak voor bepaling van  $P(FoS_{gras} > 1)$  kunnen worden geanalyseerd door de verschillende componenten te vergelijken. Tabel 2 toont de overschrijdingskansen behorende bij de verschillen termen in vergelijkingen (3.1) en (3.2).

Uit de tabel valt op te maken dat de overschrijdingskans van het tegelijkertijd falen van de grasmat door GEBU en GEKB gelijk is aan de overschrijdingskans van alleen falen door GEBU. Dit betekent dat voor de beschouwde situatie GEBU altijd tegelijkertijd optreedt met GEKB (maar niet andersom). Het negeren van het tegelijkertijd optreden van beide mechanismen is voor dit geval dan ook niet terecht. Dit impliceert voor deze locatie een sterke bijna volledige correlatie en daarmee dat (in de limiet met volledige correlatie) aan beide mechanismen een faalkansruimte van  $24\% + 5\% = 29\%$  toegekend zou kunnen worden.

$P(FoS_{GEKB} > 1)$	$4.13 \cdot 10^{-4}$
$P(FoS_{GEBU} > 1)$	$9.46 \cdot 10^{-5}$
$P(FoS_{GEBU} > 1 \cap Fos_{GEKB} > 1)$	$9.46 \cdot 10^{-5}$
$P(FoS_{gras})_{BOI}$	$5.08 \cdot 10^{-4}$
$P(FoS_{gras})_{MC}$	$4.13 \cdot 10^{-4}$

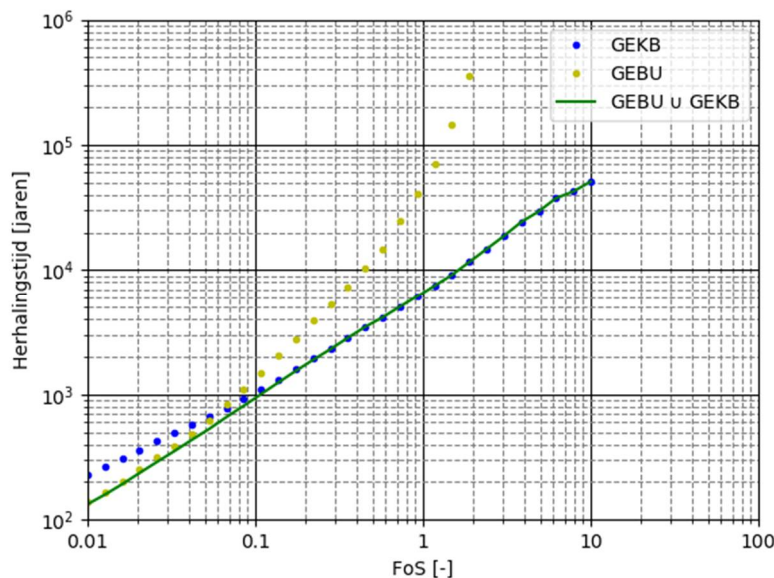
Tabel 2 Overschrijdingskansen FoS voor verschillende combinaties van mechanismen, locatie 700101

Voor deze locatie geldt dat de BOI aanpak (geen correlatie tussen mechanismen) tot een overschatting van de faalkans leidt van orde 23%. Dit geldt overigens voor de hier beschouwde combinatie van kruinhoogte,  $q_{crit,d}$ , berm afmetingen en niveau van de overgang naar grasbekleding. De waarden van deze parameters bepaalt immers de faalkans per mechanisme en daarmee de verhouding tussen de mechanismen en daarmee het verschil tussen de Crude Monte Carlo aanpak en de BOI aanpak.

### 3.3 Locatie 700094

De Crude Monte Carlo analyse is herhaald voor locatie 700094. Ten opzicht van locatie 700101 geldt een beperktere golfaanval vanwege de afscherpende werking van de nabij gelegen Houtribdijk. Echter, de locatie is onbeschermd voor golven uit noordelijke richting en lijkt daarom relatief veel op locatie 700101.

Figuur 7 toont de met de Crude Monte Carlo berekende overschrijdingscurves van de FoS voor GEKB, GEBU en de combinatie van beiden. In Tabel 3 zijn de bijbehorende overschrijdingskansen van een FoS waarde groter dan 1 gepresenteerd.



Figuur 7 Overschrijdingscurve van FoS locatie 700094. Blauw: GEKB, geel: GEBU, groen: GEKB ∪ GEBU

Net als voor locatie 700101 geldt ook hier dat het mechanisme GEKB veruit de grootste bijdrage heeft aan de faalkans van de grasmat. Daarnaast is, niet geheel verrassend, de kans van het tegelijkertijd falen van GEBU en GEKB gelijk aan de kans falen door GEBU. Dit impliceert dat ook voor deze locatie het negeren van de term  $P(FoS_{GEBU} > 1 \cap Fos_{GEKB} > 1)$ ,



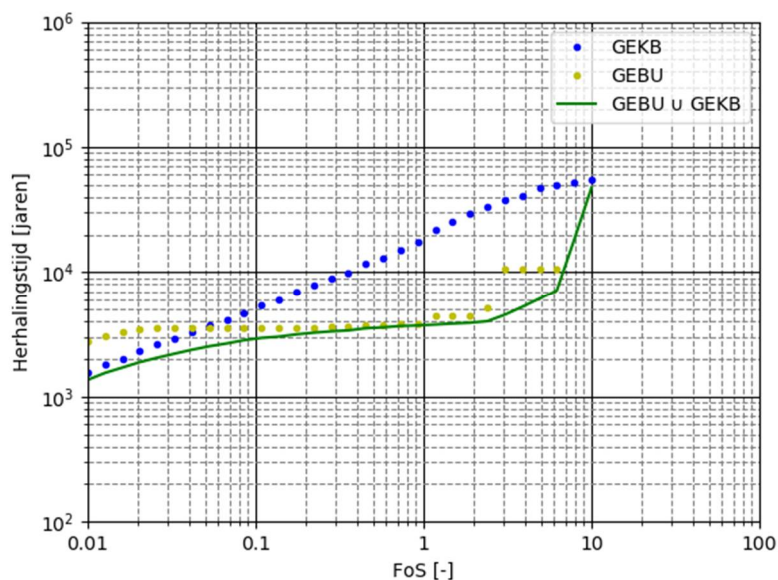
ofwel het aannemen van geen correlatie, niet terecht is. Dit leidt tot een overschatting van de faalkans door BOI (aanname van geen correlatie) met orde 14%, net als voor locatie 700101 (en bijbehorende profielgegevens).

$P(FoS_{GEKB} > 1)$	$1.53 \cdot 10^{-4}$
$P(FoS_{GEBU} > 1)$	$2.06 \cdot 10^{-5}$
$P(FoS_{GEBU} > 1 \cap Fos_{GEKB} > 1)$	$2.06 \cdot 10^{-5}$
$P(FoS_{gras})_{BOI}$	$1.74 \cdot 10^{-4}$
$P(FoS_{gras})_{MC}$	$1.53 \cdot 10^{-4}$

Tabel 3 Overschrijdingskansen FoS voor verschillende combinaties van mechanismen, locatie 700094

### 3.4 Locatie 700090

De berekeningen zijn tot slot ook uitgevoerd voor locatie 700090, welke veel meer afgeschermd is van golfaanval dan de twee andere locaties. Voor deze locatie geldt dat de het mechanisme GEBU de faalkans van de grasmat bepaald, zie Figuur 8. Daarnaast geldt voor deze locatie dat het falen van de grasmat op de kruin en het binnentalud (GEKB) vaak gelijktijdig optreedt met het falen van de grasmat op de buitentalud (GEBU), zie Tabel 4. Dit leidt wederom tot een overschatting van de faalkans als de BOI-kansverdeling gehanteerd wordt. Uiteraard geldt dit alleen voor de beschouwde combinatie van kruinhoogte, kritiek overslagdebiet en het niveau van de hoogte overgang grasbekleding. Zodra deze eigenschappen veranderen, dan verandert ook de verhouding tussen beide mechanismen.



Figuur 8 Overschrijdingscurve van FoS locatie 700090. Blauw: GEKB, geel: GEBU, groen: GEKB ∪ GEBU

$P(FoS_{GEKB} > 1)$	$5.29 \cdot 10^{-5}$
$P(FoS_{GEBU} > 1)$	$2.49 \cdot 10^{-4}$
$P(FoS_{GEBU} > 1 \cap Fos_{GEKB} > 1)$	$3.39 \cdot 10^{-5}$
$P(FoS_{gras})_{BOI}$	$3.01 \cdot 10^{-4}$
$P(FoS_{gras})_{MC}$	$2.68 \cdot 10^{-4}$

Tabel 4 Overschrijdingskansen FoS voor verschillende combinaties van mechanismen, locatie 700090

## 4 Gevoeligheidsanalyse

Uit de toepassing van de Crude Monte Carlo in combinatie met de huidige profiel schematisaties volgt dat de in BOI gehanteerde faalkans begroting en de onderliggende aanname van niet gelijktijdig optreden van falen door GEBU en GEKB niet passen bij deze situatie. De vraag rijst dan wat de impact op het ontwerp is wanneer een andere faalkansbegroting wordt gehanteerd. Om dit in beeld te brengen is voor locatie 700101 een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarbij het dijprofiel is versterkt voor de beschouwde mechanismen GEBU en GEKB.

De volgende versterkingen zijn beschouwd:

- Kruinverhoging met 1.5 meter
- Kruinverhoging met 2.5 meter
- Versterking grasmat kruin en binnentalud zodat geldt:  $q_{crit,d} = 50$  l/s/m
- Versterking buitentalud door optrekken harde bekleding met 1.5 meter

Tabel 5 toont een samenvatting van de resultaten van de gevoeligheidsanalyse. De tabel laat zien dat versterking van de kruin (kruinverhoging of verhoging  $q_{crit,d} = 50$  l/s/m ertoe leidt dat de totale faalkans van de grasmat (GEKB en GEBU) afneemt. Dit volgt logischer wijs uit het feit dat zonder deze versterkingen GEKB het dominante mechanisme was.

De bijdrage van alleen GEKB aan de totale faalkans van de grasmat neemt bij versterking GEKB af van 77% naar orde 10% of minder. Als gevolg hiervan neemt de bijdrage van het mechanisme GEBU toe en wordt het mechanisme dat de totale faalkans domineert.

Beschouwd vanuit de faalkansbegroting neemt GEBU dan bijna 100% van de faalkansruimte voor de grasmat (ofwel 24% van de totale overstromingskans) in beslag in plaats van de voorgeschreven 5%.

Uit de tabel is ook af te leiden dat een versterking van het buitentalud door het hoger optrekken van de harde bekleding tot een verdere toename van de dominantie van het mechanisme GEKB leidt: GEKB neemt bijna 100% van de faalkansruimte voor de grasmat in beslag.

Verder valt op dat in bijna alle gevallen de kans dat GEBK en GEBU tegelijkertijd falen substantieel is. Dit is niet verwonderlijk, omdat dat beide mechanismen optreden bij zware golfaanval, welke als gevolg van de correlatie tussen opzet en hoge golven voor beide mechanismen tegelijkertijd optreedt. De aanname van onafhankelijke gebeurtenissen voor GEBU en GEKB is dan ook niet correct voor dit dijvak.

Variatie	Geen	$h_k + 1.5m$	$h_k + 2.5m$	$q_{crit,d} = 50 l/s/m$	Hoovergang +1.5m
$P(FoS_{GEKB} > 1)$	$4.13 \cdot 10^{-4}$	$5.78 \cdot 10^{-5}$	$2.13 \cdot 10^{-5}$	$7.09 \cdot 10^{-5}$	$4.13 \cdot 10^{-4}$
$P(FoS_{GEBU} > 1)$	$9.46 \cdot 10^{-5}$	$9.46 \cdot 10^{-5}$	$9.46 \cdot 10^{-5}$	$9.46 \cdot 10^{-5}$	$7.55 \cdot 10^{-5}$
$P(FoS_{GEBU} > 1 \cap Fos_{GEKB} > 1)$	$9.5 \cdot 10^{-5}$	$5.50 \cdot 10^{-5}$	$2.13 \cdot 10^{-5}$	$5.97 \cdot 10^{-5}$	$7.63 \cdot 10^{-5}$
$P(FoS_{gras})_{MC}$	$4.13 \cdot 10^{-4}$	$9.76 \cdot 10^{-5}$	$9.49 \cdot 10^{-5}$	$1.06 \cdot 10^{-4}$	$4.13 \cdot 10^{-4}$
% falen alleen GEKB	77%	3%	0%	11%	82%
% falen alleen GEBU	0%	41%	78%	33%	0%
% falen GEKB EN GEBU	23%	56%	22%	56%	18%

Tabel 5 Resultaten gevoeligheidsanalyse locatie 700101

## 5 Conclusies een aanbevelingen

In deze verkennende studie is gekeken naar het effect van het samenvoegen van de mechanismen GEBU en GEKB om te komen tot een faalkans van de totale grasmat. De resultaten van de studie laten zien dat falen door GEKB en GEBU vaak sterk gecorreleerd is. Deze correlatie wordt in het BOI niet meegenomen en leidt daarmee tot overschatting van de overstromingskans. De huidige vaste faalkansbegroting leidt daarnaast vaak tot te strenge eisen (doorsnede-eis op vak niveau) en dientengevolge te robuuste ontwerpen.

De in BOI gehanteerde eisen (faalkansbegroting voor GEKB en GEBU van respectievelijk 24% en 5%) is onder meer tot stand gekomen op basis van VNK-resultaten in combinatie met de impliciete aanname dat deze mechanismen niet of zeer beperkt gecorreleerd zijn. Onder de aanname van het ontbreken van correlatie zou de faalkansruimte ook anders verdeeld mogen worden, mits de som gelijk blijft aan 29%. Het andere uiterste is een volledige correlatie tussen beide mechanismen. In dat geval treden mechanismen tegelijkertijd op en zou voor beide mechanismen een faalkansruimte van 29% gebruikt kunnen worden. Dit heeft het grootste effect op het mechanisme GEBU, omdat dat mechanisme dan van 5% naar 29% kansruimte verschuift. Dit betekent een versoepeling van de eis met een factor 6 (voor dit dijktraject gaat de eis dan van 1/600.000 jaar naar 1/103.000 jaar).

De resultaten van deze analyse laten zien dat er sprake is van sterke maar niet volledige correlatie. Dit betekent dat bovenstaande hoekpunten (wel/niet gecorreleerd) niet gebruikt kunnen worden voor ontwerpen: de voor dit dijkvak relevante correlatie valt hier tussenin (neigt nadrukkelijk meer naar volledig gecorreleerd, maar is dat niet). De bevindingen zijn gebaseerd op herhalingstijden welke lager zijn dan de herhalingstijd behorende bij de norm/doorsnede-eis. Verwacht wordt dat de gevonden correlatie tussen GEBU en GEKB (zeker voor het traject ten noorden van de Maxima centrale) ook gevonden gaat worden bij hogere herhalingstijden omdat de achterliggende belastingen voor GEBU en GEKB op dezelfde wijze blijven bijdragen. Hierdoor zijn de conclusies zeer waarschijnlijk ook van toepassing op grotere herhalingstijden behorende bij de norm/doorsnede-eis.

Om te komen tot een ontwerp dat zeker veilig is zou gerekend kunnen worden met de situatie van geen correlatie (en daarmee de huidige faalkansruimte). Dit levert echter een onnodig robuust ontwerp op omdat de kans op gelijktijdig falen/correlatie tussen mechanismen wordt genegeerd. Indien GEBU en GEKB als 1 mechanisme worden beschouwd, dan kan in het

ontwerp gespeeld worden met de sterkte per mechanisme, wat leidt tot een bepaalde faalkansbijdrage met inachtneming van de correlatie tussen mechanismen.

Voor het ontwerp van GEKB heeft dit waarschijnlijk een beperkt effect omdat de winst slechts 5% kansruimte is (24% -> 29%, effectief een factor 1.2 soepelere eis). Voor GEBU is grotere winst te behalen (5% -> 29%). De daadwerkelijke winst hangt sterk af van de ontwerpkeuzes die gemaakt worden, maar de gevoeligheidsanalyse laat zien dat deze winst in de range van een factor 3-6 soepeler eis ligt. Opgemerkt wordt dat er eigenlijk niet meer gesproken kan worden over een doorsnede-eis per mechanisme omdat de mechanismen in samenhang worden beschouwd en samen aan 29% kansruimte moeten voldoen.

Indien een versoepeling van de faalkanseis voor GEBU met een factor 3 tot 6 voldoende impact heeft op de ontwerpogave, dan wordt aanbevolen om bij het ontwerp gebruik te maken van de mogelijkheid om het gezamenlijk optreden van GEBU en GEKB in rekening te brengen via een probabilistische omgeving. De genoemde versoepeling van de eis voor GEBU met een factor 3 tot 6 heeft effect op de te hanteren waterstanden en golfhoogtes. Dit effect bedraagt circa een halve decimeringshoogte (circa 0.4 meter waterstand en circa 0.5 meter golfhoogte). Als de hoogte van de overgang van de bekleding benaderd kan worden door de waterstand plus 1 maal de golfhoogte, dan betekent dit een reductie van de hoogte van de overgang met orde  $0.4+0.5=0.9$  meter.

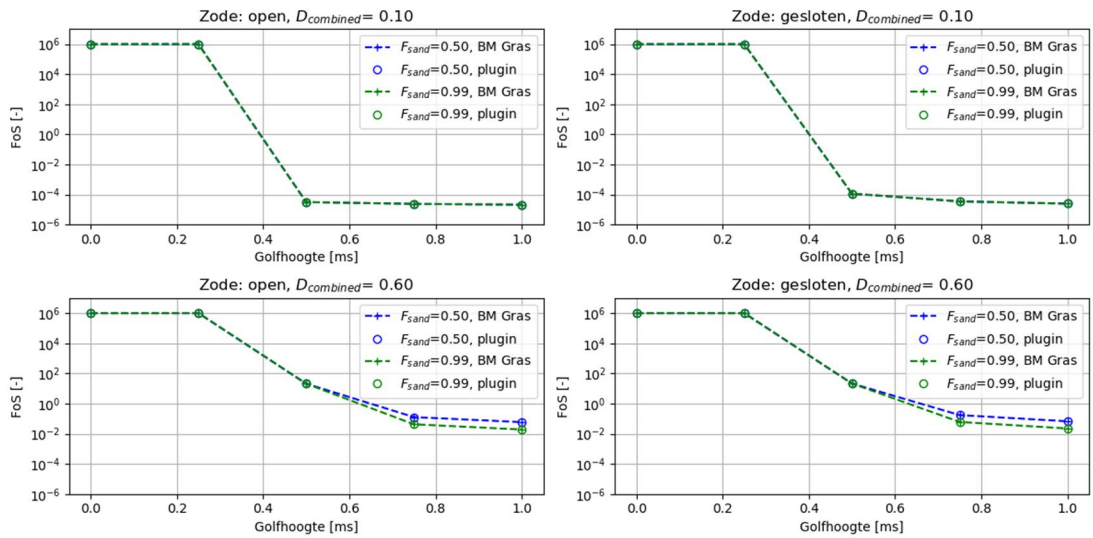
## Referenties

Deltares (2015a). Failure Mechanism Module Grass Wave Impact Zone Requirements and Functional Design. Deltares rapport 1220043-002-HYE-0025, final. J.P. de Waal en A. van Hoven. 1 oktober 2015

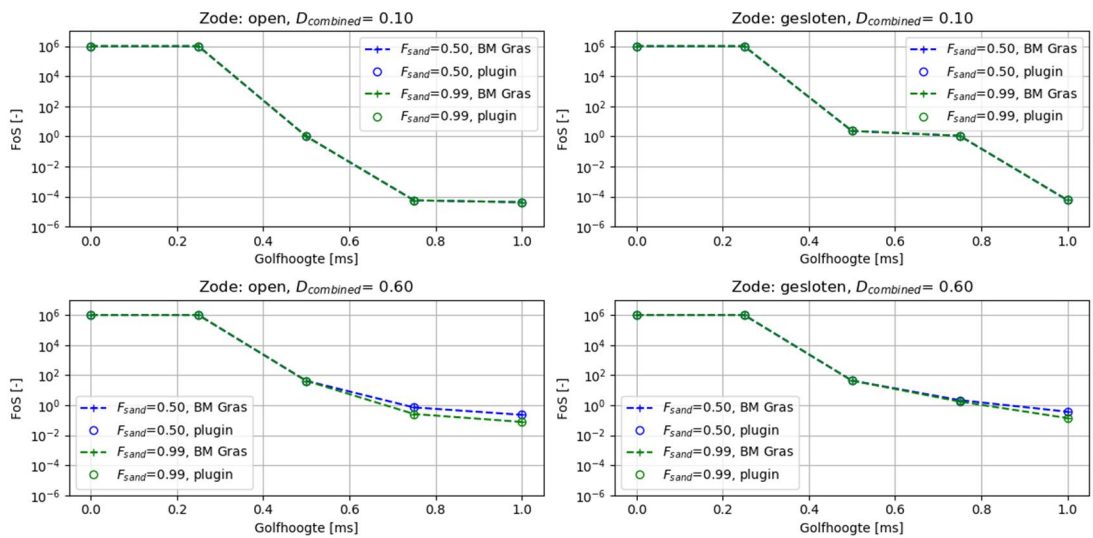
Deltares (2015b). Failure mechanism module grass wave runup zone. Requirements and functional design. Deltares rapport 1220043-002-HYE-0004, versie 2. J.P. de Waal en A. van Hoven. 1 oktober 2015.

TAW (2002). Technisch Rapport golfoploop en golfoverslag bij Dijken. Technische Adviescommissie voor de waterkeringen, Delft, mei 2002.

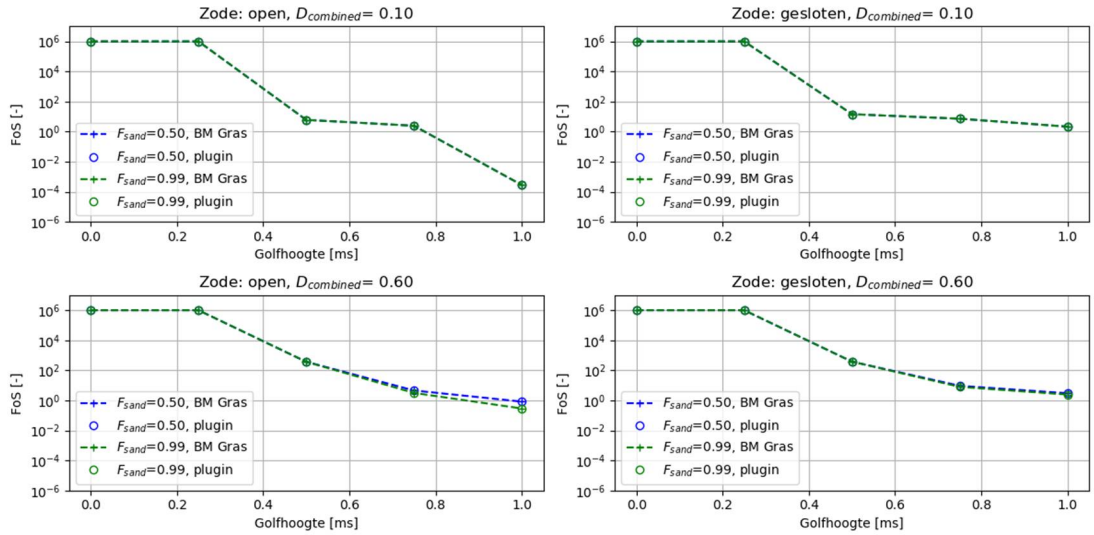
## B. Validatie GEBU-klap



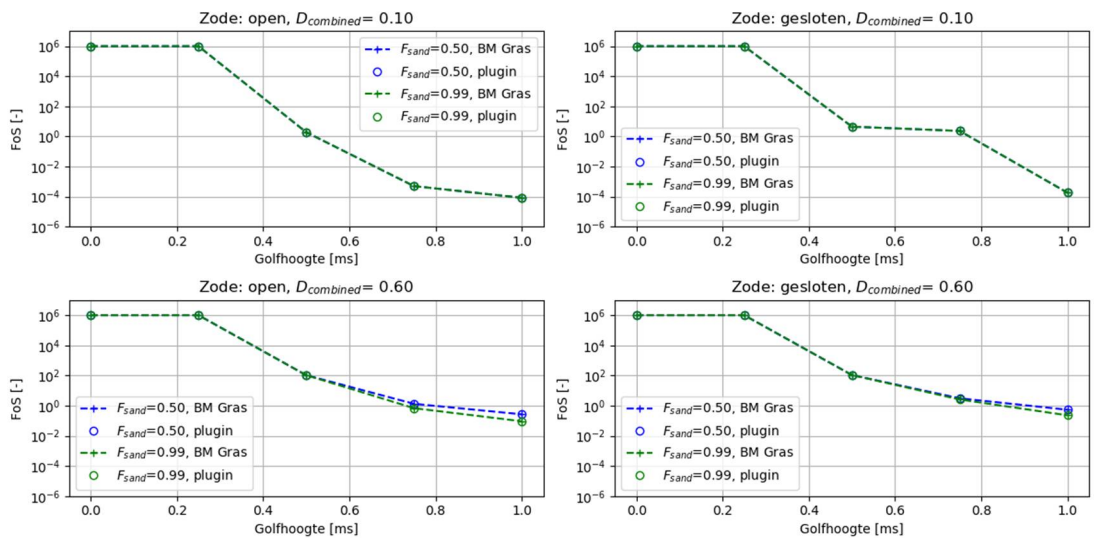
Figuur B-1: Validatie implementatie GEBU-klap, reekstype = 0. Links: open zode, rechts gesloten zode. Boven:  $D_{combined}=0.1$ , onder:  $D_{combined}=0.6$ . Blauw:  $F_{sand}=0.5$ , groen:  $F_{sand}=0.9$ . ‘+’: resultaat BM Gras, ‘o’: resultaat “plug-in”.



Figuur B-2: Validatie implementatie GEBU-klap, reekstype = 1. Links: open zode, rechts gesloten zode. Boven:  $D_{combined}=0.1$ , onder:  $D_{combined}=0.6$ . Blauw:  $F_{sand}=0.5$ , groen:  $F_{sand}=0.9$ . ‘+’: resultaat BM Gras, ‘o’: resultaat “plug-in”.

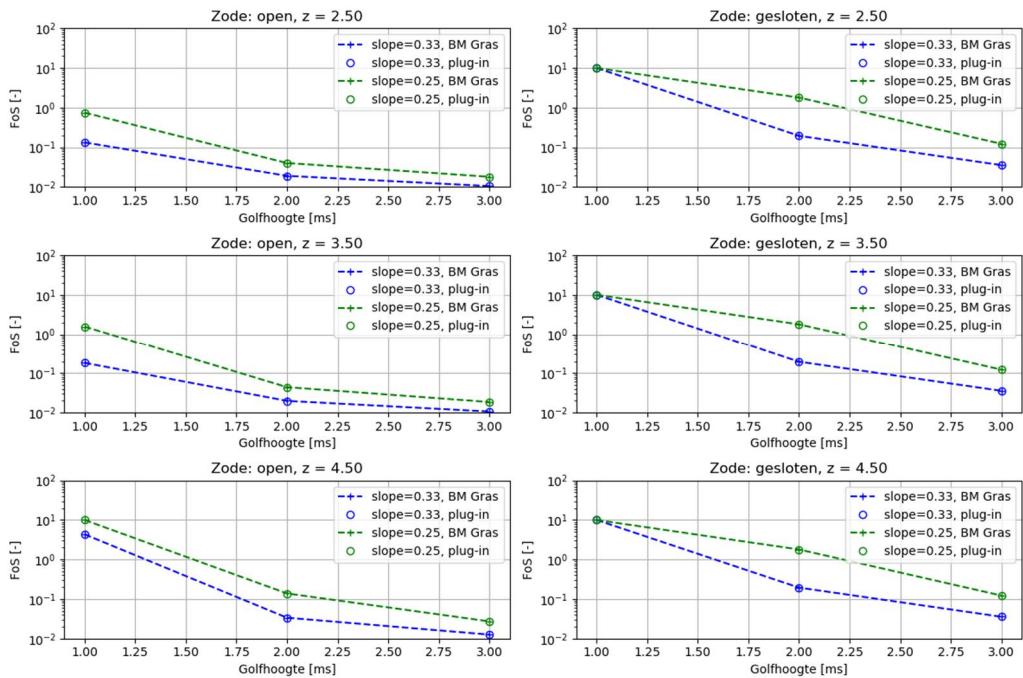


Figuur B-3: Validatie implementatie GEBU-klap, reekstype = 2. Links: open zode, rechts gesloten zode. Boven:  $D_{combined}=0.1$ , onder:  $D_{combined}=0.6$ . Blauw:  $F_{sand}=0.5$ , groen:  $F_{sand}=0.9$ . '+-': resultaat BM Gras, 'o': resultaat "plug-in".

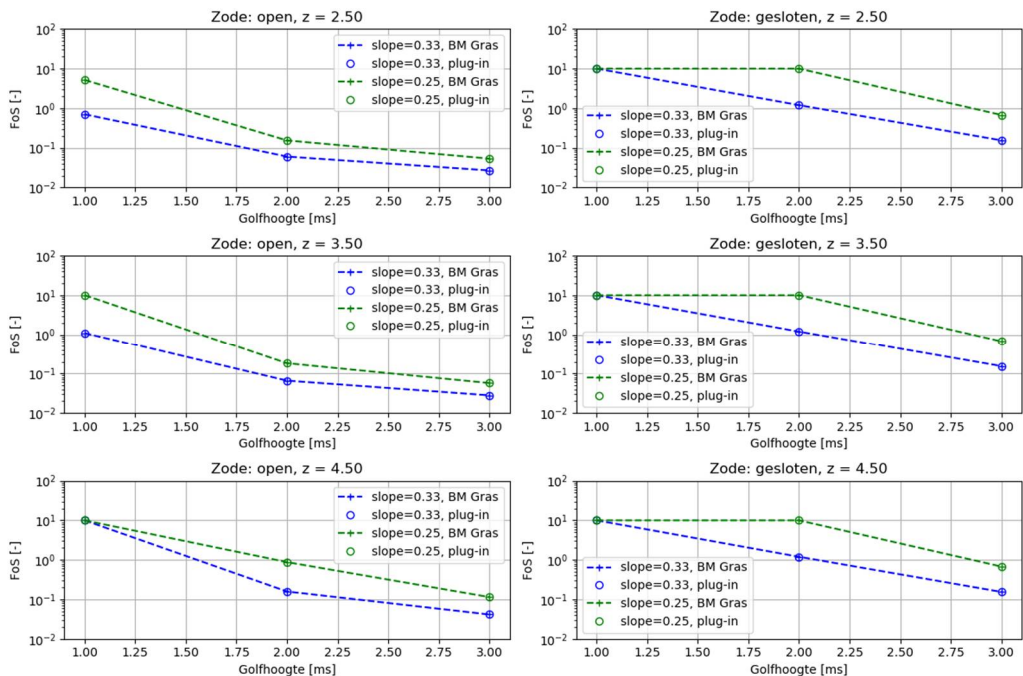


Figuur B-4: Validatie implementatie GEBU-klap, reekstype = 3. Links: open zode, rechts gesloten zode. Boven:  $D_{combined}=0.1$ , onder:  $D_{combined}=0.6$ . Blauw:  $F_{sand}=0.5$ , groen:  $F_{sand}=0.9$ . '+-': resultaat BM Gras, 'o': resultaat "plug-in".

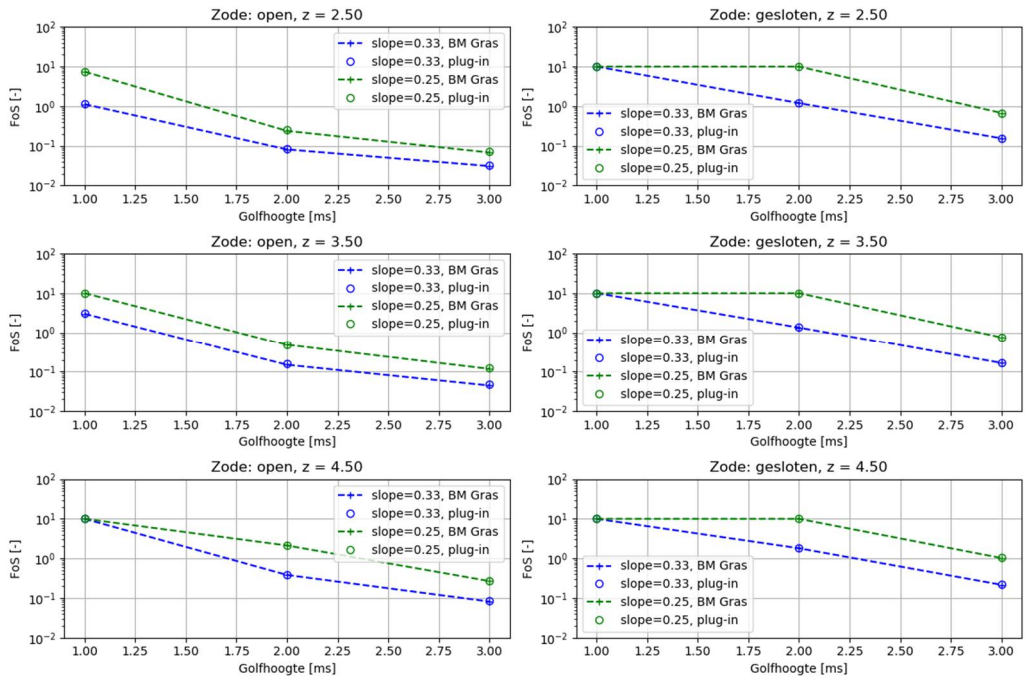
# C. Validatie GEBU-oploop



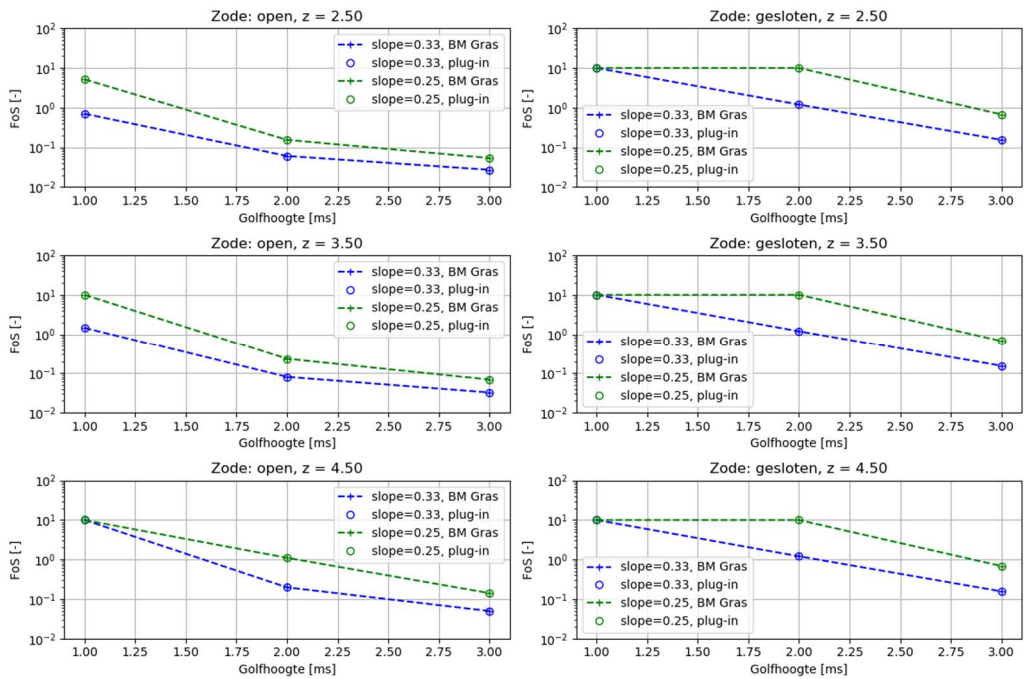
Figuur C-1: Validatie implementatie GEBU-oploop, reekstype = 0. Links: open zode, rechts gesloten zode. Boven:  $z = 2.50$  [m+NAP], midden:  $z = 3.5$  pm+NAP], onder:  $z = 4.5$  [m+NAP]. Blauw:  $\tan\alpha = 0.33$  Groen:  $\tan\alpha = 0.25$ . '+-': resultaat BM Gras, 'o': resultaat "plug-in".



Figuur C-2: Validatie implementatie GEBU-oploop, reekstype = 1. Links: open zode, rechts gesloten zode. Boven:  $z = 2.50$  [m+NAP], midden:  $z = 3.5$  pm+NAP], onder:  $z = 4.5$  [m+NAP]. Blauw:  $\tan\alpha = 0.33$  Groen:  $\tan\alpha = 0.25$ . '+-': resultaat BM Gras, 'o': resultaat "plug-in".



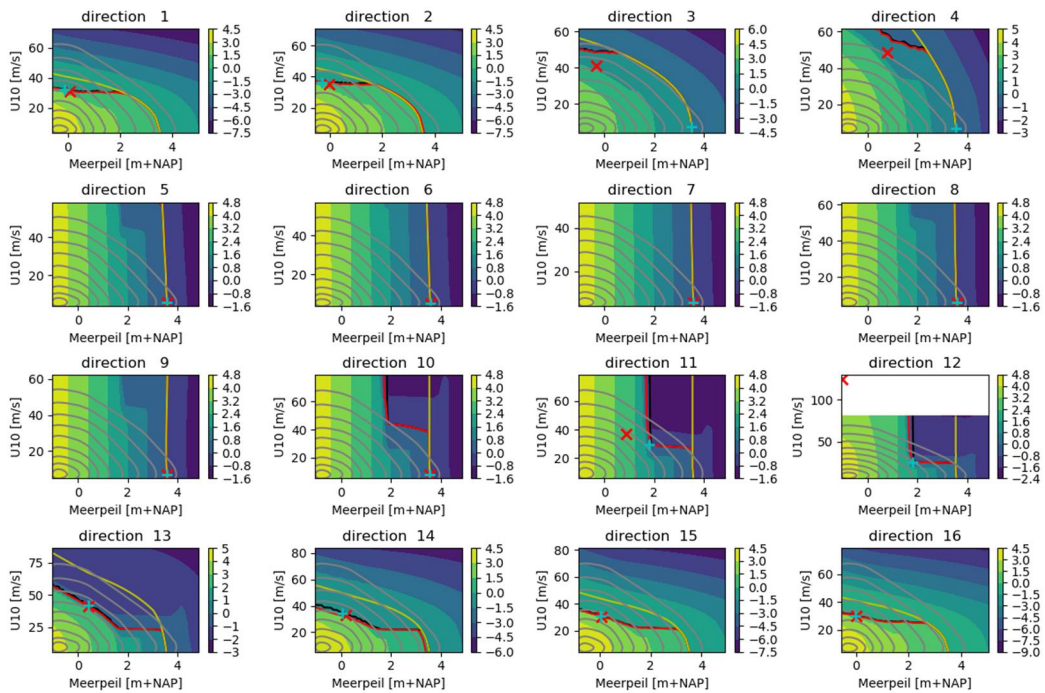
Figur C-3: Validatie implementatie GEBU-oploop, reekstype = 2. Links: open zode, rechts gesloten zode. Boven:  $z = 2.50$  [m+NAP], midden:  $z = 3.5$  pm+NAP], onder:  $z = 4.5$  [m+NAP]. Blauw:  $\tan\alpha = 0.33$  Groen:  $\tan\alpha = 0.25$ . '+-': resultaat BM Gras, 'o': resultaat "plug-in".



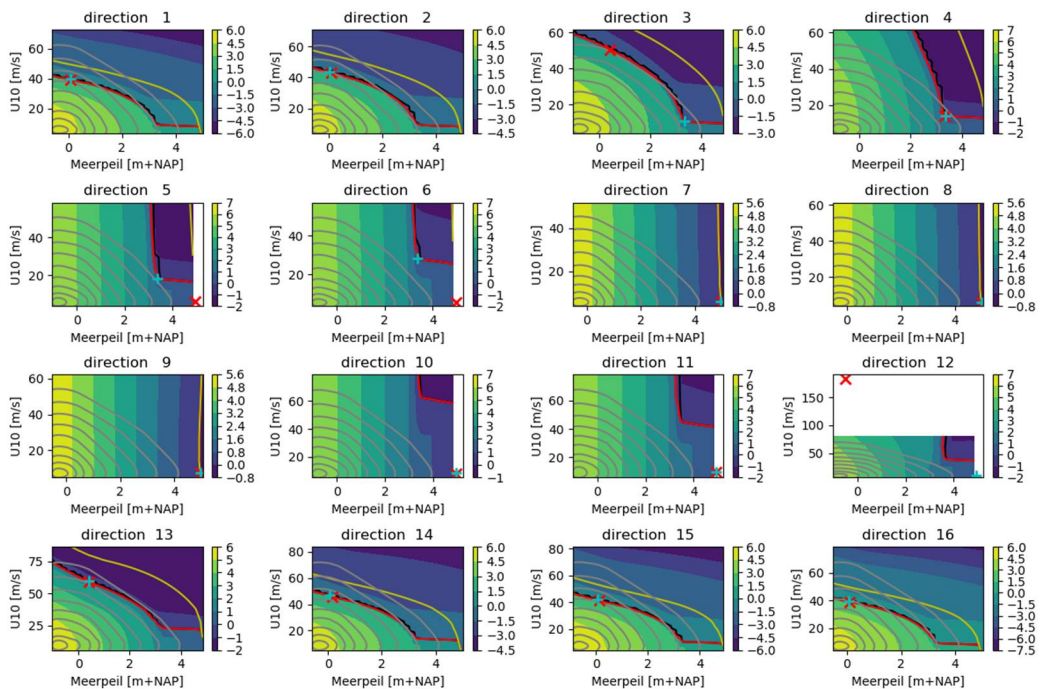
Figur C-4: Validatie implementatie GEBU-oploop, reekstype = 3. Links: open zode, rechts gesloten zode. Boven:  $z = 2.50$  [m+NAP], midden:  $z = 3.5$  pm+NAP], onder:  $z = 4.5$  [m+NAP]. Blauw:  $\tan\alpha = 0.33$  Groen:  $\tan\alpha = 0.25$ . '+-': resultaat BM Gras, 'o': resultaat "plug-in".



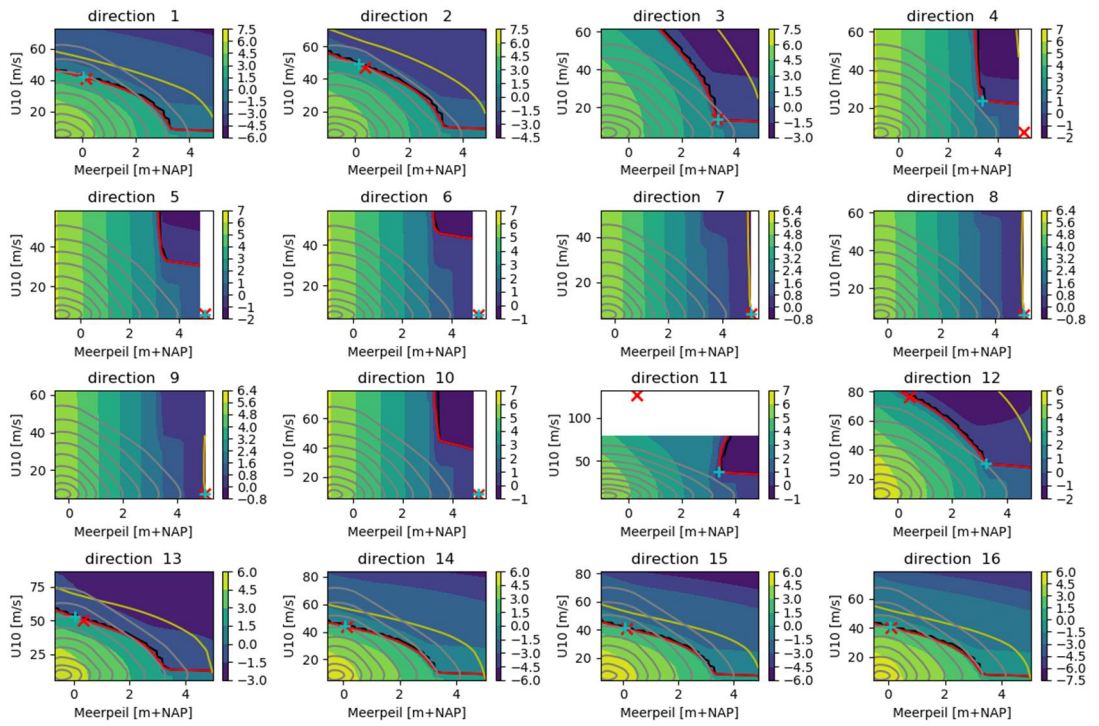
## D. Controle U-ruimte GEBU-klap



Figuur D-1: GEBU-golfklap, locatie 700090, kleurencontour: Z-waarde als functie van meerpeil en windsnelheid, grijze contourlijnen: Lijnen met gelijke afstand tot (0,0) in de U-ruimte (1 tot en met 10), rode lijn: Z=0 functie, zwarte lijn: Z=0 functie ongecorrigeerd faalmechanisme, gele lijn: overloop.

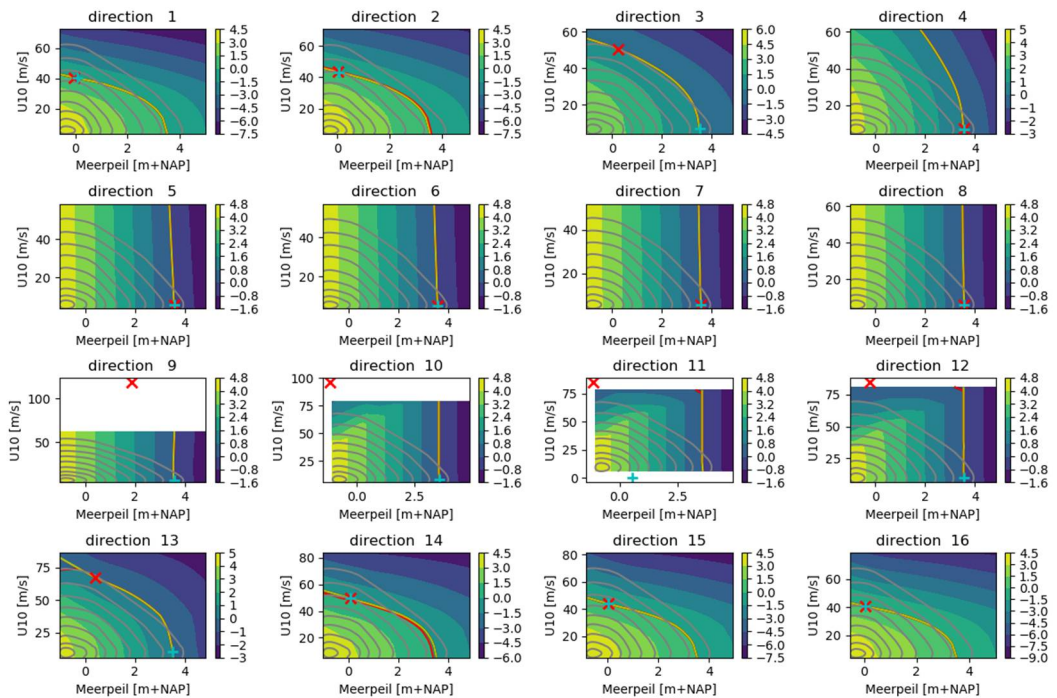


Figuur D-2: GEBU-golfklap, locatie 700094, kleurencontour: Z-waarde als functie van meerpeil en windsnelheid, grijze contourlijnen: Lijnen met gelijke afstand tot (0,0) in de U-ruimte (1 tot en met 10), rode lijn: Z=0 functie, zwarte lijn: Z=0 functie ongecorrigeerd faalmechanisme, gele lijn: overloop.

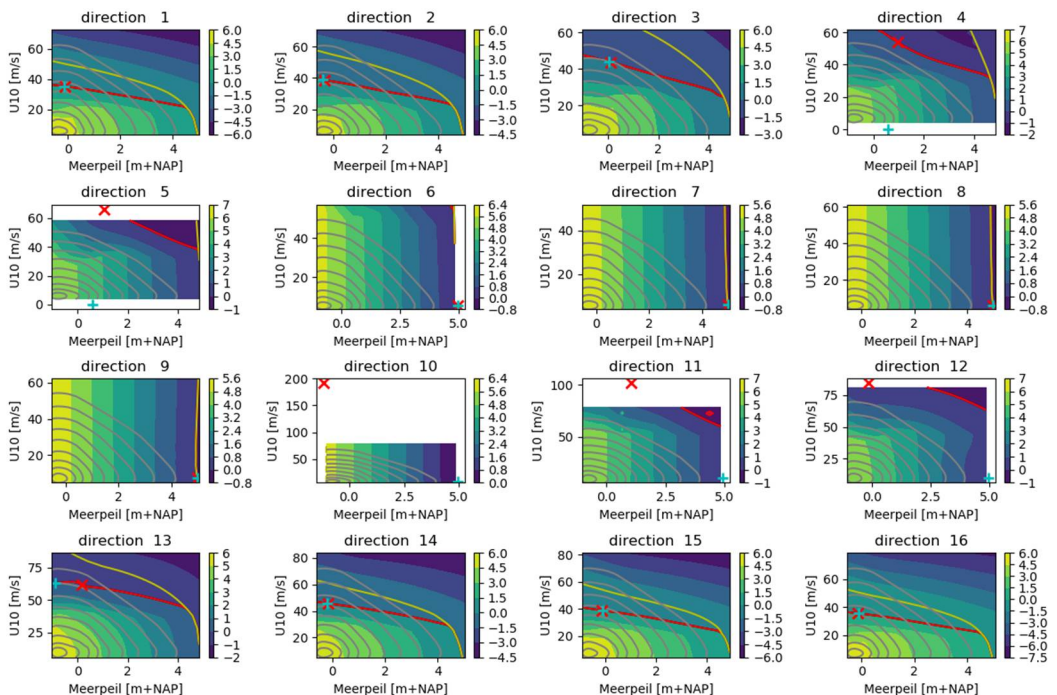


Figuur D-3: GEBU-golfklap, locatie 700101, kleurencontour: Z-waarde als functie van meerpeil en windsnelheid, grijze contourlijnen: Lijnen met gelijke afstand tot (0,0) in de U-ruimte (1 tot en met 10), rode lijn: Z=0 functie, zwarte lijn: Z=0 functie ongecorrigeerd faalmechanisme, gele lijn: overloop.

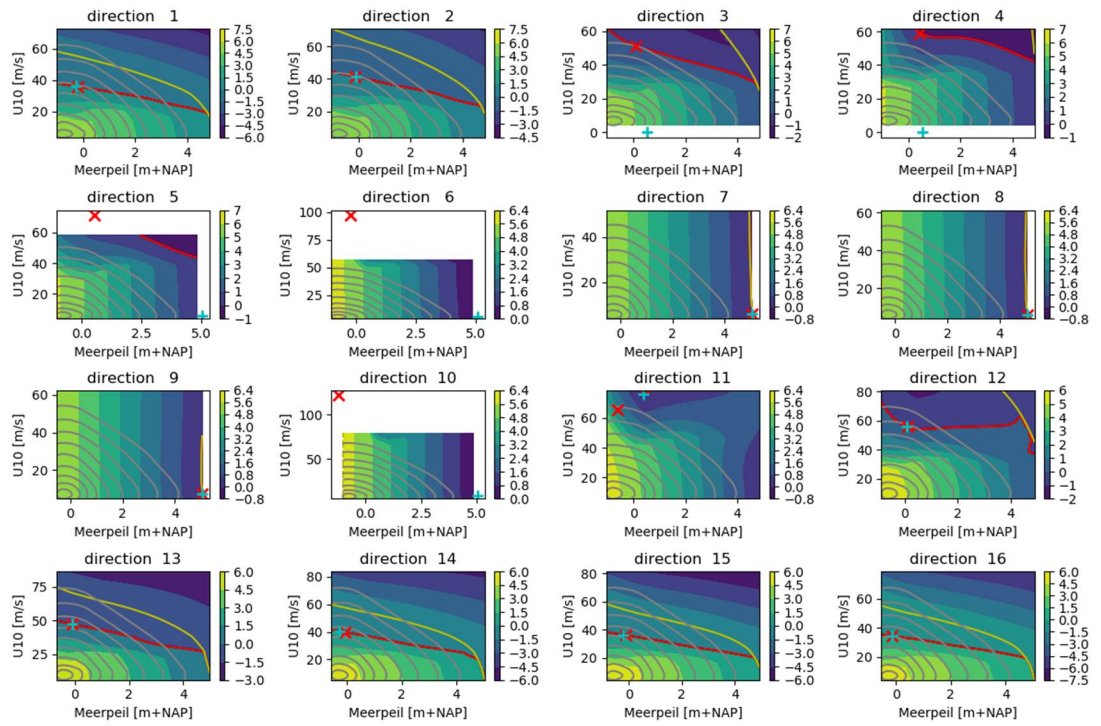
## E. Controle U-ruimte GEBU-oploop



Figuur E-1: GEBU-golfoploop, locatie 700090, kleurencontour: Z-waarde als functie van meerpeil en windsnelheid, grijze contourlijnen: Lijnen met gelijke afstand tot (0,0) in de U-ruimte (1 tot en met 10), rode lijn: Z=0 functie, gele lijn: overloop.

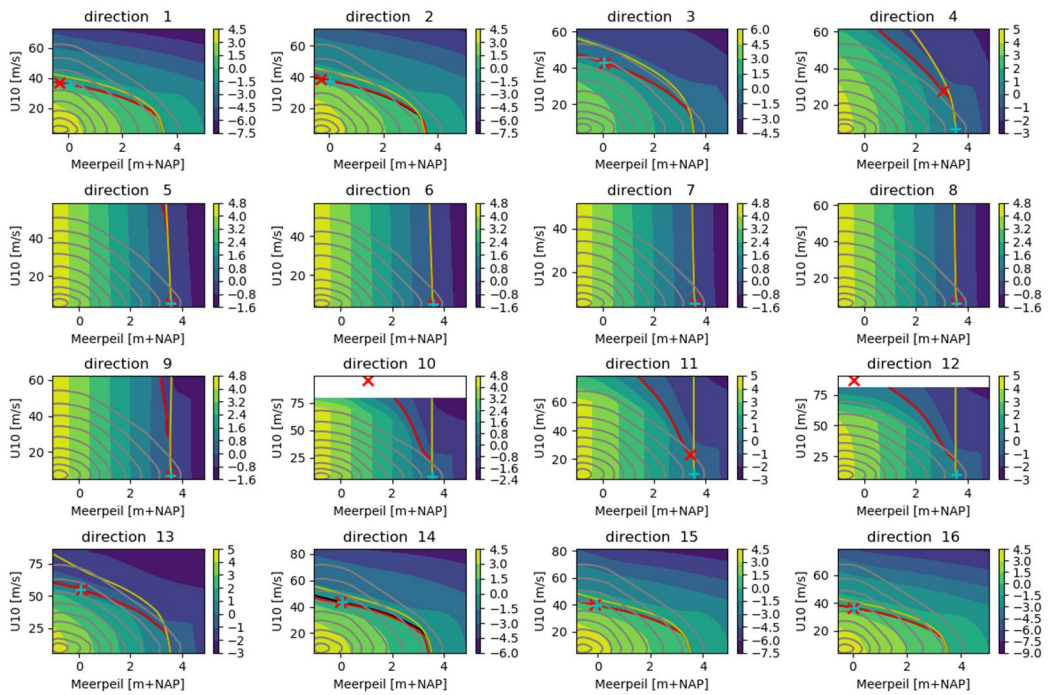


Figuur E-2: GEBU-golfoploop, locatie 700094, kleurencontour: Z-waarde als functie van meerpeil en windsnelheid, grijze contourlijnen: Lijnen met gelijke afstand tot (0,0) in de U-ruimte (1 tot en met 10), rode lijn: Z=0 functie, gele lijn: overloop.

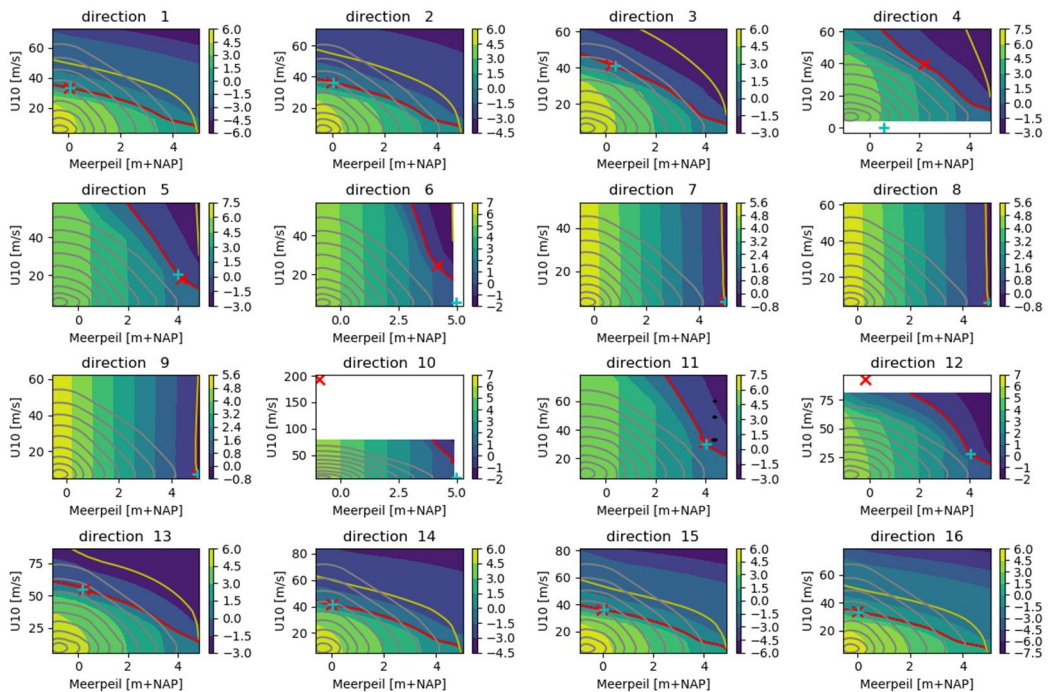


Figuur E-3: GEBU-golfoploop, locatie 700101, kleurencontour: Z-waarde als functie van meerpeil en windsnelheid, grijze contourlijnen: Lijnen met gelijke afstand tot (0,0) in de U-ruimte (1 tot en met 10), rode lijn: Z=0 functie, gele lijn: overloop.

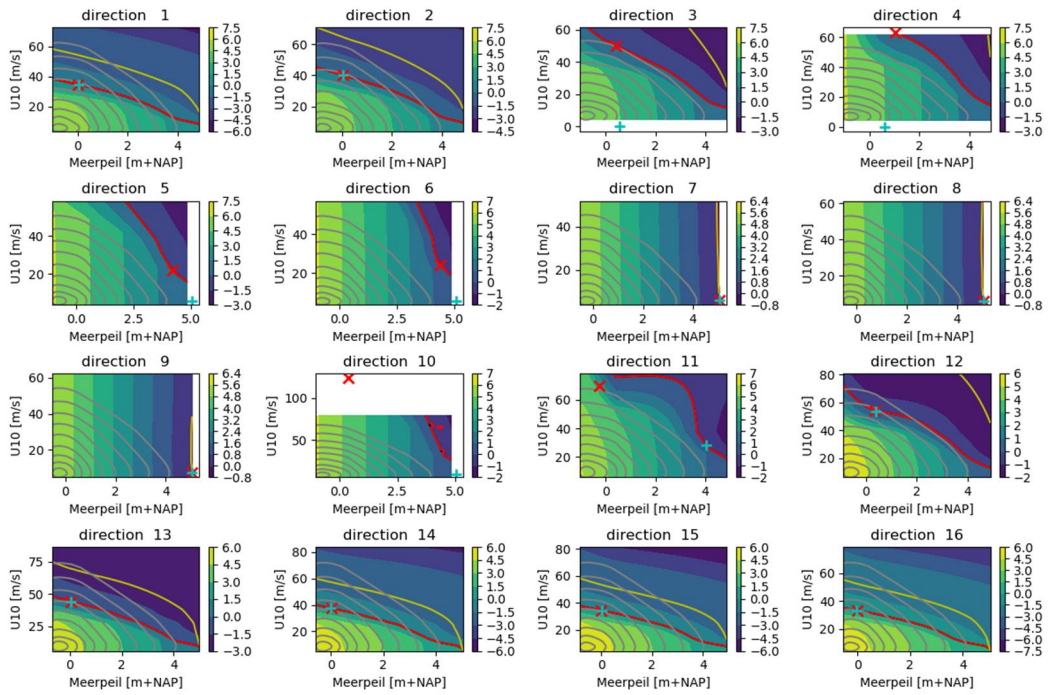
# F. Controle U-ruimte GEKB



Figuur F-1: GEKB, locatie 70090, kleurencontour: Z-waarde als functie van meerpeil en windsnelheid, grijze contourlijnen: Lijnen met gelijke afstand tot (0,0) in de U-ruimte (1 tot en met 10), rode lijn: Z=0 functie, gele lijn: overloop.



Figuur F-2: GEKB, locatie 70094, kleurencontour: Z-waarde als functie van meerpeil en windsnelheid, grijze contourlijnen: Lijnen met gelijke afstand tot (0,0) in de U-ruimte (1 tot en met 10), rode lijn: Z=0 functie, gele lijn: overloop.



Figuur F-3: GEKB, locatie 700101, kleurencontour: Z-waarde als functie van meerpeil en windsnelheid, grijze contourlijnen: Lijnen met gelijke afstand tot (0,0) in de U-ruimte (1 tot en met 10), rode lijn: Z=0 functie, gele lijn: overloop.

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)