

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

| | |
|-----------------------|-------------------------------------------------|
| Opdrachtgever | Waterschap Zuiderzeeland |
| Contactpersoon | de heer D.J. Smeenge |
| Referenties | - |
| Trefwoorden | Beoordeling, Ontwerp, Grasbekleding, Hydra-Ring |

Documentgegevens

| | |
|----------------------|-----------------------|
| Versie | 2.0 |
| Datum | 27-07-2023 |
| Projectnummer | 11209483-002 |
| Document ID | 11209483-002-HYE-0003 |
| Pagina's | 82 |
| Classificatie | |
| Status | definitief |

Auteur(s)

| | | |
|--|--------------------------|--|
| | A.J. Smale W.J. Klerk | |
| | | |

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).

In het geval van normtraject 8-3a wordt het gras 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. Dit leidt ertoe dat er een discrepantie ontstaat in de benodigde sterkte van de grasmat voor beide mechanismen (anders gezegd: als het binnentalud allang is gefaald door optreden van GEKB, dan moet het gras op het buitentalud nog bestand zijn tegen de belasting).

Voor ontwerp en gedetailleerde beoordeling van de grasbekleding kan gebruik worden gemaakt van de gecombineerde kansruimte voor GEBU en GEKB ($5\% + 24\% = 29\%$), 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 weggelaten: 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.

Vanaf versie 2.0 van de “plug-in” is het mogelijk om de aanwezigheid van de kleilaag onder de grasmat mee te nemen in de bepaling van de overstromingskansen als gevolg van falen van de grasmat door golfklap (GEBU-klap) of golfoploop (GEBU-oploop). Dit betreft dan de erosie van het dijklichaam (kleibekleding onder de grasmat) in situaties waarbij sprake is van een harde bekleding op de lagere delen van het talud en grasbekleding op de hogere delen van het talud. De erosiesnelheden zijn gebaseerd op de situatie behorende bij de Waddenzeedijken (Deltares, 2022): klei-eigenschappen, geometrie van het buitentalud en golfcondities. Voorafgaand aan het gebruik van de vervolgprocessen via de “plug-in” wordt aanbevolen om kennis te nemen van het toepassingsbereik van deze kennis, zoals beschreven in Deltares (2022) en na te gaan in hoeverre deze overeenkomen met de te beschouwen condities.

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

| | | |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| | Samenvatting | 4 |
| 1 | Inleiding | 8 |
| 1.1 | Achtergrond | 8 |
| 1.2 | Aanpak | 9 |
| 1.3 | Leeswijzer | 9 |
| 2 | Implementatie faalmechanismen | 10 |
| 2.1 | Generatie tijdreeksen | 10 |
| 2.1.1 | Constant (reekstype = 0) | 11 |
| 2.1.2 | Constante waterstand en trapezium golfcondities (reekstype = 1) | 11 |
| 2.1.3 | Getijsignaal met trapezium voor opzet en trapezium golfcondities (reekstype = 2) | 12 |
| 2.1.4 | Meerpeilopzet met trapezium voor opzet en trapezium golfcondities (reekstype = 3) | 13 |
| 2.2 | Grasbekleding Erosie Buitentalud (GEBU) – golfklap | 14 |
| 2.2.1 | Implementatie | 14 |
| 2.2.2 | Validatie | 16 |
| 2.2.3 | Aanpassingen ten behoeve van probabilistische omgeving | 17 |
| 2.3 | Grasbekleding Erosie Buitentalud (GEBU) – golfloop | 20 |
| 2.3.1 | Implementatie | 20 |
| 2.3.2 | Validatie mechanisme GEBU | 21 |
| 2.3.3 | Validatie golfloopberekening ($z_{2\%}$) met ongelijke hellingen onder- en boventalud | 23 |
| 2.3.4 | Validatie golfloopberekening ($z_{2\%}$) met zone afwijkende ruwheidscoëfficiënt | 23 |
| 2.3.5 | Aanpassingen ten behoeve van probabilistische omgeving | 25 |
| 2.4 | Grasbekleding Erosie Kruin en Binnentalud (GEKB) | 29 |
| 2.4.1 | Implementatie | 29 |
| 2.4.2 | Validatie | 31 |
| 2.5 | Vervolgproces voortschrijdende erosie na falen grasmat buitentalud | 33 |
| 2.5.1 | Implementatie | 34 |
| 2.5.2 | Validatie | 35 |
| 3 | Probabilistisch model | 36 |
| 3.1 | Grasbekleding Erosie Buitentalud (GEBU) – golfklap | 36 |
| 3.2 | Grasbekleding Erosie Buitentalud (GEBU) – golfloop | 38 |
| 3.3 | Grasbekleding Erosie Kruin en Binnentalud (GEKB) | 39 |
| 3.4 | Vervolgproces voortschrijdende erosie | 40 |
| 3.4.1 | Implementatie via SubmechanismModellen | 40 |
| 3.4.2 | GEBU – golfklap inclusief vervolgproces erosie | 41 |
| 3.4.3 | GEBU – golfloop inclusief vervolgproces erosie | 42 |
| 3.5 | Combinatie van mechanismen | 43 |
| 4 | Integratietests | 46 |
| 4.1 | Vergelijk probabilistisch model met Crude Monte Carlo | 47 |

| | | |
|-----------|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2 | Consistentie checks | 50 |
| 5 | Gebruikershandleiding | 53 |
| 5.1 | Omschrijving uitlevering | 53 |
| 5.2 | Berekeningen uitvoeren met de plug-in met Hydra-Ring | 53 |
| 5.2.1 | Vorbereidende activiteiten | 53 |
| 5.2.2 | Testen installatie | 53 |
| 5.2.3 | Zelf berekeningen definiëren en uitvoeren | 54 |
| 5.2.3.1 | Aanpassingen "1.ini" | 54 |
| 5.2.3.2 | Aanpassingen "1.sql": | 54 |
| 5.2.3.3 | Aanpassingen "run.bat": | 59 |
| 5.2.3.4 | Sommen maken met losse mechanismen | 59 |
| 5.3 | Inspectie van resultaten | 59 |
| 5.4 | Controle convergentie FORM | 59 |
| 5.5 | Inspectie faalkansbijdragen mechanismen | 61 |
| 5.6 | Inspectie ontwerp punt | 62 |
| 5.7 | Inspectie faalkansbijdragen stochasten | 63 |
| 6 | Consequenties voor GABI en GABU | 64 |
| 6.1 | Mogelijke gevolgen van samenvoegen faalkansruimte in het ontwerp | 64 |
| 6.2 | Gevolgen voor gras afschuiven binnentalud (GABI) | 64 |
| 6.3 | Gevolgen voor gras afschuiven buitentalud (GABU) | 65 |
| 6.4 | Conclusie met betrekking tot GABI en GABU | 66 |
| 7 | Conclusies en aanbevelingen | 67 |
| | Referenties | 68 |
| A. | Resultaat verkenning toegevoegde waarde bundelen GEBK en GEBU | 69 |
| B. | Validatie GEBU-klap | 70 |
| C. | Validatie GEBU-oploop | 72 |
| D. | Controle U-ruimte GEBU-klap | 74 |
| E. | Controle U-ruimte GEBU-oploop | 77 |
| F. | Controle U-ruimte GEKB | 80 |

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 (zowel golfklap als golfoploop) en GEKB is een stapsgewijze aanpak voorgesteld om enerzijds de toegevoegde waarde van 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 (golfklap 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 grenstoestandfunctie 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-golfklap, 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_{basis} = basisduur van de trapezia in uren
- T_{piek} = duur van de piek van de trapezia in uren
- A_{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 (Θ_{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)

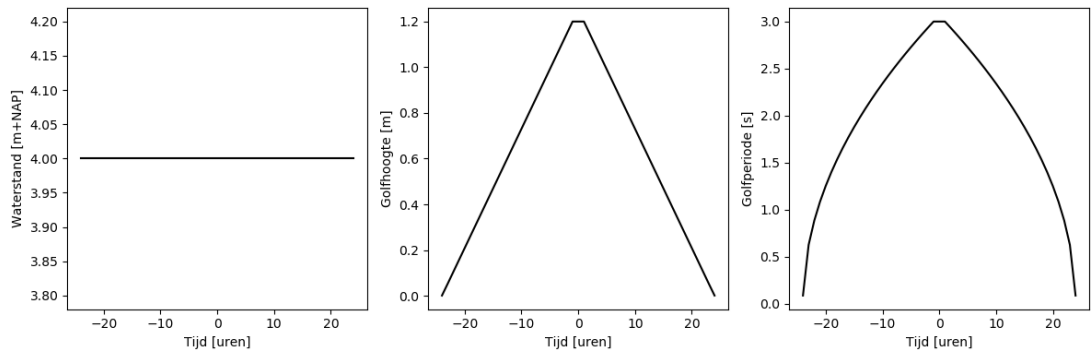
Ten behoeve van watersystemen zoals Bovenrivieren kan gebruik worden gemaakt van een reekstype waarbij de waterstand constant is in de tijd, maar waarbij het verloop van de golfhoogte en de golfperiode op basis van een trapezium is geconstrueerd:

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

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], $H_{m_0, piek} = 1.2$ [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:

$$h(-0.5T_{basis} : dt : +0.5T_{basis}) = A_{getij} \cos\left(2\pi \frac{time}{\omega_{getij}}\right) + (h_{piek} - A_{getij}) - \left(\max\left(\left|\frac{time - 0.5T_{piek}}{0.5T_{piek}}\right|; \right)\right) \frac{\partial h}{\partial t}_{flank, getij}$$

$$H_{m0}(-0.5T_{basis} : dt : +0.5T_{basis}) = H_{m_0, piek} - \left(\max\left(\left|\frac{time - 0.5T_{piek}}{0.5T_{piek}}\right|; \right)\right) \frac{\partial H_{m0}}{\partial t}_{flank} \quad (2.4)$$

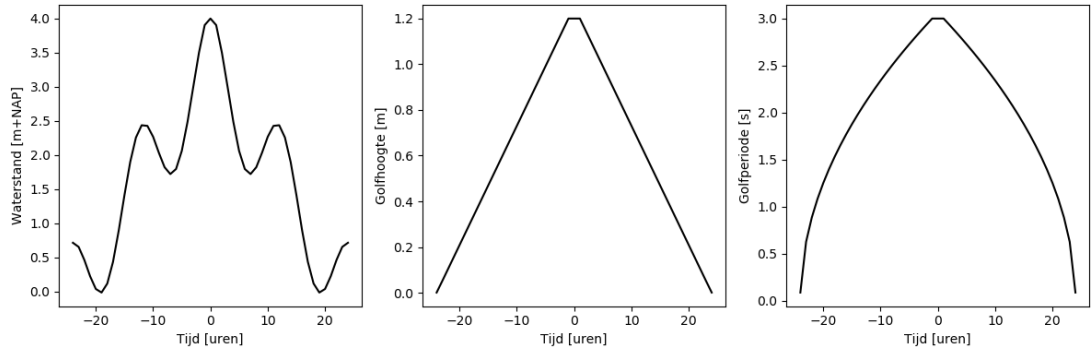
$$T_{m-1,0}(-0.5T_{basis} : dt : +0.5T_{basis}) = \left(H_{m0} \frac{T_{m-1,0,piek}^2}{H_{m0,piek}}\right)^{0.5}$$

$$\theta(-0.5T_{basis} : dt : +0.5T_{basis}) = \theta_{piek}$$

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 (reekstype =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 (reekstype =3)

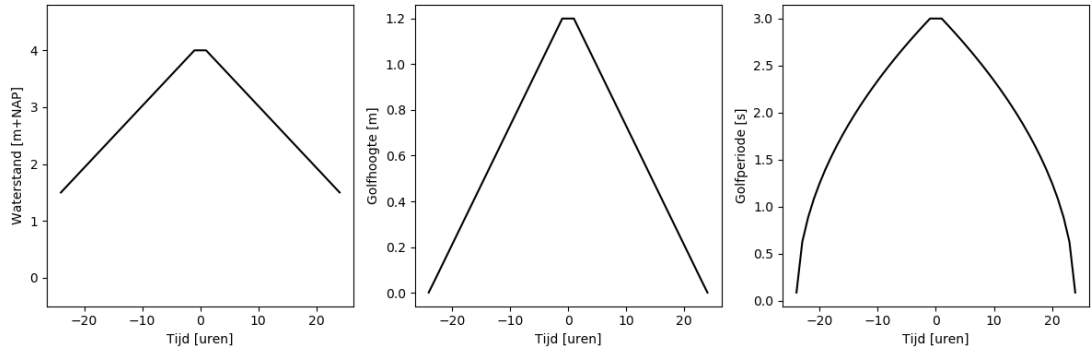
Voor het merengebied kan een verloop van de waterstand worden gehanteerd dat bestaat uit het meerpeil met hierop gesuperponeerd een trapeziumverloop van de windopzet. De golfcondities volgen een trapeziumverloop. In de 'plug-in' wordt dit verloop (reekstype = 3) als volgt geconstrueerd:

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

Hierin is:

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

In Figuur 2-3 is een voorbeeld van een geconstrueerde tijdreeks volgens reekstype = 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 reekstypen (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 tijdreeksen 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 (Δz)
- Tijdstapgrootte voor bepaling moment van falen (Δt)
- Sterkte-eigenschappen: coëfficiënten a, b, c
- Zandfractie (F_{sand})
- Gecombineerde laagdikte ($D_{combined}$)

Voor aanvang van de berekening wordt de golffhoogte 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 Δt ; in totaal N_t punten
- Verticaal: niveaus (z), van h_{trans} tot h_{crest} met stappen van Δz ; 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:

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

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

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

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

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

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

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

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:

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

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

$$\begin{aligned}
F_{top}(t, z) &= \frac{t_{load}(t, z)}{t_{strength,top}(t, z)} \\
F_{sub}(t, z) &= \frac{t_{load}(t, z)}{t_{strength,sub}(t, z)} \\
F_{top,sub}(t, z) &= \frac{t_{load}(t, z)}{t_{strength,top}(t, z) + t_{strength,sub}(t, z)}
\end{aligned} \tag{2.14}$$

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} :

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

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

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

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

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

2.2.2 Validatie

De in de “plug-in” geïmplementeerde mechanismebeschrijving 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, 0.99¹ [-]
- $D_{combined}$: 0.1, 0.6 meter
- $H_{m0,pienk}$: 0., 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 meter

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

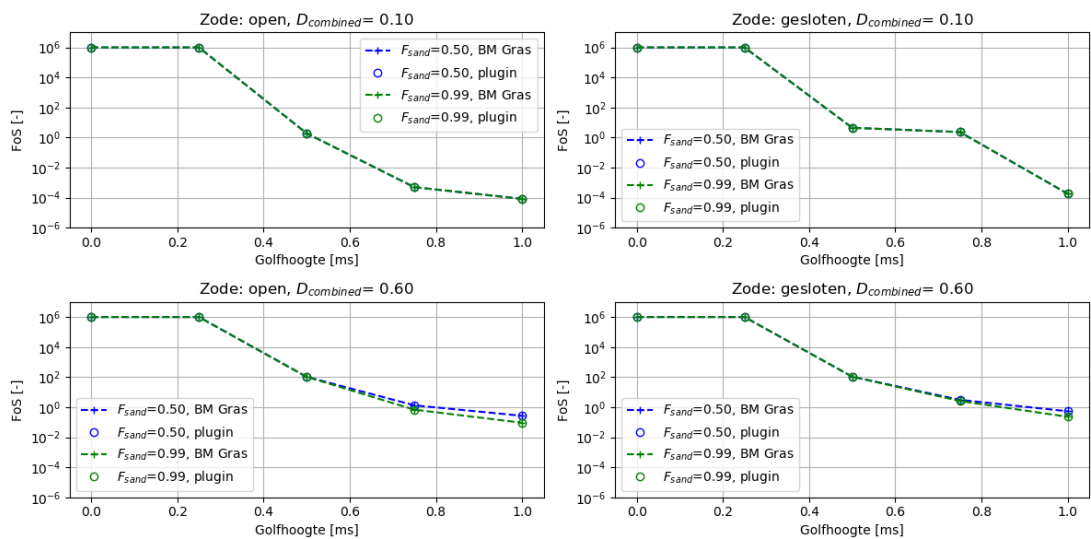
- T_{basis} = 48 uur
- T_{pienk} = 2 uur
- A_{getij} = 1 meter
- h_{basis} = 0.5 m+NAP

¹ 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 (θ) = 35°N
- $dt = 0.25 \text{ uur}$
- dijknormaal = 35°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_{sand} . Dit is het gevolg van het feit dat bij een waarde van 0.1 voor D_{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.

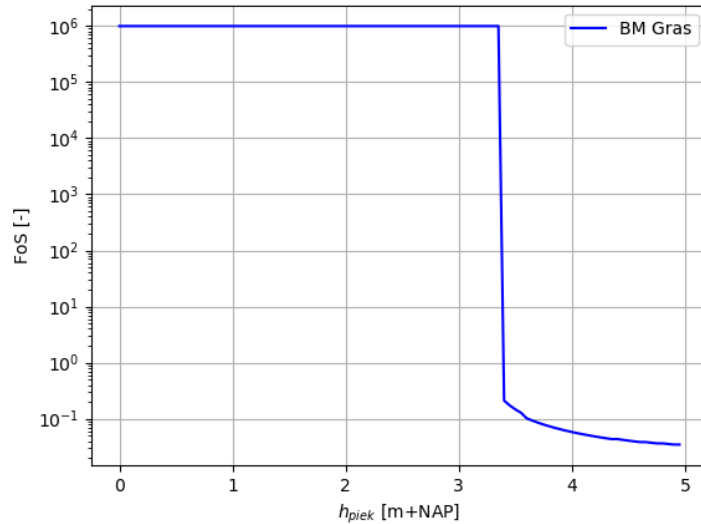
Op basis van deze validatie wordt geconcludeerd dat de beschrijving van het faalmechanisme GEBU-klap op een juiste wijze is geïmplementeerd in de “plug-in”.



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.



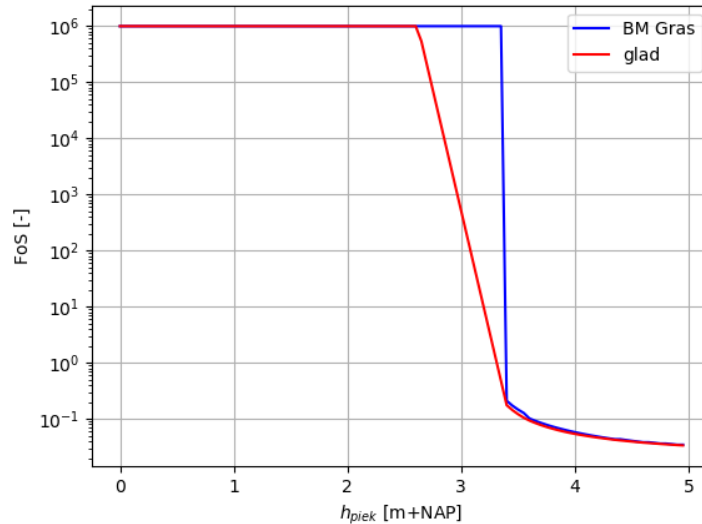
Figuur 2-5: Voorbeeld van discontinuïteit in faalmechanisme beschrijving GEBU-klap. FoS voor niveau NAP +3.4m.

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

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

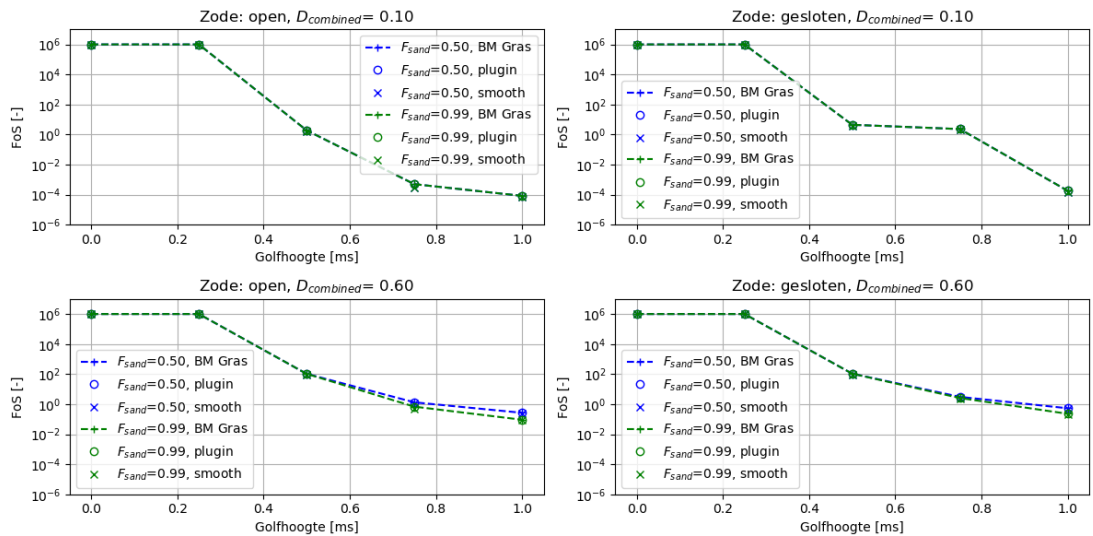
De waarden voor $t_{strength,top}(t, z)$ en $t_{strength,sub}(t, z)$ kunnen bepaald worden volgens vergelijking (2.11) en (2.12), waarbij $z \geq h(t) - 0.5H_{m0}(t)$ & $z < h(t)$ vervangen wordt door $z > h(t)$.

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 λ_1 en λ_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 ($y_{zone,min}$)
 - Niveau bovenzijde afwijkende ruwheidscoëfficiënt ($y_{zone,max}$)
- Stapgrootte voor bepaling niveaus die beoordeeld moeten worden (Δz)
- Tijdstapgrootte voor bepaling moment van falen (Δt)
- 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 γ_b en γ_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 γ_b en γ_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 Δt : in totaal N_t punten
- Verticaal: niveaus (z), van h_{trans} tot h_{crest} met stappen van Δz : 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:

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

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 gediscetiseerd;

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

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

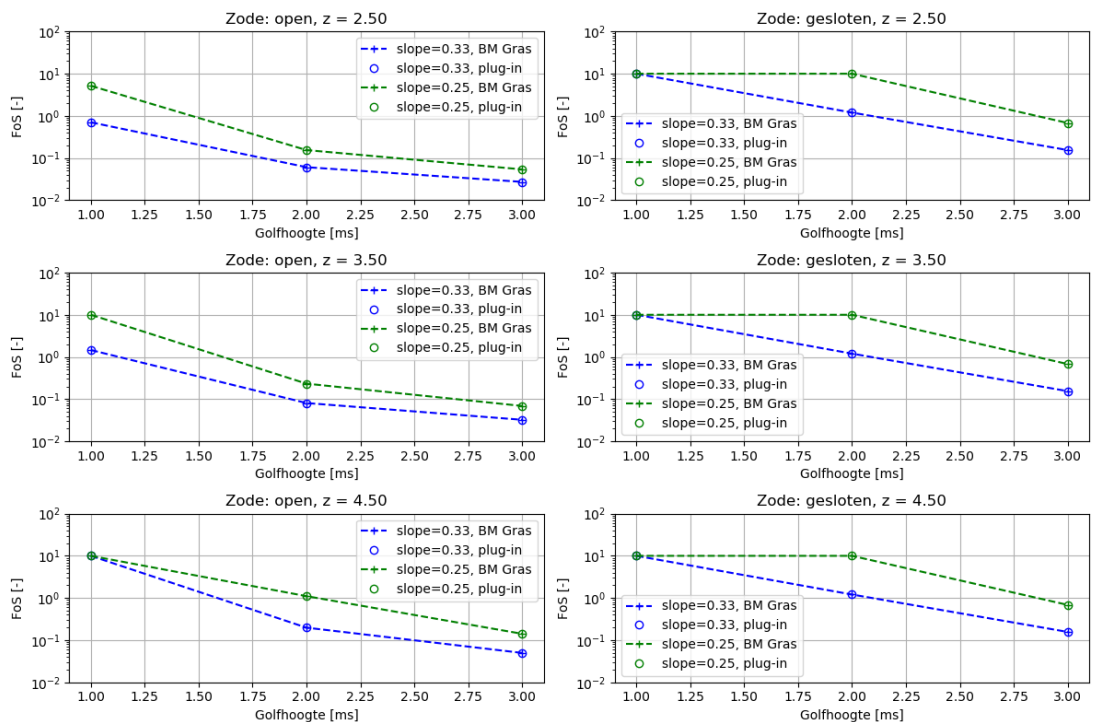
De in de “plug-in” geïmplementeerde mechanismebeschrijving is gevalideerd door een vergelijking te maken met de resultaten van de BM Gras. Hiervoor zijn de volgende variaties gehanteerd:

- Reekstype: 0, 1, 2, 3
- Open/gesloten graszode:
 - Open: $U_{crit}=4.3$ [m/s], $D_{crit}=7000$ [m²/s²]
 - Gesloten: $U_{crit}=6.6$ [m/s], $D_{crit}=7000$ [m²/s²]
- Taludhelling ($\tan(\alpha)$): 0.25, 0.33 [-]
- Niveaus (z): 2.5, 3.5, 4.5 [m+NAP]
- $H_{m0,pijk}$: 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
- h_{pijk} = 2.0 m+NAP
- golfrichting (θ) = 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”.



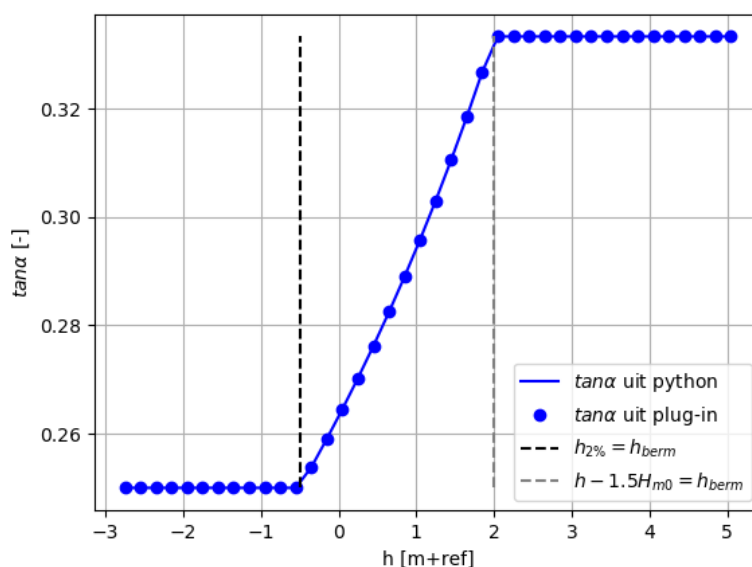
Figuur 2-8: Validatie implementatie GEBU-oploop. Links: open zode, rechts gesloten zode. Boven: $z = 2.50$ [m+NAP], midden: $z = 3.5$ pm+NAP], onder: $z = 4.5$ [m+NAP]. Blauw: $\tan\alpha = 0.33$ Groen: $\tan\alpha = 0.25$. '+': resultaat BM Gras, 'o': resultaat “plug-in”.

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 oloophoogte 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 oloophoogte ligt steeds meer op het steilere boventalud), totdat geldt dat $h - 1.5H_{m0} = h_{berm}$. Vanaf dat moment ligt de gehele oloophoogte 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.

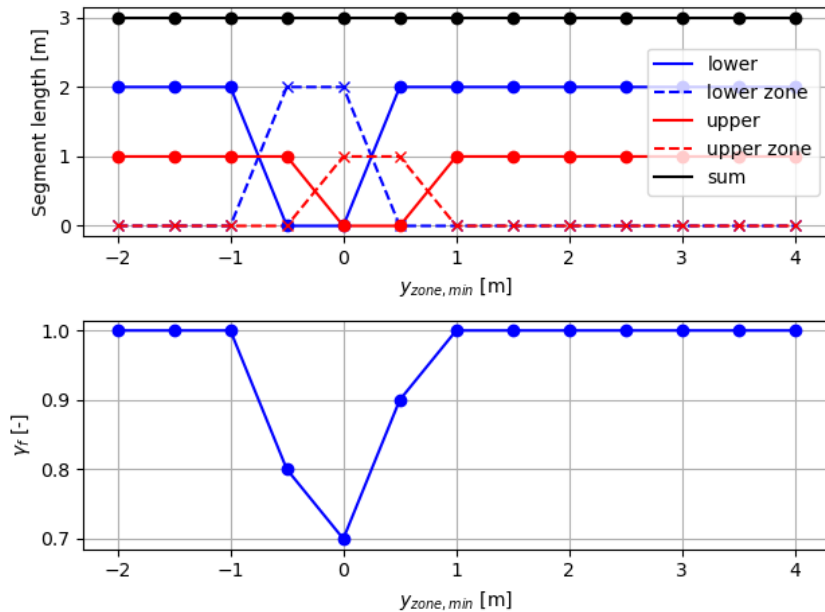
In deze consistentiecheck is gerekend met:

- 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]
- Golfoploophoogte $z_{2\%}$ = 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 γ_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 γ_f volledig bepaald door de ruwheidscoëfficiënt $\gamma_{f,talud}$. Als sprake is van een overlap tussen invloedsgebied en zone, dan wordt de gemiddelde ruwheidscoëfficiënt γ_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 γ_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 oploop, 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):

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

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".

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

Hierin is:

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

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

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

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

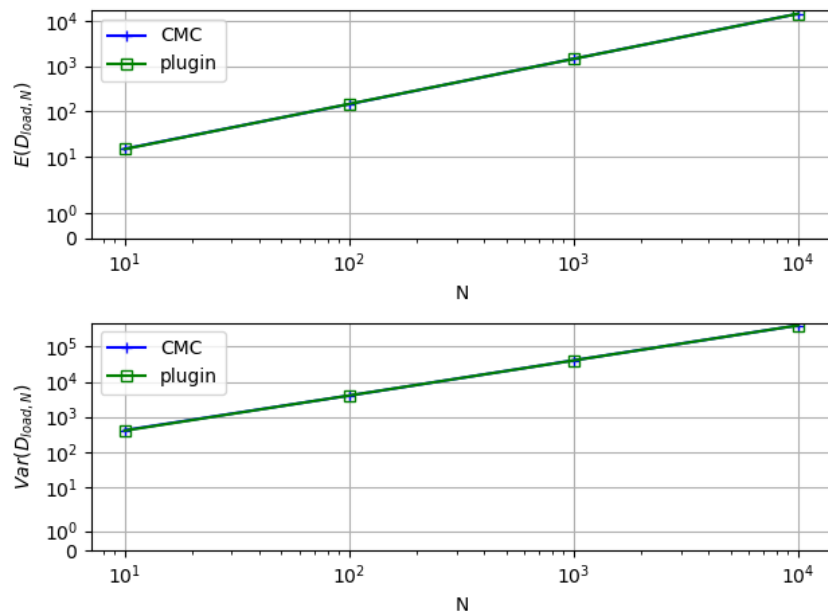
De 2% overschreden golfploophoogte wordt bepaald op basis van vergelijkingen (5a) en (5b) uit TAW (2002) en wordt getoond in vergelijking (2.19), rekening houdend een de variatiecoëfficiënt van 0.07.

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"².

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

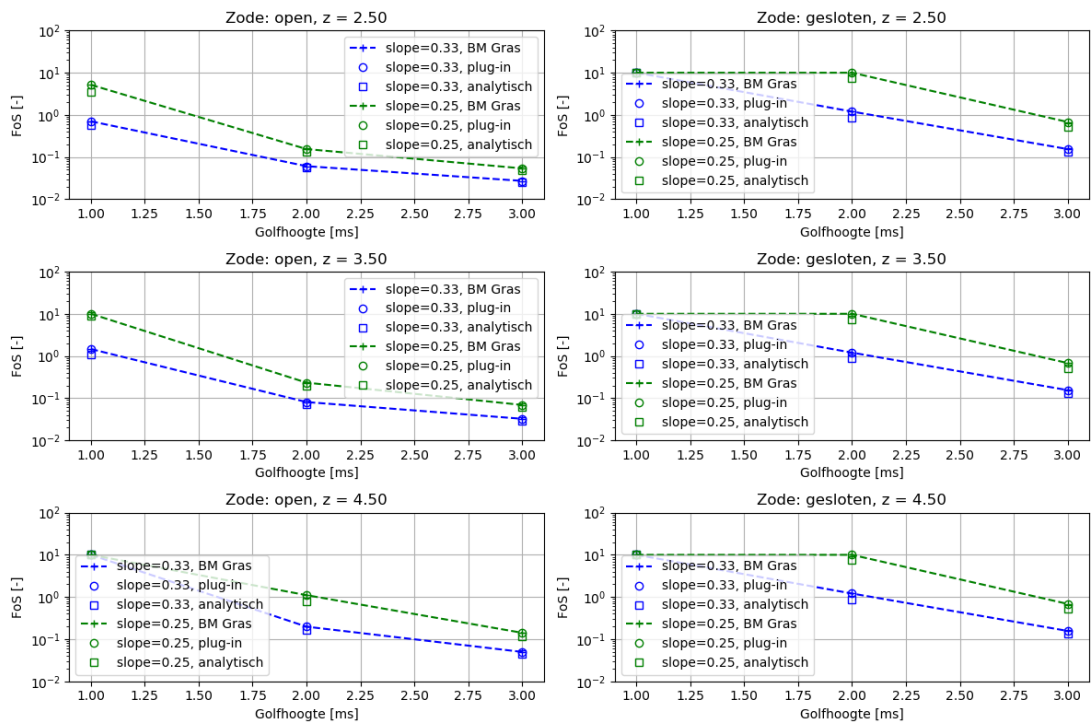
² De analytische oplossing bevat de exponentiele integraal welke wordt benaderd volgens Cody and Thacher (1968) en Cody and Thacher (1969) met de benadering zoals beschikbaar op <https://www.netlib.org/specfun/ei>.

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 Kruin en Binnentalud (GEKB)

Voor het mechanisme Gras Erosie Kruin 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 berm lengte (L_{berm})
- Kruihoogte (h_{kruin})
- Ruwheidscoëfficiënt voor het talud ($\gamma_{f,talud}$)
- Zone met afwijkende ruwheidscoëfficiënt:
 - Ruwheidscoëfficiënt $\gamma_{f,zone}$
 - Niveau onderzijde afwijkende ruwheidscoëfficiënt ($y_{zone,min}$)
 - Niveau bovenzijde afwijkende ruwheidscoëfficiënt ($y_{zone,max}$)
- Tijdstapgrootte voor bepaling moment van falen (Δt)
- Sterkte-eigenschappen:
 - Kritieke stroomsnelheid: U_c

- Invloedscoëfficiënten overgangen: α_M, α_S
- Invloedscoëfficiënt voor versnelling op het binnentalud: α_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):

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

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 vrijboard: $h_{kruin} - h(t)$):

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

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:

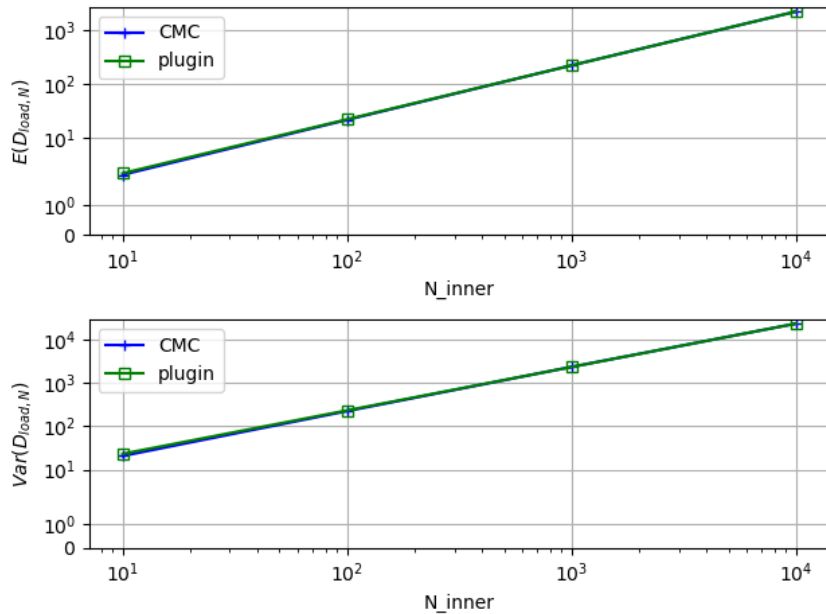
$$\operatorname{var}(D_{load,N}) = N \left(\int_{R u_{min}}^{\infty} \frac{R u_i e^{-\frac{R u_i^2}{2\sigma^2}}}{\sigma^2} \left(-U_c^2 \alpha_s + \alpha_m \alpha_a^2 c u^2 g (-R_c + R u_i) \right)^2 dR u_i - \left(\frac{E(D_{load,N})}{N} \right)^2 \right) \quad (2.43)$$

Deze uitdrukking voor $\operatorname{var}(D_{load,N})$ is analytisch opgelost en zoals geïmplementeerd in de "plug-in"².

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.

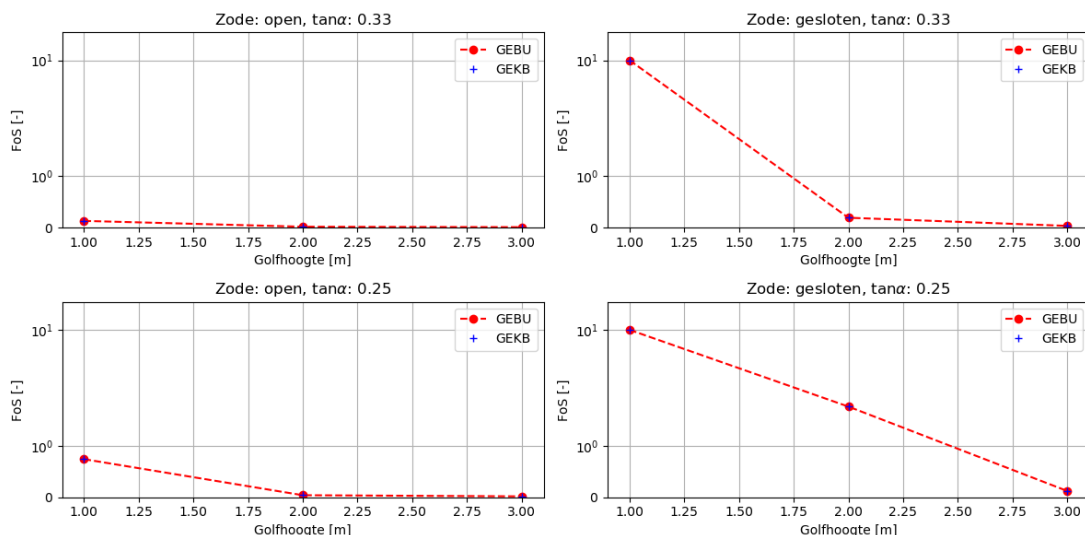


Figuur 2-13: Vergelijking Crude Monte Carlo aanpak GEKB met “plug-in”/analytische oplossing. Boven: vergelijking $E(D_{load,N})$, onder: $var(D_{load,N})$. Blauw: Crude Monte Carlo (CMC), groen: “plug-in”/analytische oplossing (vergelijking (2.41) en (2.43)). Case: $z_{2\%} = 4$ meter.

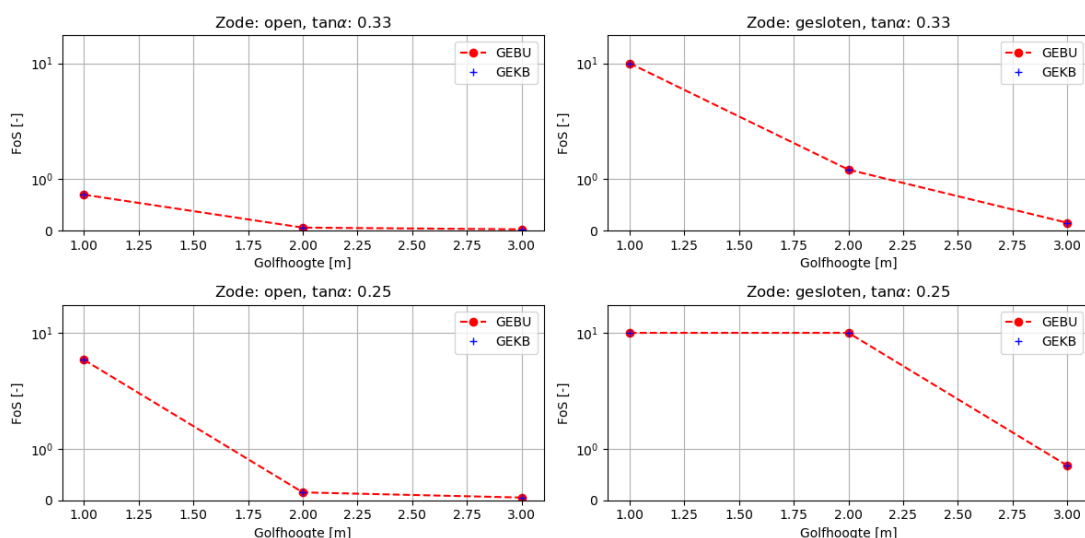
Een tweede vergelijking die gemaakt kan worden is de vergelijking met de resultaten van GEBU-oploop. Immers, de beschrijving van het mechanisme is in generieke zin hetzelfde, enkel de “coëfficiënten” verschillen. De beide mechanismen zouden hetzelfde resultaat moeten geven als:

- 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 (reekstyp = 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 (reekstyp = 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.

2.5 Vervolproces voortschrijdende erosie na falen grasmat buitentalud

De aanwezigheid van de kleilaag onder de grasmat kan worden meegenomen in de bepaling van de overstromingskans als gevolg van falen van de grasmat door golfklap (GEBU-klap) of golfoploop (GEBU-oploop). Dit betreft dan de erosie van het dijklichaam (kleibekleding onder de grasmat) in situaties waarbij sprake is van een harde bekleding op de lagere delen van het talud en grasbekleding op de hogere delen van het talud.

De erosiesnelheden zijn gebaseerd op de situatie behorende bij de Waddenzeedijken (Deltares, 2022): klei-eigenschappen, geometrie van het buitentalud en golfcondities. Voorafgaand aan het gebruik van de vervolgprocessen via de “plug-in” wordt aanbevolen om kennis te nemen van het toepassingsbereik van deze kennis, zoals beschreven in Deltares (2022) en na te gaan in hoeverre deze overeenkomen met de te beschouwen condities.

De kennis ten aanzien van het erosieproces was reeds geïmplementeerd en is één op één overgenomen. Uitzondering hierop is de bepaling van de erosiediepte: daar zijn beperkte aanpassingen gedaan om de (impliciete) aanname van een oneindig hoge dijk weg te nemen.

Bij de bepaling van de faalkans (meer specifiek de Z-waarde) wordt eerst conform GEBU-klap of GEBU-oploop (de losse faalmechanismen) gekeken of de grasmat faalt. Indien de grasmat faalt, dan wordt voor het resterende deel van de storm de mate van erosie uitgerekend. De resterende kleilaagdikte is dan de resulterende Z-waarde voor de probabilistische berekening: als deze negatief wordt dan is sprake van falen.

Indien een berekening voor het mechanisme golfklap met het volproces wordt uitgevoerd, dan wordt de aanwezige kleilaagdikte verminderd met de waarde van "Dcombined" zoals gespecificeerd bij het mechanisme golfklap, omdat dat de diepte van erosiekuil is na falen grasmat en onderlaag.

2.5.1 Implementatie

Het mechanisme eroderen van de kleilaag onder de grasmat wordt alleen meegenomen in de probabilistische berekening wanneer de grasbekleding van het buitentalud faalt door GEBU-klap of GEBU-oploop. De invoer van de som is gelijk aan die van GEBU-klap en/of GEBU-oploop met toevoeging van de volgende parameters:

- Kruinbreedte
- Helling binnentalud
- Kleilaagdikte d_{klei} (gedefinieerd als dikte langs de verticale as, niet haaks op het talud!)
- coëfficiënt $d_{1,2}$ (diepte waarbij overgegaan wordt op erosie fase 1 naar fase 2)
- modelonzekerheid (m_1) in de eerste fase van het erosieproces
- modelonzekerheid (m_2) in de tweede fase van het erosieproces

Het erosievolume V_e en de bijbehorende maximale diepte d_e worden berekend volgens het erosieproces met twee fases zoals omschreven in Deltares (2022). De eerste fase betreft het eroderen van het gras en het ontstaan van een kuil met een klif. Zodra de kuil is gevormd zal zowel golfoploop als golfklappen de klei verder eroderen en migreert de klif landwaarts. Dit is de tweede fase van het erosieproces. De formules waarmee het erosieprofiel tijdens de eerste en tweede fase van het erosieproces worden beschreven worden hier kort toegelicht. Voor een volledige afleiding van de erosieformules wordt verwezen naar Deltares (2022).

Uit de testen in Deltares (2022) blijkt dat in de eerste fase van het erosieproces d_o (diepte van de kuil) kan worden beschreven als $0.75 d_e$ met een max van 0.35 meter. d_e tijdens de eerste fase kan daarmee als volgt worden gedefinieerd:

$$d_e = m_1 c_d f_{overgang} (H_{m0} - 0.5) (\tan \alpha)^{1.5} t_{belast} \quad (2.44)$$

Hierin is c_d een factor met een verwachtingswaarde van 0.55, $f_{overgang}$ een parameter die de invloed van de diepte van de overgang ten opzichte van de significante golfhoogte bij de teen van de dijk H_{m0} weergeeft en wordt bepaald met onderstaande formule (waarbij geldt $h_{overgang} = h_{trans}$):

$$f_{overgang} = \max \left(0; \min \left(1; 0.44 \frac{h_{overgang}}{H_{m0}} + 0.66 \right) \right) \quad (2.45)$$

Verder is m_1 een stochastische variabele die de onzekerheden in de erosiediepte tijdens de eerste fase van het erosieprofiel meeneemt en t_{belast} de duur van de beschouwde belasting H_{m0} .

Tijdens de tweede erosiefase kan de erosiesnelheid worden omschreven met de volgende formule:

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = 0.070 m_2 \frac{(H_{m0} - 0.25)^2}{\sqrt{s_{op}}} \min \left(2.4; \max \left(0; 1.2 + \frac{1.6 h_{overgang}}{H_{m0}} \right) \right) \left(\frac{13}{\frac{B_{berm}}{H_{m0}} \min \left(1; \max \left(0; 2 - \frac{h_{berm}}{H_{m0}} \right) \right) + 8} - 0.5 \right) \left(1.75 - \frac{0.18}{\tan \alpha} \right) \quad (2.46)$$

Hierin is s_{op} de golfstijlheid en B_{berm} en h_{berm} de breedte en hoogte van de berm respectievelijk. m_2 is een stochastische variabele die de onzekerheid tijdens de tweede fase van het erosieproces meeneemt. De 'plug-in' bepaalt met deze formule voor elke tijdstap tijdens de tweede fase de erosiesnelheid en uiteindelijk het totale erosievolume op het einde van de storm. Met vergelijking **Error! Reference source not found.** wordt vervolgens de maximale erosie V_e berekend en het resulterende profiel van de erosiekuil wordt bepaald. Met het geschematiseerde profiel van de kuil en de geometrie van de kleilaag wordt de afstand tussen het profiel en de onderkant van de kleilaag bepaald. De kleilaag faalt wanneer de erosiediepte groter is dan de kleilaagdikte.

falen treedt op wanneer de maximale gevonden erosiediepte d_e groter is dan de dikte van de kleilaag d_{klei} . Ofwel: de falen treedt op als de diepste insnijding van het restprofiel de kleilaag geheel doorsnijdt. Dit wordt bepaald door de vector (d_{min}) die de kortste afstand tussen (i) diepste insnijding door het restprofiel van de erosiekuil en (ii) de onderkant van de kleilaag, vermenigvuldigd met de naar buiten gerichte normaal (\vec{n}) van het profiel dat de onderzijde van de kleilaag beschrijft. Indien de waarde van $d_{min} \cdot \vec{n}$ kleiner is dan 0, dan treedt falen op.

De Factor of Safety (FoS) in geval van het vervolgproces wordt omschreven door de volgende vergelijking:

$$FoS = 1 + d_{min} \cdot \vec{n} \quad (2.47)$$

2.5.2 Validatie

De implementatie van de formuleringen zoals beschreven in voorgaande sectie is ongewijzigd overgenomen en derhalve niet in detail gevalideerd. Uitzondering is de wijze waarop de erosiediepte wordt vergeleken met de aanwezige kleilaagdikte: deze is aangepast omdat deze impliciet uitging van een oneindig hoge dijk. Deze aanpassing is doorgevoerd in de bepaling van de Z-waarde benodigd voor de probabilistische analyse en dus beschreven in sectie 3.4.2.

3 Probabilistisch model

3.1 Grasbekleding Erosie Buitentalud (GEBU) – golfklap

Het in sectie 2.2 beschreven mechanisme is 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.

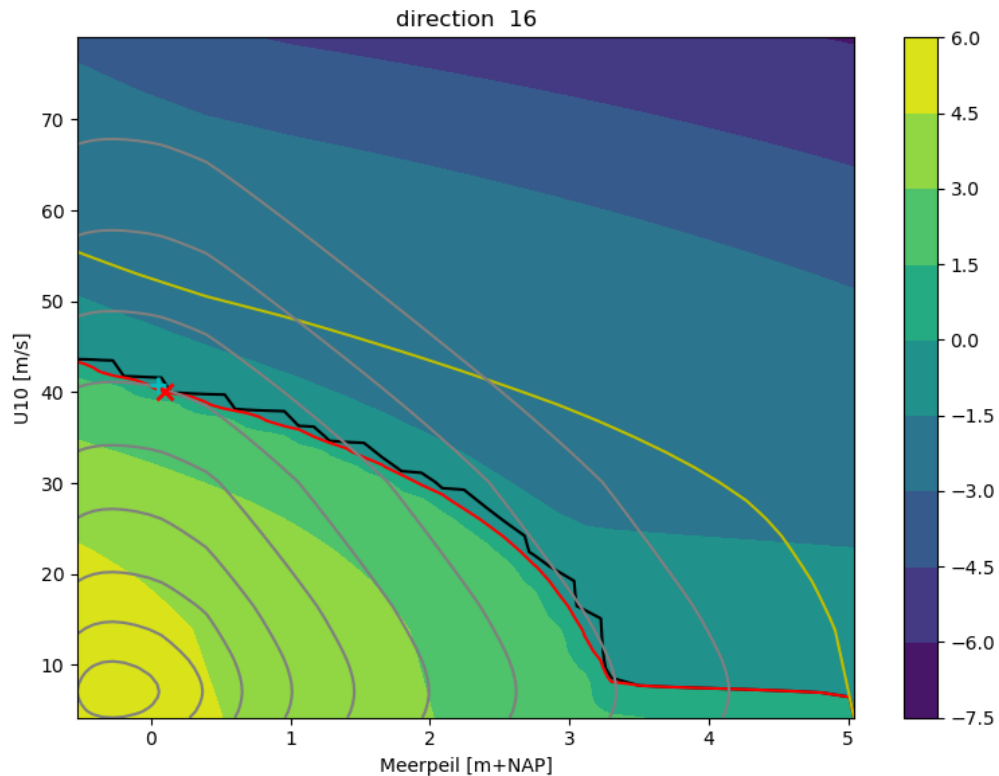
De Z-functie en de resultaten van de probabilistische analyse zijn vervolgens geanalyseerd voor de 3 locaties beschreven in Bijlage A (en 16 windrichtingen per locatie) door een probabilistische som uit te voeren met de GEBU-klap implementatie in de ontwikkelde “plug-in”. De som is uitgevoerd zonder 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 geplot voor $Z=0$ (de combinatie belasting en sterkte gelijk zijn). Specifiek voor dit mechanisme is in aanvulling ook de $Z=0$ contour geplot 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 kans³ 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.

³ De omrekening van faalkans naar beta kan in excel met $Beta = \text{norm.s.inv}(1-\text{faalkans})$ en omgekeerd $\text{faalkans} = 1 - \text{norm.s.dist}(\text{beta}; \text{waar})$

De afbeelding toont eveneens het gevonden ontwerppunt op basis van zowel de rekentechniek 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 16 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 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 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.

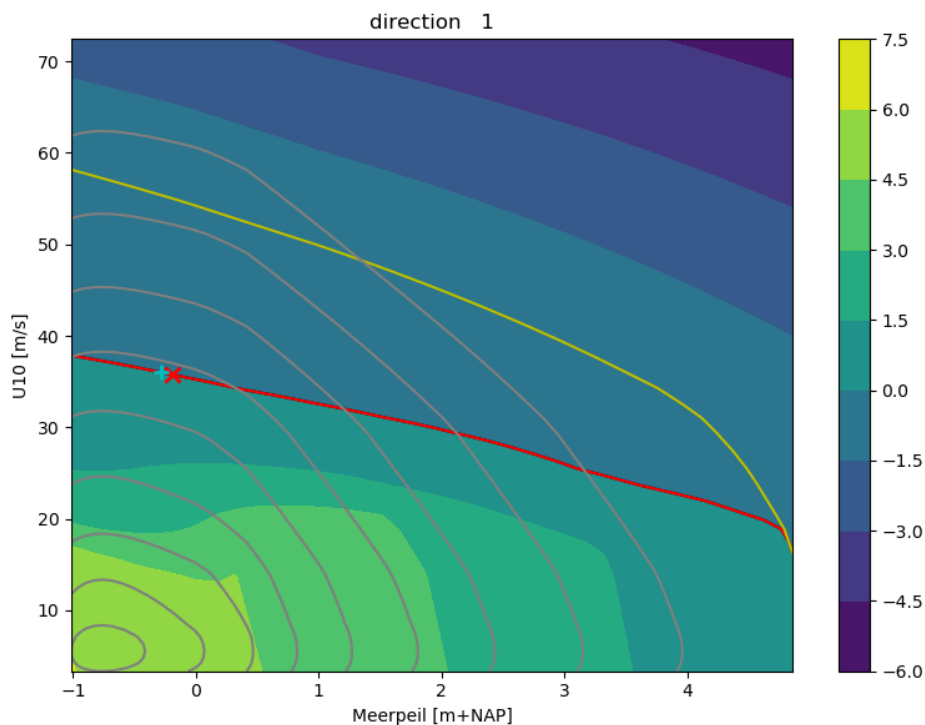
3.2 Grasbekleding Erosie Buitentalud (GEBU) – golfoploop

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 afluende 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.

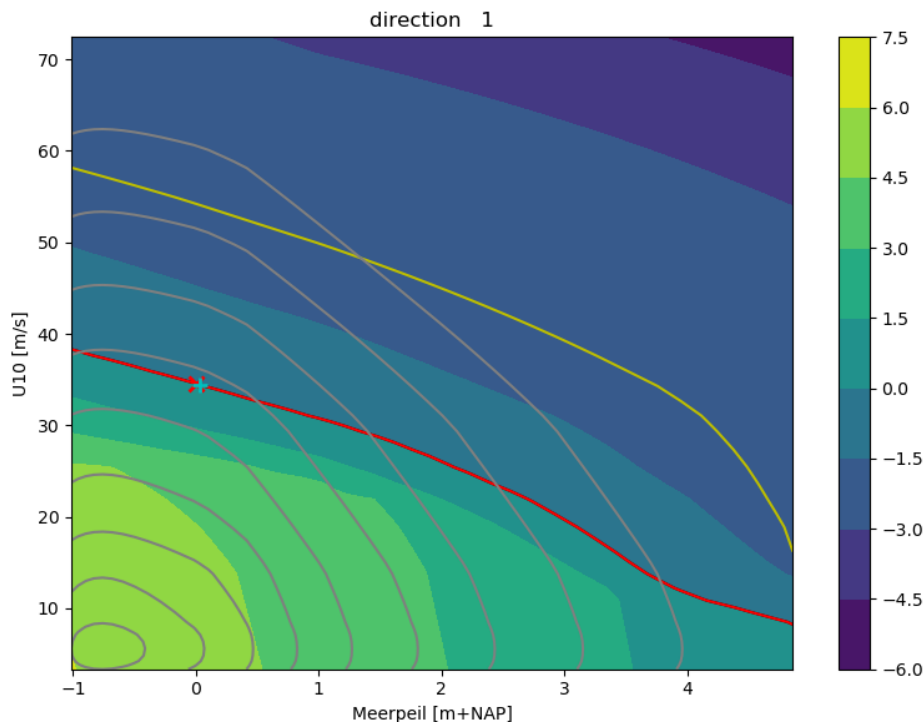
3.3 Grasbekleding Erosie Kruin en Binnentalud (GEKB)

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 Vervolproces voortschrijdende erosie

3.4.1 Implementatie via SubmechanismModellen

Vanaf versie 2.0 van de plug-in is de mogelijkheid opgenomen om te rekenen met het vervolproces “voortschrijdende erosie na falen grasmat” door GEBU-golfoploop of GEBU-golfklap. De implementatie van het vervolproces is uitgevoerd via het gebruik van de zogenaamde SubmechanismModellen optie van Hydra-Ring. Dit is effectief een switch: daarmee kan het vervolproces in een berekening (per mechanisme) geactiveerd of gedeactiveerd worden.

In het geval dat het vervolproces voortschrijdende erosie geactiveerd is, dan wordt eerst het mechanisme GEBU-golfoploop of GEBU-golfklap doorgerekend en indien het gras gefaald is dan wordt voortschrijdende erosie doorgerekend.

De volgende SubmechanismModellen (switches) zijn vooralsnog beschikbaar:

- 202: met ontsluiting voorland-coëfficiënten, wel vervolproces
- 204: zonder ontsluiting voorland-coëfficiënten, wel vervolproces
- 205: met ontsluiting voorland-coëfficiënten, zonder vervolproces
- 206: zonder ontsluiting voorland-coëfficiënten, zonder vervolproces

Hierbij wordt opgemerkt dat SubMechanismModels 202 en 205 alleen van toepassing zijn in combinatie met de Hydra-Ring versie waarin de coëfficiënten van de voorlandmodule zijn ontsloten, zie Deltares (2023b).

3.4.2 GEBU – golfklap inclusief vervolproces erosie

Wanneer het SubMechanismModels van het vervolproces erosie (202 of 204) wordt gebruikt in combinatie met GEBU-golfklap dan treedt falen op als de kleilaag ergens op het talud helemaal is geërodeerd. In anderen woorden: falen treedt op wanneer de maximale gevonden erosiediepte d_e groter is dan de dikte van de kleilaag d_{klei} . Ofwel: de falen treedt op als de diepste insnijding van het restprofiel de kleilaag geheel doorsnijdt. Dit wordt bepaald door de vector (d_{min}) die de kortste afstand tussen (i) diepste insnijding door het restprofiel van de erosiekuil en (ii) de onderkant van de kleilaag, vermenigvuldigd met de naar buiten gerichte normaal (\vec{n}) van het profiel dat de onderzijde van de kleilaag beschrijft. Indien de waarde van $d_{min} \cdot \vec{n}$ kleiner is dan 0, dan treedt falen op.

De grasmat kan echter ook falen wanneer het totale erosievolume (V_e), groter is dan het aanwezige volume in de dijk (V_{max}), gegeven het erosieprofiel. In sommige gevallen, bijvoorbeeld bij een lage kruinhoogte en/of een smalle kruinlengte, kan dit optreden voordat het profiel van de erosiekuil de onderkant van de kleilaag heeft bereikt. Dit komt omdat er bij het bepalen van het erosievolume V_e tijdens fase 1 en 2 van het erosieproces geen rekening wordt gehouden met het aanwezige volume in de dijk. Om een monotoon dalende functie (bij toenemende belasting) te krijgen is de bepaling van de Z-waarde voor erosie als volgt gedefinieerd:

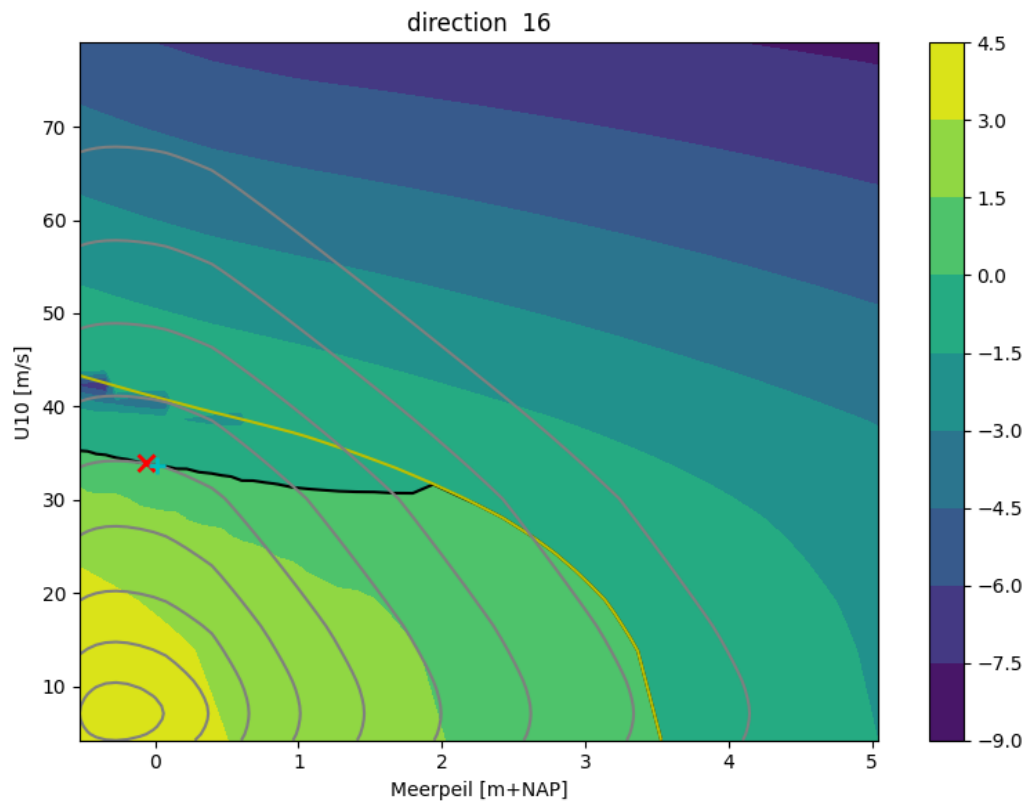
$$Z_{erosie} = \min(V_{max} - V_e; d_{min} \cdot \vec{n}) \quad (3.4)$$

Deze waarde voor FoS wordt vervolgens gebruikt in de onderstaande Z-functie. Deze Z-functie is uitgebreid ten opzichte van de functie zonder vervolproces (zoals beschreven in sectie 3.1) om te voorkomen dat in het domein van lage beta's een plateau ontstaat met afgeleide gelijk aan nul (waardoor FORM convergentie problemen kan geven):

$$Z_{GEBU-klap} = \min \left\{ \begin{array}{l} Z_{erosie} + \log_{10}(FoS_{GEBU-klap}) \\ + \max \left(\begin{array}{l} \max(0; 0.5 - H_{m0, piek}); \\ \max\left(0; -1.5 - \frac{h_{piek} - h_{trans}}{H_{m0, piek}}\right) \end{array} \right) \\ h_{kruin} - h_{piek} \end{array} \right\}; \quad (3.5)$$

De Z-functie voor het mechanisme GEBU-golfklap en gebruikmakend van de module voor het vervolproces erosie is geanalyseerd voor de drie locaties en de 16 windrichtingen. In onderstaande Figuur 3-4 zijn de resultaten voor locatie 700090 en windrichting 16 opgenomen met de lijn waar Z=0 in het zwart. Het ontwerppunt gevonden met FORM is aangegeven met de rode x en het ontwerppunt gevonden met Directional Sampling is aangegeven in het blauw. De sterkte eigenschappen in deze som zijn die voor gras met

gesloten zoden, een kleilaagdikte van 1.5 meter, en een overgangsniveau van de harde naar de zachte bekleding h_{trans} van 1.83 m+NAP. De kruinbreedte gebruikt in de voorbeeldsom is 5 meter. De gele lijn geeft aan wanneer de dijk faalt door overloop.



Figuur 3-4: 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), zwarte lijn: Z=0 functie ongecorrigeerd faalmechanisme, gele lijn: overloop.

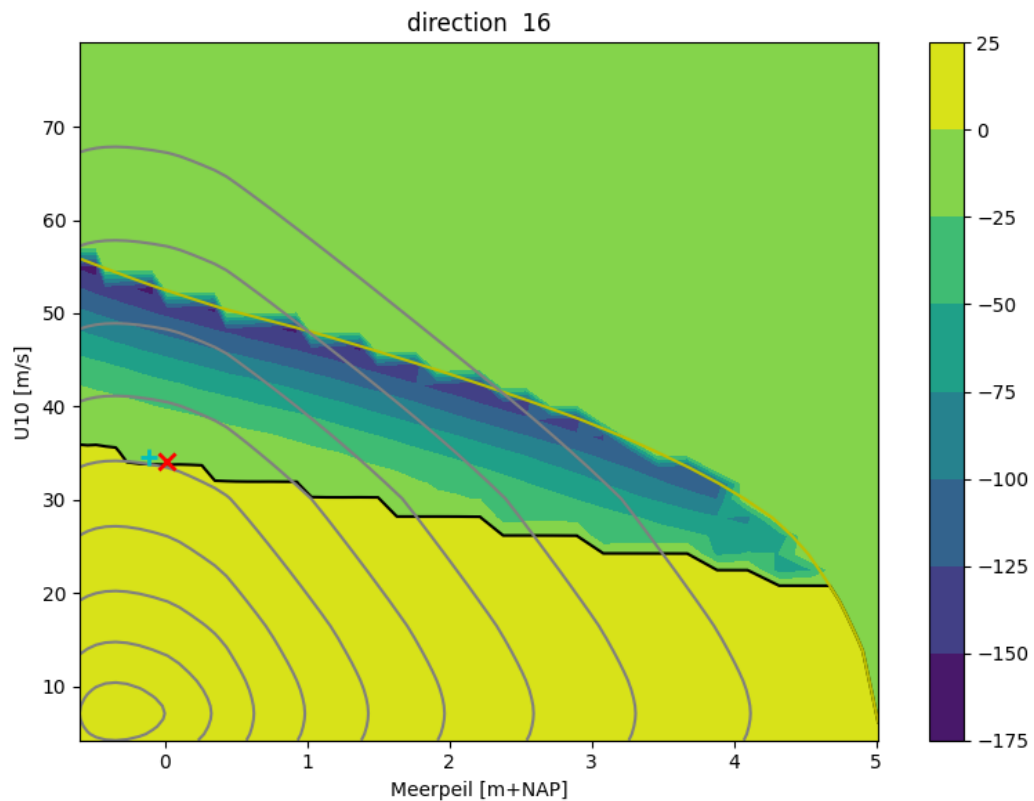
De bovenstaande analyse is uitgevoerd voor drie locaties (700090, 700094 en 700101), met elk 16 windrichtingen. De hierbij behorende afbeeldingen zijn opgenomen in Bijlage D.

Ondanks de hier gepresenteerde resultaten, welke een sterke overeenkomst laten zien tussen de FORM en Directional Sampling resultaten, wordt aanbevolen om ten alle tijden een controlesom uit te voeren met Directional Sampling omdat het erosieproces sterk niet-lineair en discontinue is.

3.4.3 GEBU – golfoploop inclusief vervolgproces erosie

De Z-functie voor het sub-model voor het vervolgproces erosie voor GEBU-oploop is gelijk aan wat omschreven is in sectie 3.4.2 (met uiteraard als verschil dat de grasmat faalt door GEBU-golfoploop). In onderstaande Figuur 3-5 zijn de resultaten van een verificatieberekening voor locatie 700101 (met dijknormaal 345°N) en windrichting 16 geplot. De figuur laat zien dat de lijn voor Z=0 (de zwarte lijn) deels onder de gele lijn ligt, welke falen door overloop aangeeft. Te zien is verder dat zowel FORM als Directional Sampling (voor windrichtingen met substantiële faalkans) tot eenzelfde ontwerp punt leiden. Onderstaande analyse is voor de drie locaties en de 16 windrichtingen uitgevoerd en de resultaten zijn bijgevoegd in Bijlage E.

In veel gevallen zal een berekening met FORM volstaan, waardoor variaties snel doorgerekend kunnen worden. Aanbevolen wordt om de uiteindelijk gekozen ontwerpwaarde eenmalig met Directional Sampling te verifiëren omdat het erosieproces sterk niet-lineair en discontinue is.

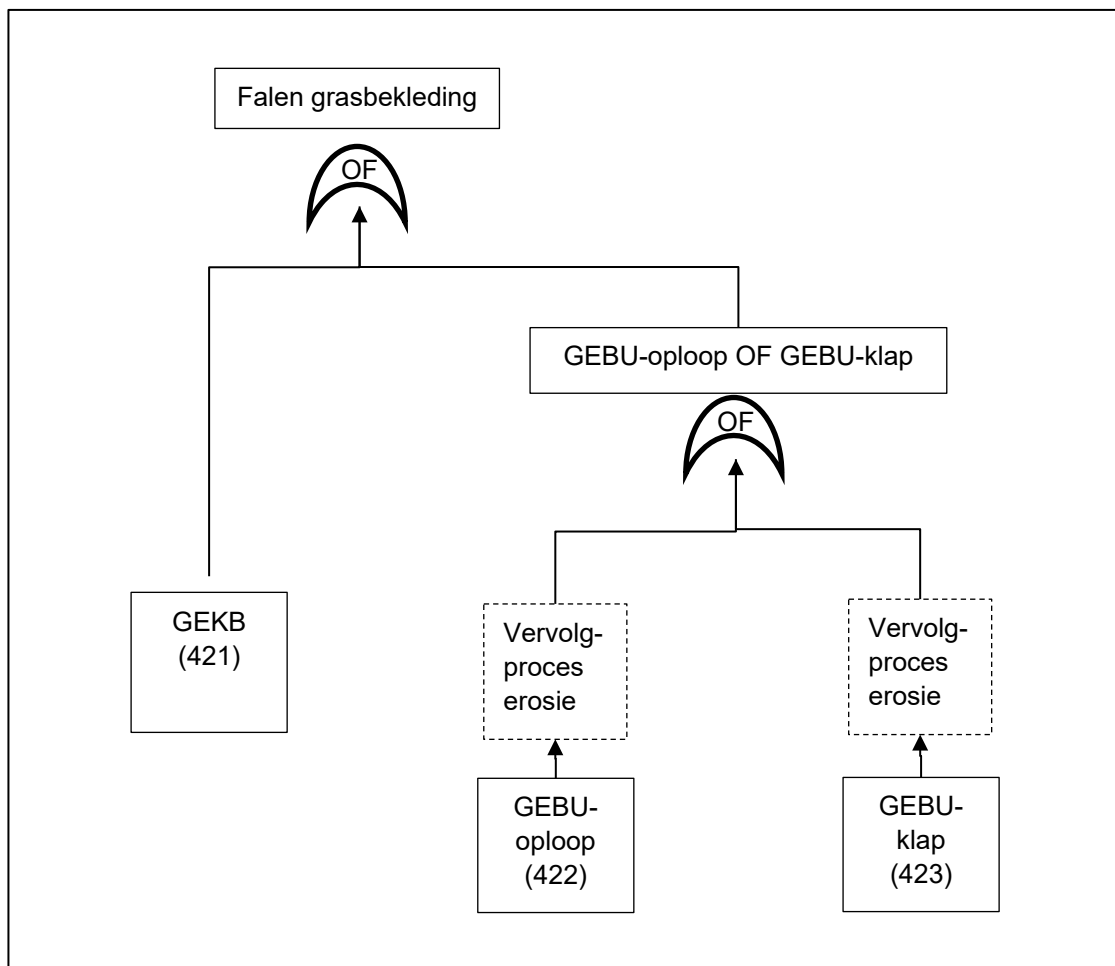


Figuur 3-5: GEBU-oploop inclusief vervolgproces erosie, kleurencontour: Z-waarde als functie van meerpeil en windsnelheid, grijze contourlijnen: lijnen met gelijke afstand tot (0,0) in de U-ruimte (1 tot en met 10), zwarte lijn: Z=0 functie ongecorrigeerd faalmechanisme, gele lijn: overloop.

3.5 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 3-6: Foutenboom voor combineren GEBU-klap, GEBU-oploop en GEKB, inclusief het vervolgproces erosie voor GEBU-klap en GEBU-oploop. Het vervolgproces erosie is gestippeld weergegeven omdat deze alleen actief is als deze geactiveerd is EN als de grasmat gefaald is door GEBU-oploop of GEBU-klap.

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 (zonder vervolgproces erosie) 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 |

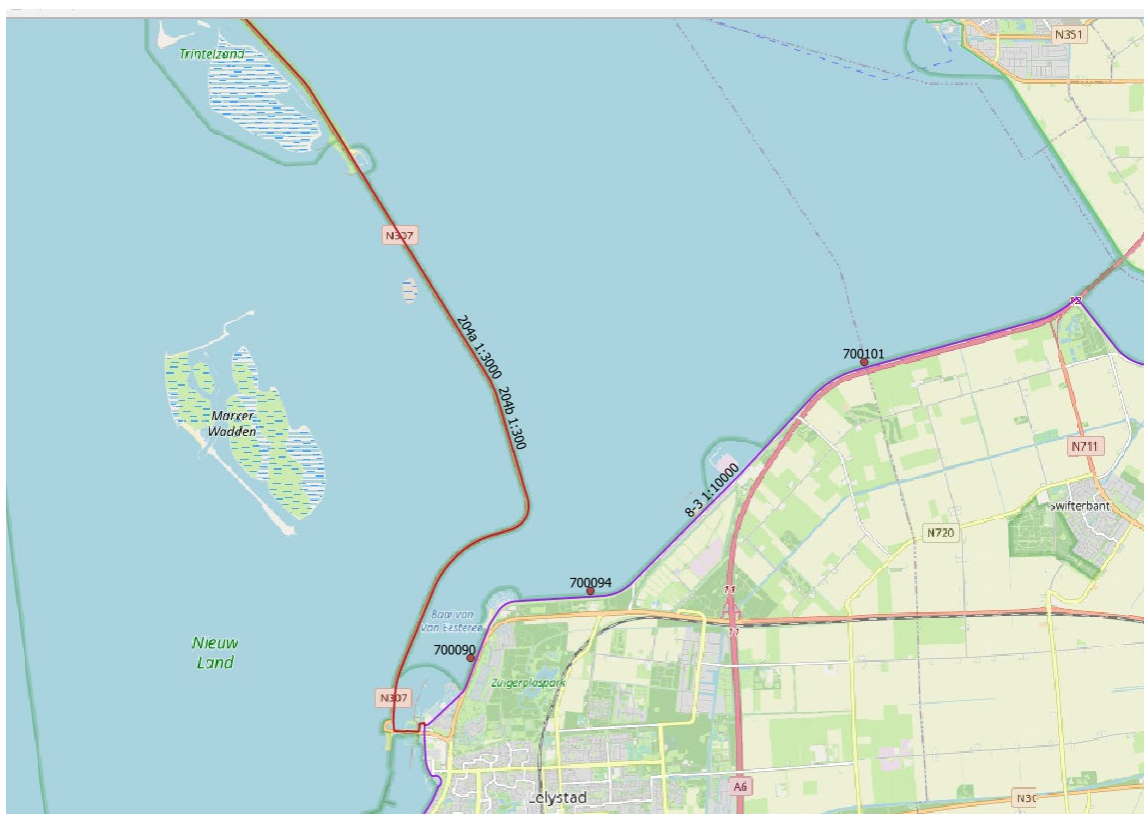
| Windrichting [graden t.o.v. Noord] | 180 | 202.5 | 225 | 247.5 | 270 | 292.5 | 315 | 337.5 |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|
| GEKB | 10.09 | 13.36 | 9.08 | 7.84 | 6.21 | 5.31 | 4.98 | 4.99 |
| GEBU-oploop | 10.09 | 13.06 | 8.79 | 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 Integratietests

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 tot 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.

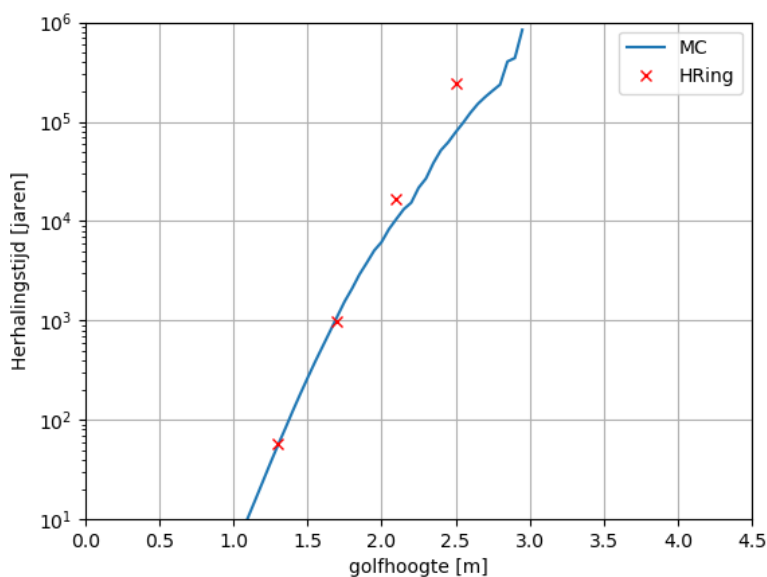
De berekeningsresultaten voor locatie 700090 zijn opgenomen in Tabel 4-4. Te zien is dat de verschillen tussen beide aanpakken voor deze locatie relatief groot zijn. Voor GEKB wordt dit veroorzaakt door het feit dat de rekenwaarde van het kritieke overslagdebiet niet meer past bij de golfcondities van 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

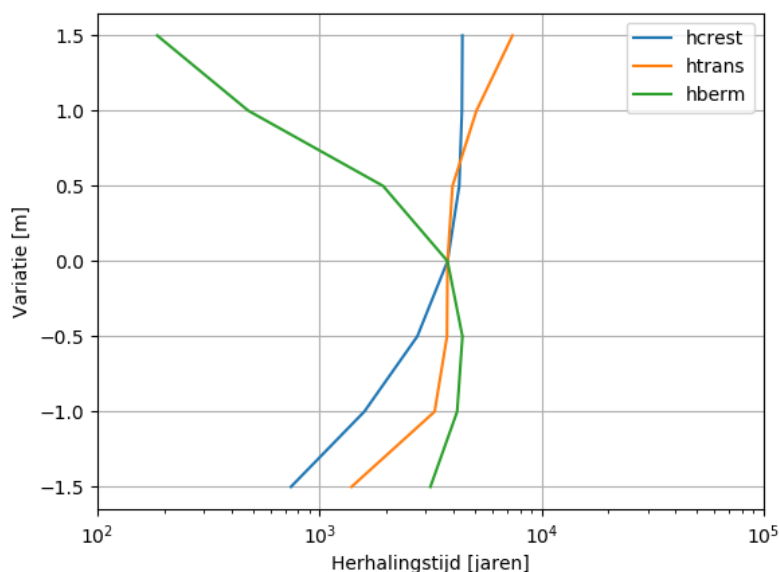
Ten behoeve van de validatie van het volledig probabilistische model zijn voor de drie beschouwde locaties gevoeligheidsberekeningen uitgevoerd (zonder het vervolgproces erosie). Het betreft variaties van de hoogteligging (-1.5 meter tot +1.5 meter met stappen van 0.5 meter) van de belangrijkste componenten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

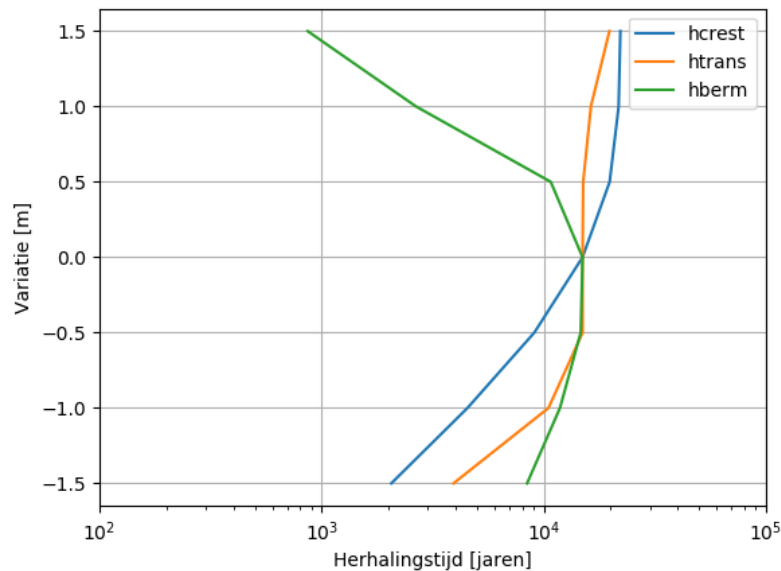
Figuur 4-3 toont de resultaten van de gevoeligheidsanalyse voor locatie 700101. De afbeelding laat zien dat met een afname van de kruinhoogte (h_{crest}) de faalkans toeneemt, maar dat met een toename van de kruinhoogte de faalkans slechts beperkt afneemt. Dit is het gevolg van het feit dat bij hogere 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.

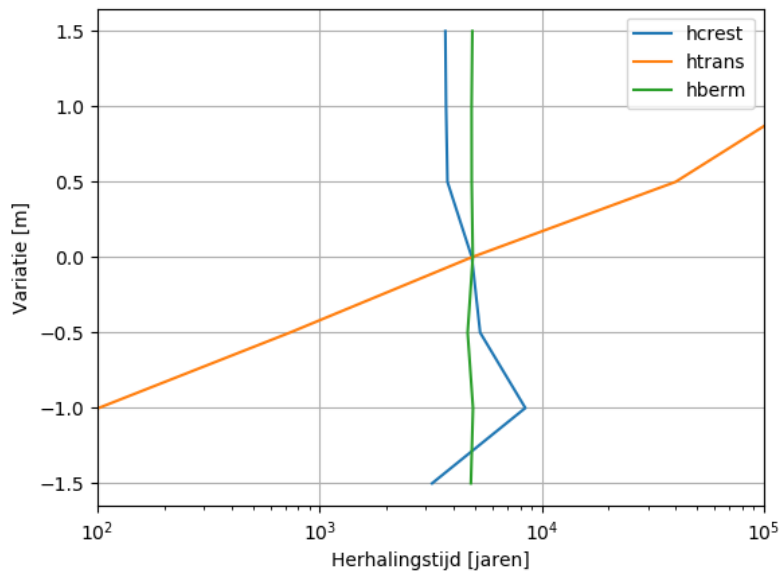
Voor locatie 700094 wordt een vergelijkbaar beeld gevonden, zie Figuur 4-4. Ook hier heeft het verhogen van de kruin met meer dan 1.0 meter geen invloed meer op de faalkans omdat het falen dan gedomineerd wordt door het mechanisme GEBU. Omgekeerd heeft een variatie van de hoogte van de overgang pas effect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

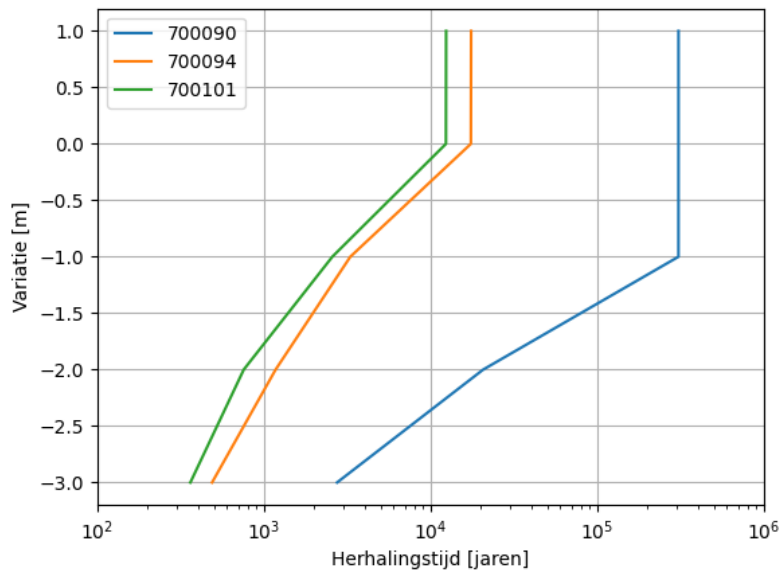
Eenzelfde analyse uitgevoerd voor locatie 700090. Voor deze locatie geldt dat de faalkans gedomineerd wordt door het mechanisme GEBU en niet door GEKB. Als gevolg hiervan is een sterke gevoeligheid voor de hoogte van de overgang (“htrans”) te zien over het gehele bereik en geen/nauwelijks gevoeligheid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

In aanvulling op de bovenstaande gevoeligheidsberekeningen is voor de drie beschouwde locaties ook een gevoeligheidsberekening gedaan in geval het vervolproces voortschrijdende erosie wordt geactiveerd. Hiervoor is gevarieerd met de dikte van de aanwezige kleilaag. Omdat de faalkans zonder het meenemen van het vervolproces al heel klein is, is ervoor gekozen om voor alle locaties $h_{trans} = 2.0 [m + NAP]$ en $D_{combined} = 0.0 [m]$ te hanteren. De resulterende overschrijdingscurves zijn getoond in Figuur 4-6. Te zien is dat de faalkans afneemt met toenemende kleilaagdikte, totdat sprake is van falen door overloop: dan wordt de faalkans ongevoelig voor variaties in de kleilaagdikte.



Figuur 4-6: Gevoeligheidsanalyse kleilaagdikte in vervolproces voortschrijdende erosie.

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_v2.0.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). Deze plug-in kan ook gebruikt worden in combinatie met een aangepaste versie van Hydra-Ring waarbij de coëfficiënten van de voorlandmodule ontsloten zijn, zie Deltares (2023b).

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 (configuratedatabase). In de voorbeeld bestanden staat hier “.\config_combinedGEKBandGEBU.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. Indien relevant, alleen bij meenemen voorland, dient ook de oriëntatie van de dijknormaal, gemarkeerd in groen, aangepast te 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^{de} waarde (in dit geval “15”) te wijzigen. De nummers van de sterktevariabelen worden onderstaand toegelicht. De 7^{de}, 8^{ste} en 9^{de} 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^{de} 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^{de} veld) aan te geven in het 4^{de} 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^{de} veld: VariabeleID: niet wijzigen, te gebruiken in tabel DesignTables
 - 6^{de} veld: waarde: indien de variabele een determinist is, dan kan hier de getalswaarde worden ingevuld
 - 7^{de} 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 (2023a))
 - 8^{ste} veld: gemiddelde waarden (mu) van de gedefinieerde kansverdeling
 - 9^{de} veld: standaardafwijking (sigma) van de gedefinieerde kansverdeling
 - 10^{de} veld: ondergrens van de getrunceerde kansverdeling
 - 11^{de} 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. Optioneel kan ook gerekend worden met het proces voortschrijdende erosie, dat levert dan een 6^{de} groep van variabelen op. 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 |
| Δt | 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 |
|-----------------------------------------|------------|---------------------|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Slope _{lower} ($\tan\alpha$) | 10 | [-] | verdelingstype=0 | Taludhelling ondertalud |
| Slope _{upper} ($\tan\alpha$) | 11 | [-] | verdelingstype=0 | Taludhelling boventalud |
| Teen niveau | 12 | [m+NAP] | verdelingstype=0 | |
| Berm niveau | 13 | [m+NAP] | verdelingstype=0 | Waarde moet liggen tussen Teen niveau en Kruinhoogte |
| Berm lengte | 14 | [meters] | verdelingstype=0 | Berm lengte (-9 = geen berm) |
| Kruinhoogte | 15 | [m+NAP] | verdelingstype=0 | Moet groter zijn dan overgang hard/zacht |
| Dijk normaal | 16 | [°N] | verdelingstype=0 | Waarde tussen 0° en 360° |
| $\gamma_{f,talud}$ | 17 | [-] | verdelingstype=0 | Zie TAW (2002) |
| Overgang hard/zacht | 18 | [m+NAP] | verdelingstype=0 | Moet kleiner zijn dan kruinhoogte |
| Δz | 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 |
|------------|------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Δt | 20 | 900 [s] | verdelingstype=0 | |
| U_c | 21 | [m/s] | verdelingstype=19 Lower=0.0 Upper=12.0 | Mu en sigma conform Deltares (2019b) |
| α_M | 22 | 1.1 [-] | verdelingstype=0 | Conform Deltares (2019b), zie onderstaand |
| α_a | 23 | 1.4 [-] | verdelingstype=0 | Conform Deltares (2019b), zie onderstaand |
| α_S | 24 | 1.0 [-] | verdelingstype=0 | Conform Deltares (2019b), zie onderstaand |
| c_u | 25 | 1.45 [-] | verdelingstype=0 | |
| D_{crit} | 26 | [m ² /s ²] | 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 α_M , α_a en α_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 α_M , α_a en α_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 |
|-----------------------|------------|----------------------------------------|----------|---------------------------------------------------------|
| Δt | 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 ² /s ²] | 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 |
|----------------|------------|---------------------|----------|-------------------------------------------|
| Δt | 40 | 900 [s] | Nee | |
| a | 41 | [-] | Nee | Zie RWS (2019) voor waarde a |
| b | 42 | [-] | Nee | Zie RWS (2019) voor waarde b |
| c | 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 $D_{combined}$ |
| λ_2 | 46 | 20 [-] | Nee | Coëfficiënt gladde functie (2.18) |
| λ_2 | 47 | 0 [-] | Nee | Coëfficiënt gladde functie (2.18) |

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

Indien het vervolgproces erosie wordt meegenomen in de berekening dienen er een aantal extra variabelen gedefinieerd te worden. Deze zijn samengevat in Tabel 5-6.

| Naam | VariableID | Voorgestelde waarde | Stochast | Toelichting |
|--------------------------------------------------------|------------|---------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kruinbreedte | 53 | [m] | verdelingstype=0 | Breedte van de kruin |
| Slope_{inner} ($\tan\alpha$) | 54 | [-] | verdelingstype=0 | Binnen talud |
| d_{klei} | 55 | [m] | verdelingstype=0 | Dikte van de kleilaag |
| $d_{1,2}$ | 56 | [m] | verdelingstype=0 | Dikte van de klei die erodeert met het falen van het gras |
| m_1 | 57 | [-] | verdelingstype=19 Lower=0.0 Upper=5 | m_1 = modelonzekerheid eerste fase van het erosieproces, waarden conform Deltares (2022) |
| m_2 | 58 | [-] | verdelingstype=19 Lower=0.0 Upper=5 | m_2 = modelonzekerheid tweede fase van het erosieproces, waarden conform Deltares (2022) |

Tabel 5-6: Variabelen met betrekking tot het mechanisme vervolgproces erosie voor GEBU-klap en GEBU-oploop

In het geval dat gebruik gemaakt wordt van de optie om het vervolgproces voortschrijdende erosie mee te nemen, dan moet Hydra-Ring weten dat met deze extra variabelen gewerkt moet worden, dat kan door de mechanismen te koppelen aan een submodel. Dit wordt gerealiseerd door in het invoerbestand het submodel per mechanisme te activeren. Om het vervolgproces erosie te activeren moeten de volgende regels worden toegevoegd aan het bestand "1.sql" (alleen mogelijk voor mechanismen GEBU-golfoploop – 422, GEBU-golfklap – 423).

```
INSERT INTO [SectionSubMechanismModels] VALUES( 1, 1, 1, 422, 204);
INSERT INTO [SectionSubMechanismModels] VALUES( 1, 1, 1, 423, 204);
```

De volgende SubmechanismModellen zijn vooralsnog beschikbaar:

- 202: met ontsluiting voorland-coëfficiënten, wel vervolgproces
- 204: zonder ontsluiting voorland-coëfficiënten, wel vervolgproces
- 205: met ontsluiting voorland-coëfficiënten, zonder vervolgproces
- 206: zonder ontsluiting voorland-coëfficiënten, zonder vervolgproces

Hierbij wordt opgemerkt dat SubMechanismModels 202 en 205 alleen van toepassing zijn in combinatie met de Hydra-Ring versie waarin de coëfficiënten van de voorlandmodule zijn ontsloten, zie Deltares (2023b).

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 3.5 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 | LosingSituationId | SubmechanismId | CounterId | NumberIterations | Convergence |
|------------------|----------|-----------|---------|---------------|-----------------|-------------------|----------------|-----------|------------------|-------------|
| 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 tijdintegratie 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 | LosingSituationId | 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 oloop | "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), Δ_g de relatieve dichtheid van de kleilaag, d_{klei} de dikte van de kleilaag en α 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 volstaan, echter uit bovenstaande formule blijkt dat de kwaliteit van de graszode geen rol speelt bij de beoordeling van de veiligheid voor GABU⁴. 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.

⁴ In de fenomenologische beschrijving wordt wel geïmpliceerd dat treksterkte van de zode enige invloed kan hebben. Hierover is verder echter niets bekend.

Overigens is dat geen gevolg van het veranderen van de faalkansbegroting, maar überhaupt een gevolg van de opzet van de beoordelingsregel.

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 oploopzone 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 (5% + 24% = 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

Cody and Thacher (1968). Rational Chebyshev Approximations for the Exponential Integral $E_1(x)$. Math. Comp. Math. Comp. 22, 641-649.

Cody and Thacher (1969). Chebyshev Approximations for the Exponential Integral $E_i(x)$. Math. Comp. Math. Comp. 23, 289-303.

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 (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.

Deltares (2022). Erosie van kleibekleding met gras op boventalud van Waddenzeedijken. Analyse van de Deltagootproeven en berekeningen met OpenFoam. Deltares rapport 11204841-006-HYE-0011. M. Klein Breteler. Januari 2022.
https://publications.deltares.nl/11204841_006_0011.pdf

Deltares (2023a). Hydra-Ring, Technical Design of Hydra-Ring. Deltares rapport 11209269-008-GEO-0003. Versie 8.0. Juni 2023.

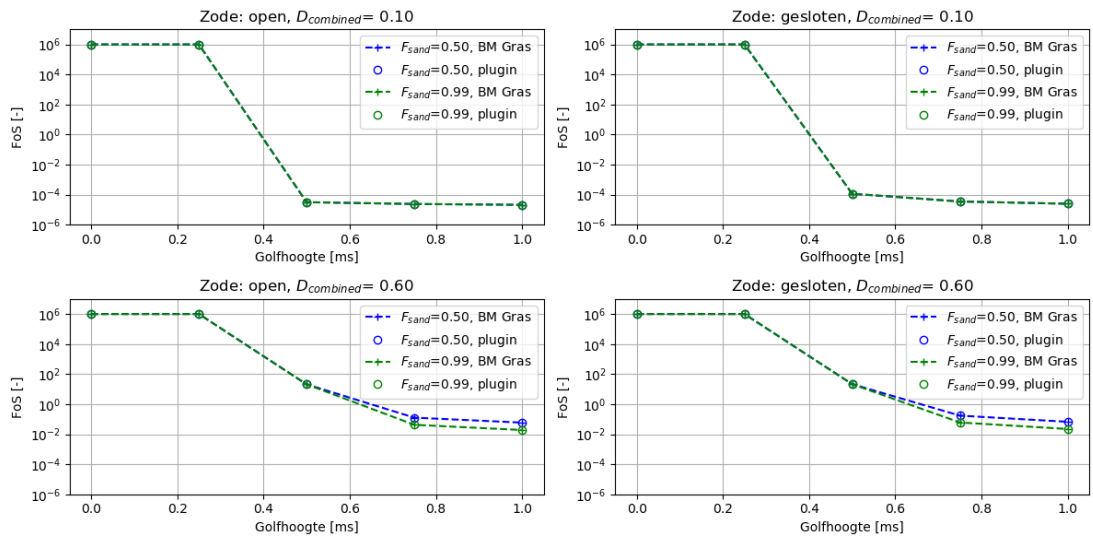
Deltares (2023b). Ontsluiting coëfficiënten voorlandmodule van Hydra-Ring. Deltares memo, A.J. Smale, 29 juni 2023.

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

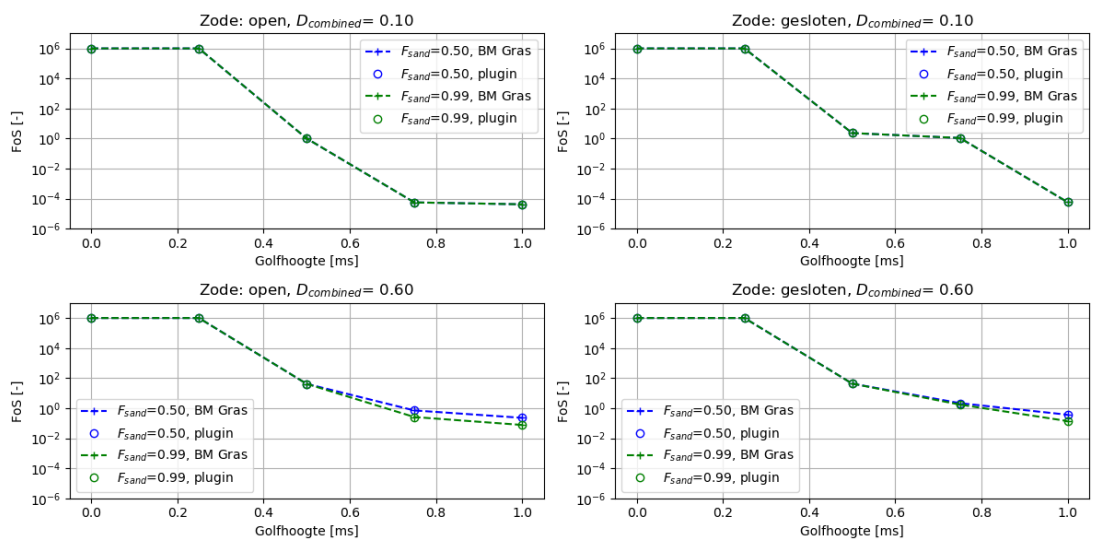
TAW (2002). Technisch Rapport Golfoploop en Golfoverslag bij Dijken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. Delft, mei 2002.

A. Resultaat verkenning toegevoegde waarde bundelen GEBK en GEBU

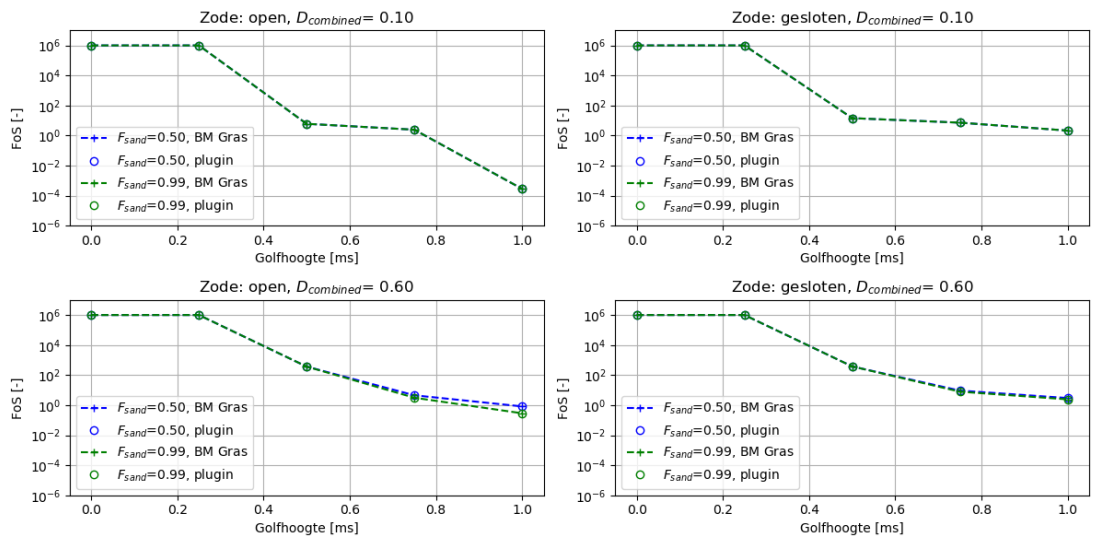
B. Validatie GEBU-klap



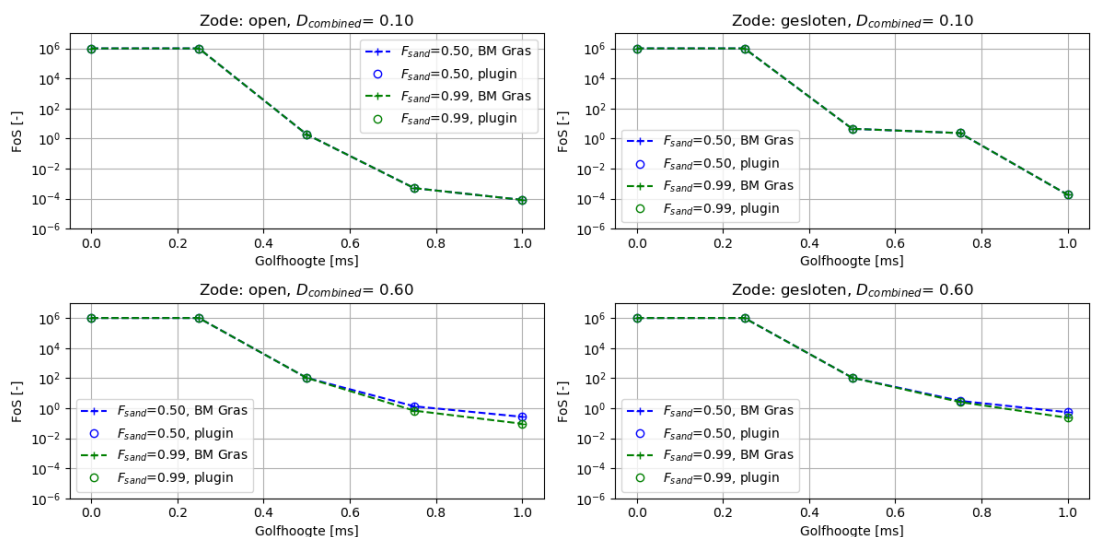
Figuur B-1: Validatie implementatie GEBU-klap, reekstype = 0. Links: open zode, rechts gesloten zode. Boven: $D_{combined}=0.1$, onder: $D_{combined}=0.6$. Blauw: $F_{sand}=0.5$, groen: $F_{sand}=0.9$. '+-': resultaat BM Gras, 'o': resultaat "plug-in".



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".

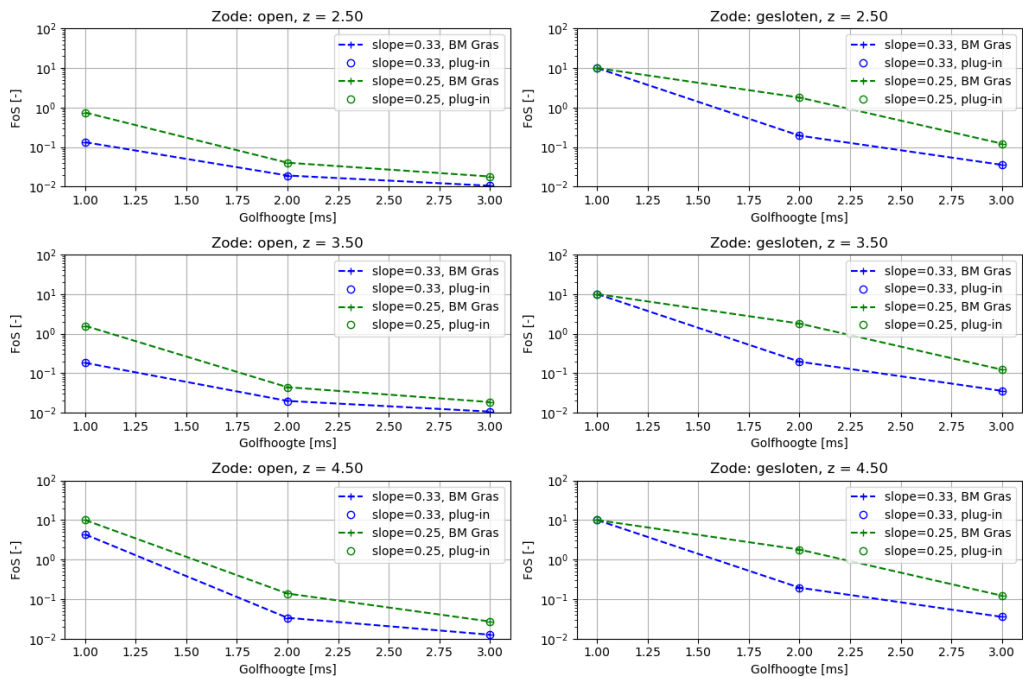


Figuur B-3: Validatie implementatie GEBU-klap, reekstype = 2. Links: open zode, rechts gesloten zode. Boven: $D_{combined}=0.1$, onder: $D_{combined}=0.6$. Blauw: $F_{sand}=0.5$, groen: $F_{sand}=0.9$. '+-': resultaat BM Gras, 'o': resultaat "plug-in".

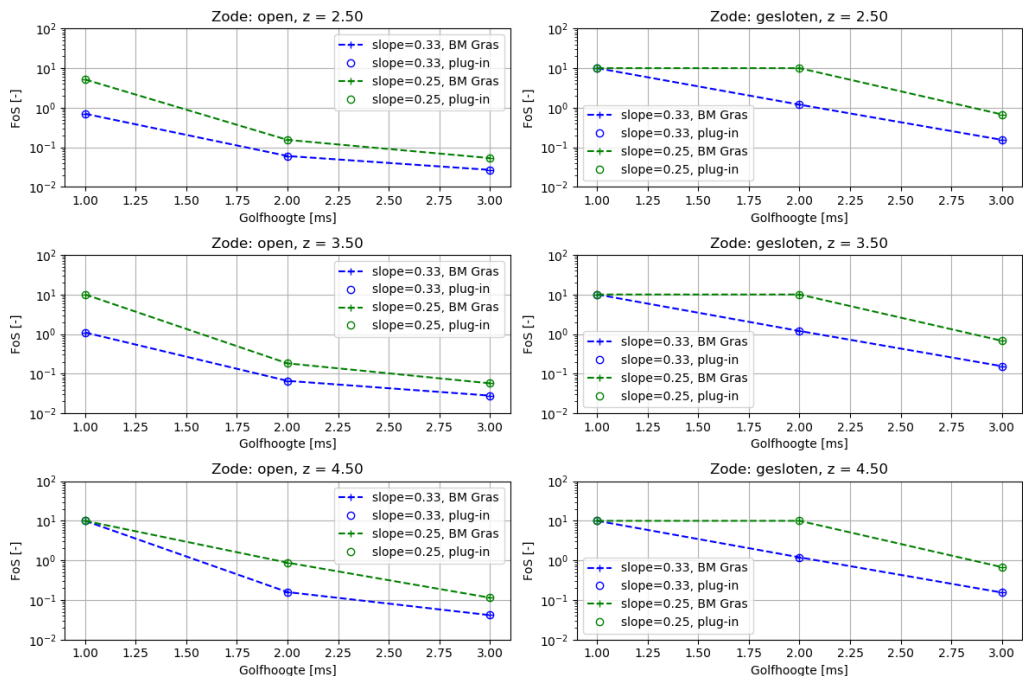


Figuur B-4: Validatie implementatie GEBU-klap, reekstype = 3. Links: open zode, rechts gesloten zode. Boven: $D_{combined}=0.1$, onder: $D_{combined}=0.6$. Blauw: $F_{sand}=0.5$, groen: $F_{sand}=0.9$. '+-': resultaat BM Gras, 'o': resultaat "plug-in".

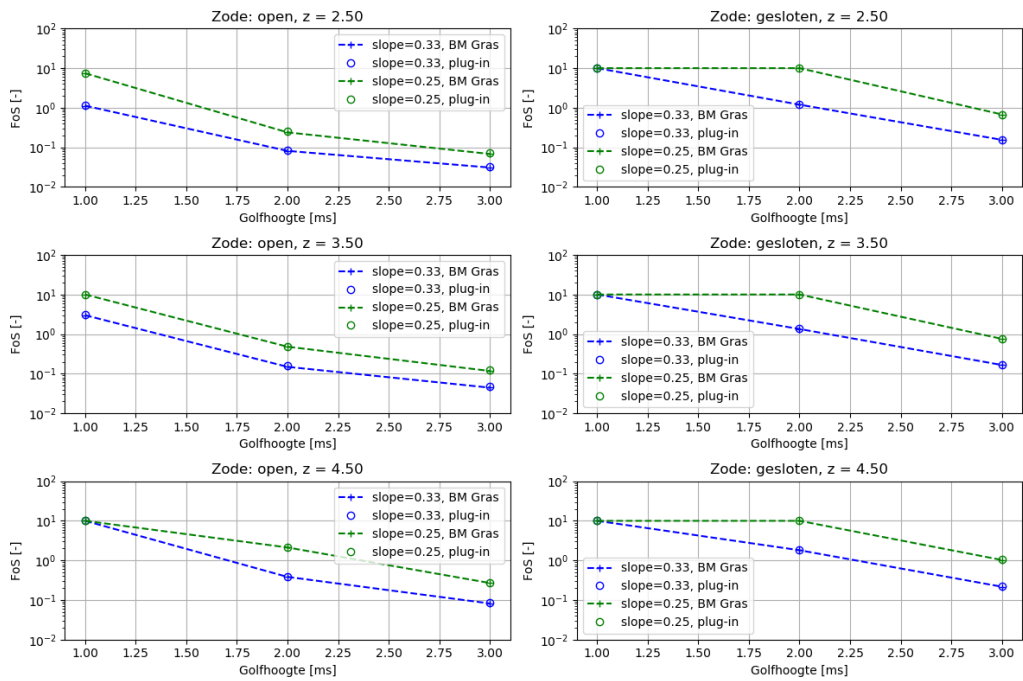
C. Validatie GEBU-oploop



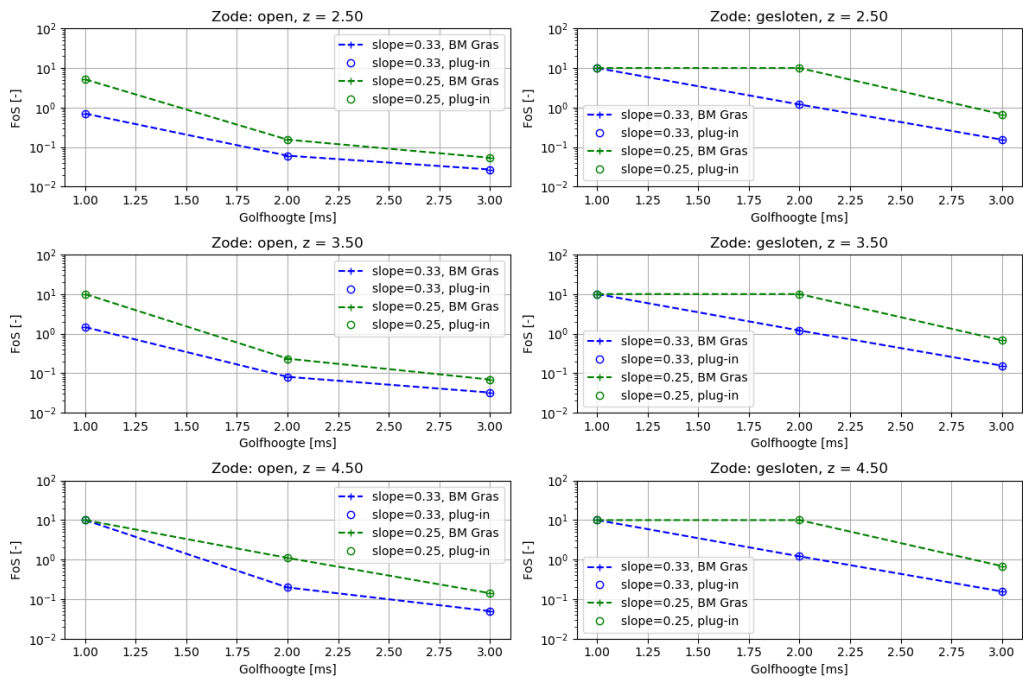
Figur C-1: Validatie implementatie GEBU-oploop, reekstype = 0. Links: open zode, rechts gesloten zode. Boven: $z = 2.50$ [m+NAP], midden: $z = 3.5$ pm+NAP], onder: $z = 4.5$ [m+NAP]. Blauw: $\tan\alpha = 0.33$ Groen: $\tan\alpha = 0.25$. '+-': resultaat BM Gras, 'o': resultaat "plug-in".



Figur 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".

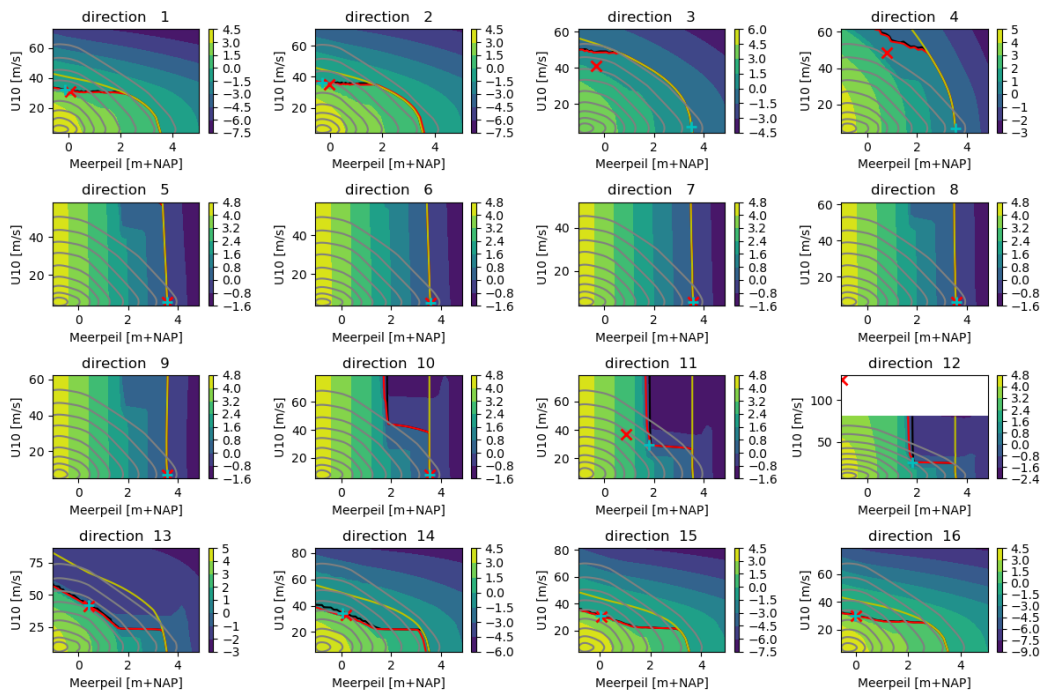


Figur C-3: Validatie implementatie GEBU-oploop, reekstype = 2. Links: open zode, rechts gesloten zode. Boven: $z = 2.50$ [m+NAP], midden: $z = 3.5$ pm+NAP], onder: $z = 4.5$ [m+NAP]. Blauw: $\tan\alpha = 0.33$ Groen: $\tan\alpha = 0.25$. '+-': resultaat BM Gras, 'o': resultaat "plug-in".

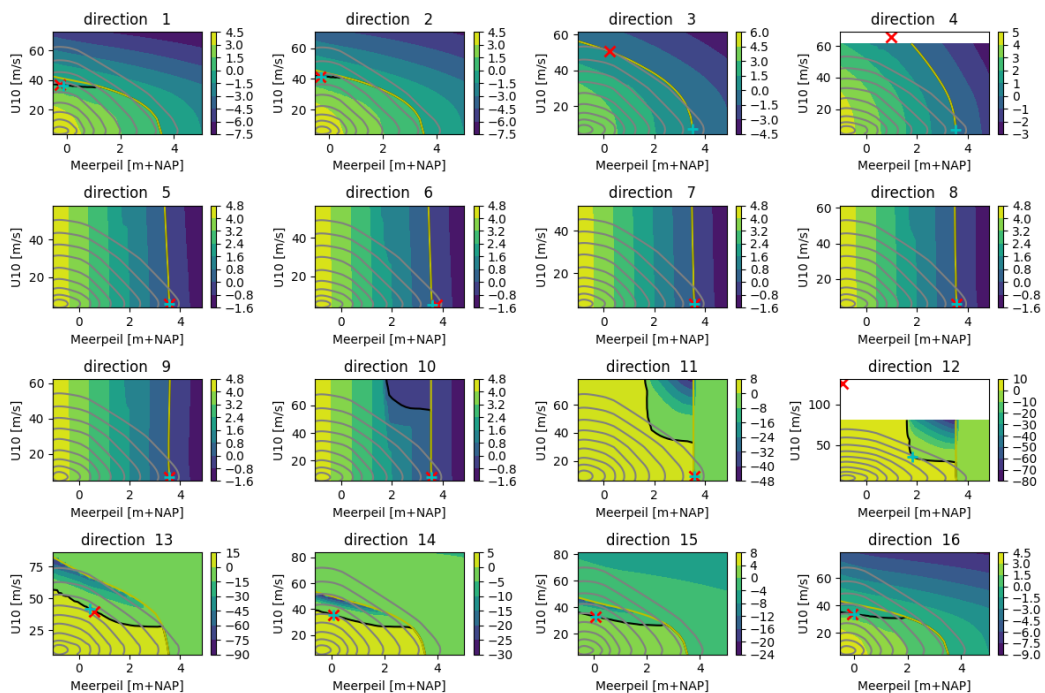


Figur C-4: Validatie implementatie GEBU-oploop, reekstype = 3. Links: open zode, rechts gesloten zode. Boven: $z = 2.50$ [m+NAP], midden: $z = 3.5$ pm+NAP], onder: $z = 4.5$ [m+NAP]. Blauw: $\tan\alpha = 0.33$ Groen: $\tan\alpha = 0.25$. '+-': resultaat BM Gras, 'o': resultaat "plug-in".

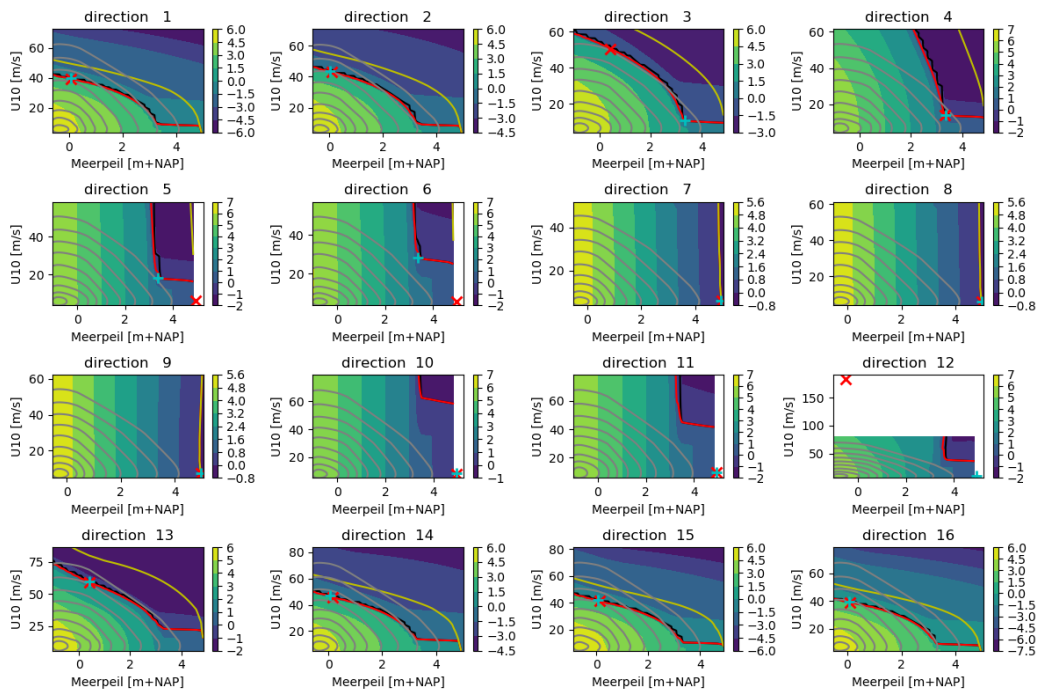
D. Controle U-ruimte GEBU-klap



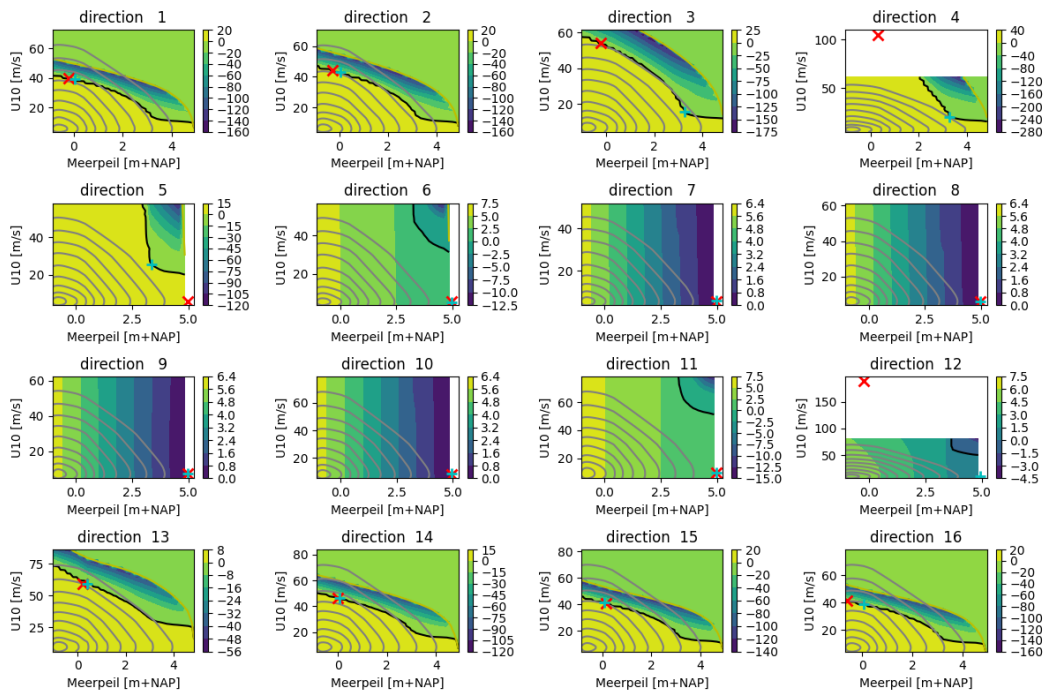
Figuur D-1: GEBU-golfklap, locatie 700090, kleurencontour: Z-waarde als functie van meerpeil en windsnelheid, grijze contourlijnen: Lijnen met gelijke afstand tot (0,0) in de U-ruimte (1 tot en met 10), rode lijn: Z=0 functie, zwarte lijn: Z=0 functie ongecorrigeerd faalmechanisme, gele lijn: overloop.



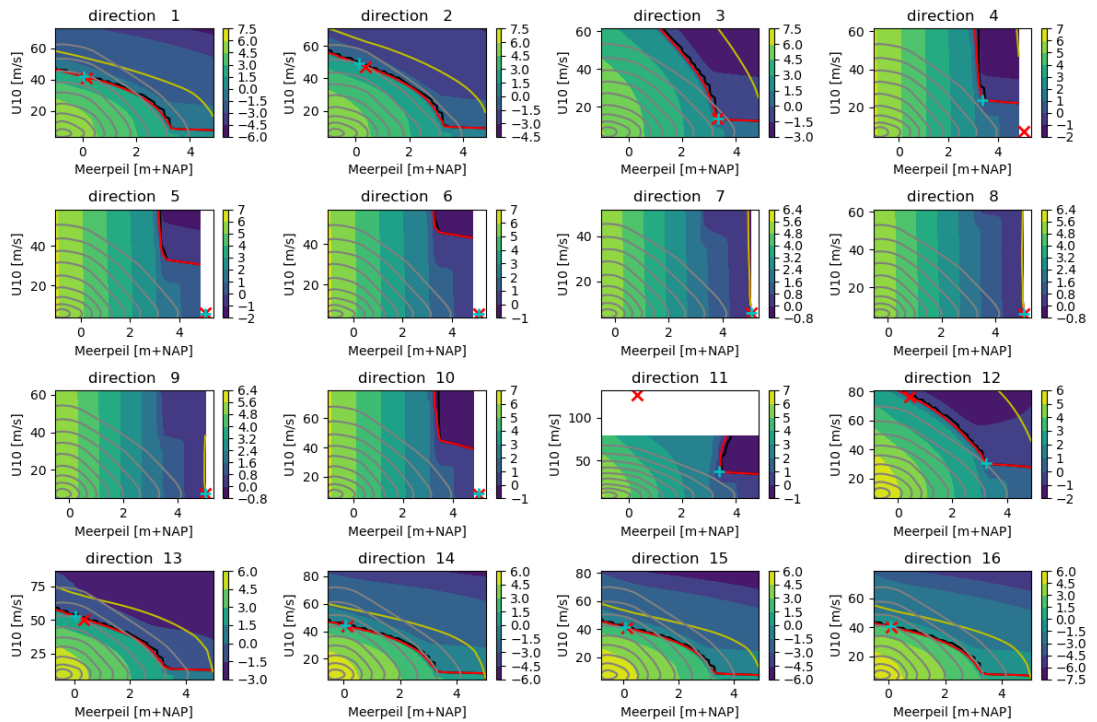
Figuur D-2 GEBU-golfklap inclusief vervolgproces erosie, locatie 700090, kleurencontour: Z-waarde als functie van meerpeil en windsnelheid, grijze contourlijnen: Lijnen met gelijke afstand tot (0,0) in de U-ruimte (1 tot en met 10), rode lijn: Z=0 functie, zwarte lijn: Z=0 functie ongecorrigeerd faalmechanisme, gele lijn: overloop.



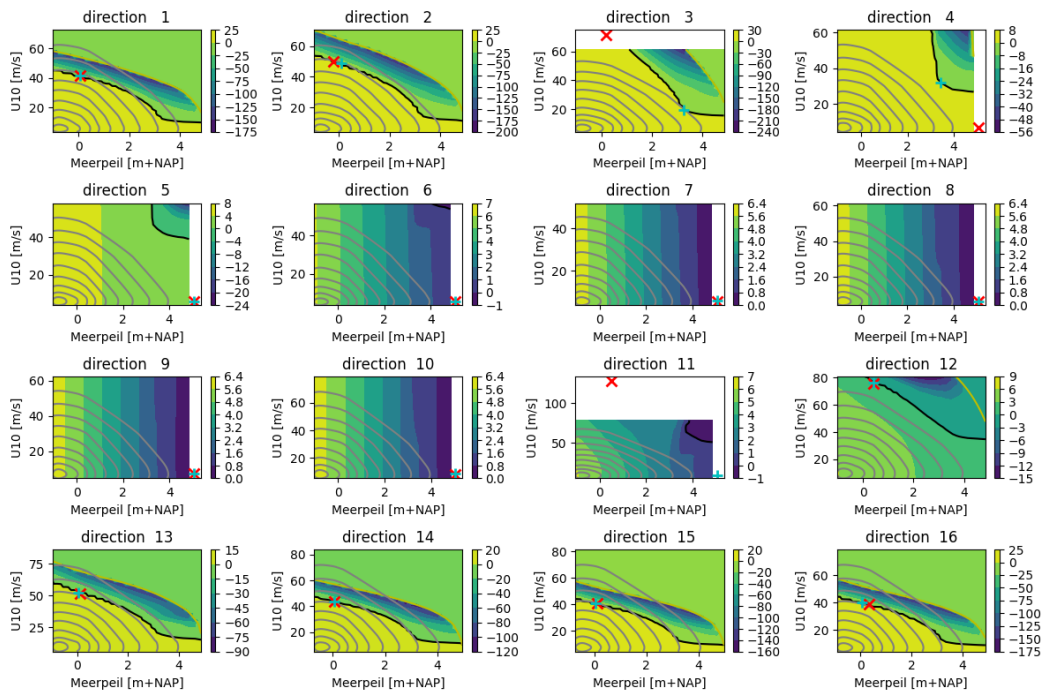
Figuur D-3: GEBU-golfklap, locatie 700094, kleurencontour: Z-waarde als functie van meerpeil en windsnelheid, grijze contourlijnen: Lijnen met gelijke afstand tot (0,0) in de U-ruimte (1 tot en met 10), rode lijn: Z=0 functie, zwarte lijn: Z=0 functie ongecorrigeerd faalmechanisme, gele lijn: overloop.



Figuur D-4: GEBU-golfklap inclusief vervolgproces erosie, 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.

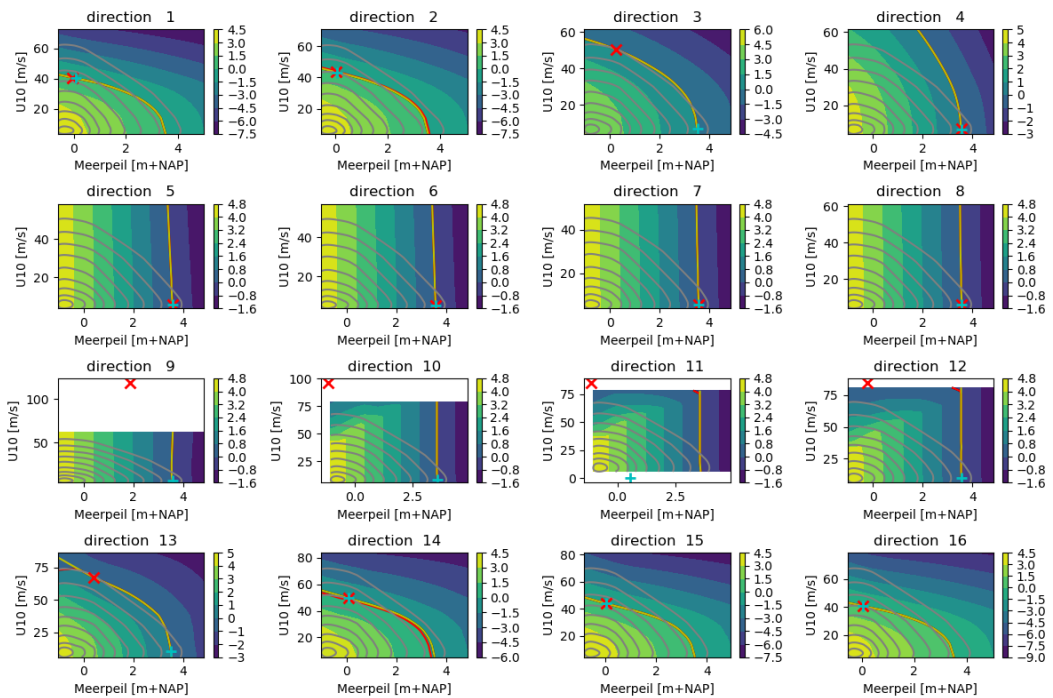


Figuur D-5: GEBU-golfklap, locatie 700101, kleurencontour: Z-waarde als functie van meerpeil en windsnelheid, grijze contourlijnen: Lijnen met gelijke afstand tot (0,0) in de U-ruimte (1 tot en met 10), rode lijn: Z=0 functie, zwarte lijn: Z=0 functie ongecorrigeerd faalmechanisme, gele lijn: overloop.

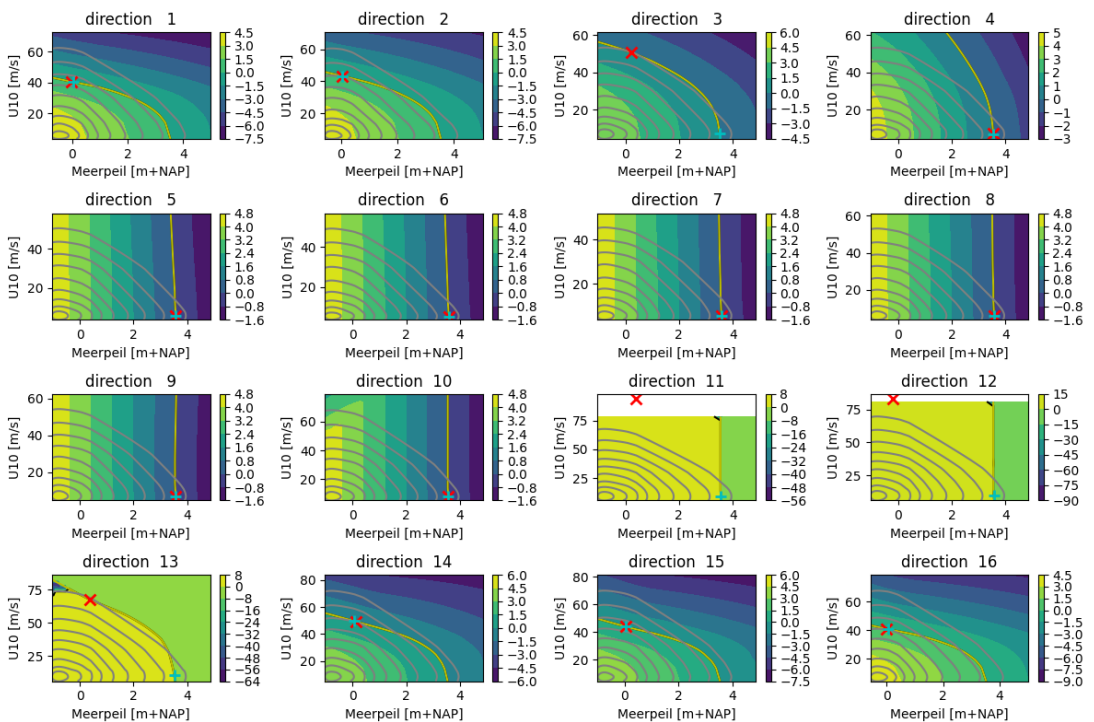


Figuur D-6: GEBU-golfklap inclusief vervolgproces erosie, locatie 700101, kleurencontour: Z-waarde als functie van meerpeil en windsnelheid, grijze contourlijnen: Lijnen met gelijke afstand tot (0,0) in de U-ruimte (1 tot en met 10), rode lijn: Z=0 functie, zwarte lijn: Z=0 functie ongecorrigeerd faalmechanisme, gele lijn: overloop.

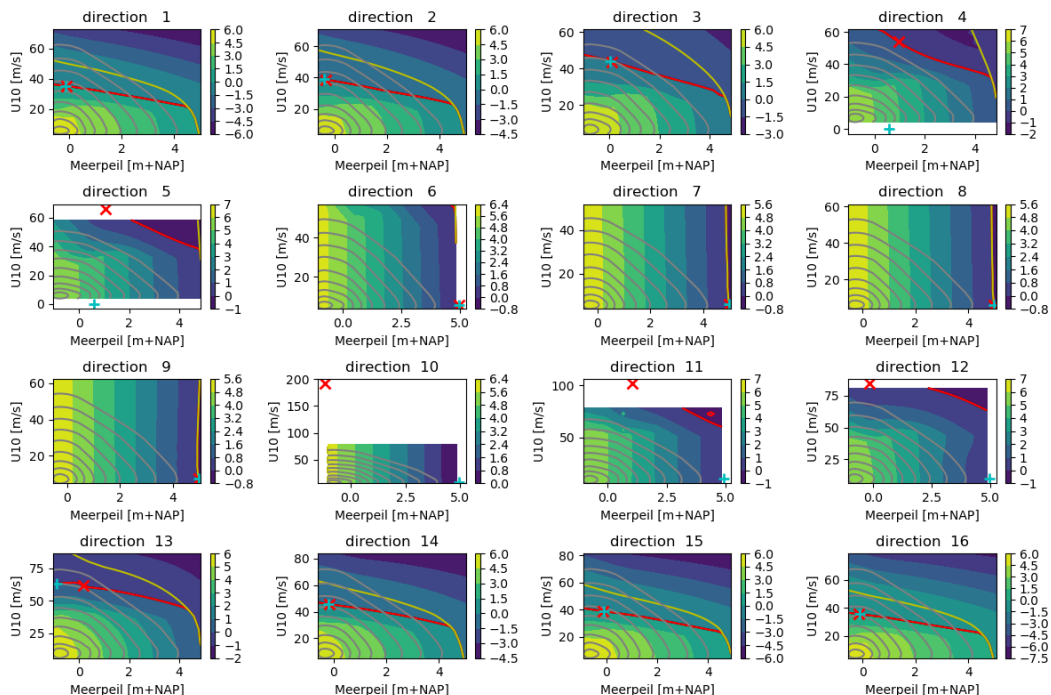
E. Controle U-ruimte GEBU-oploop



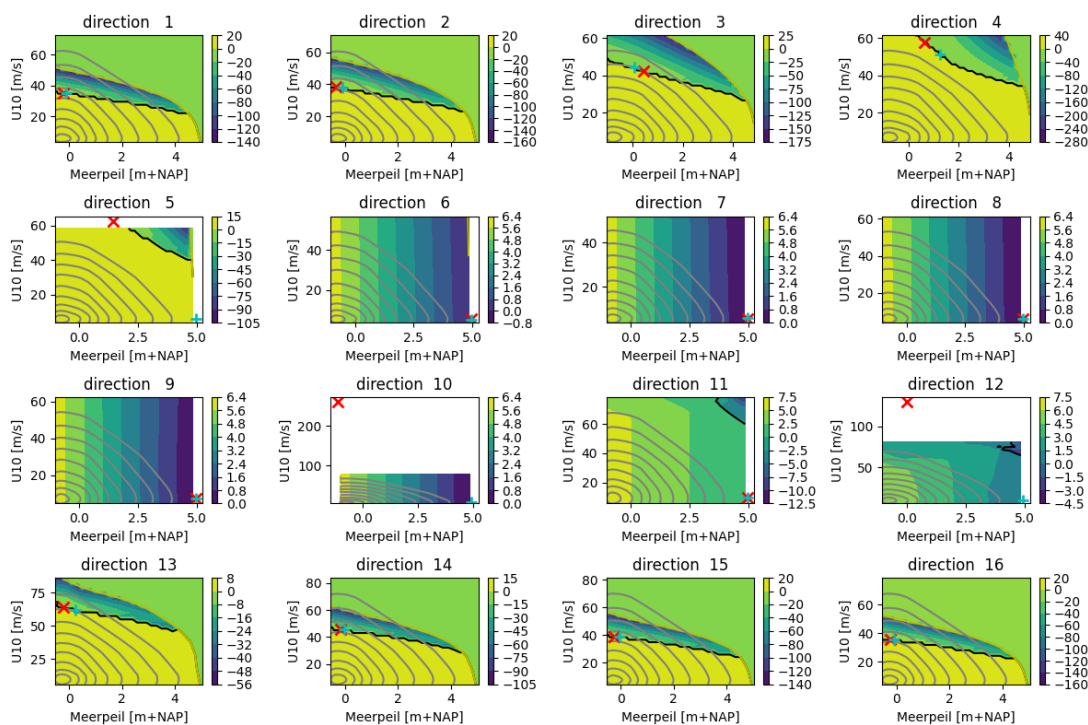
Figuur E-1: GEBU-golfoploop, locatie 700090, kleurencontour: Z-waarde als functie van meerpeil en windsnelheid, grijze contourlijnen: Lijnen met gelijke afstand tot (0,0) in de U-ruimte (1 tot en met 10), rode lijn: Z=0 functie, gele lijn: overloop.



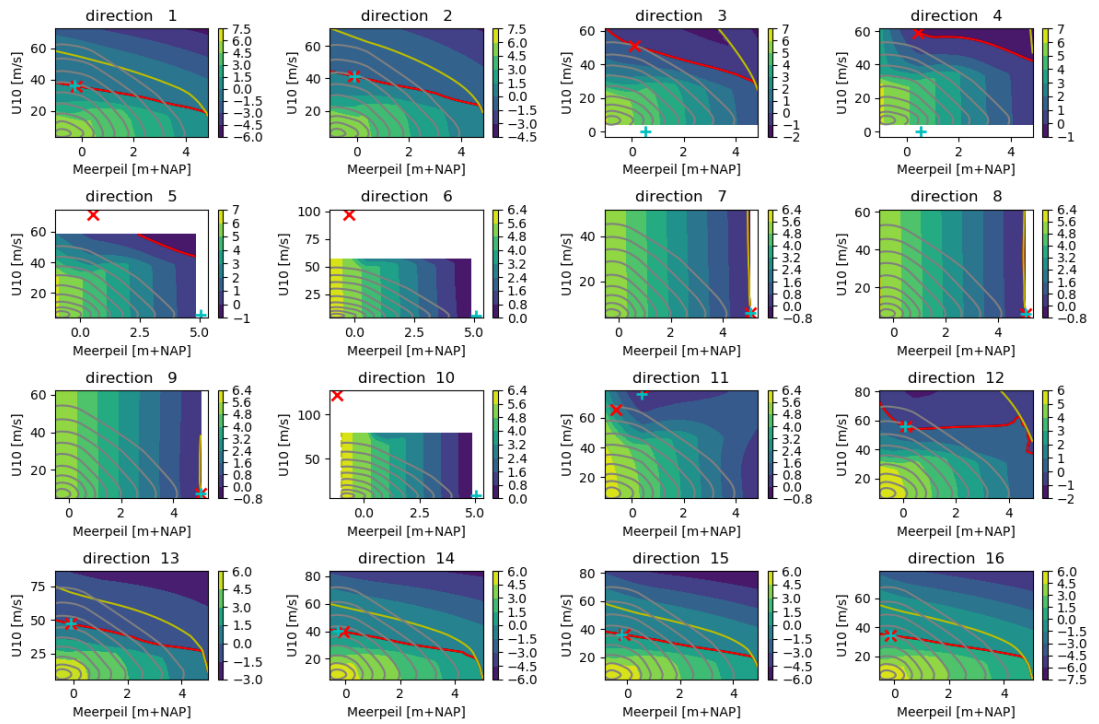
Figuur E-2: GEBU-golfoploop inclusief vervolgproces erosie, locatie 700090, kleurencontour: Z-waarde als functie van meerpeil en windsnelheid, grijze contourlijnen: Lijnen met gelijke afstand tot (0,0) in de U-ruimte (1 tot en met 10), rode lijn: Z=0 functie, gele lijn: overloop.



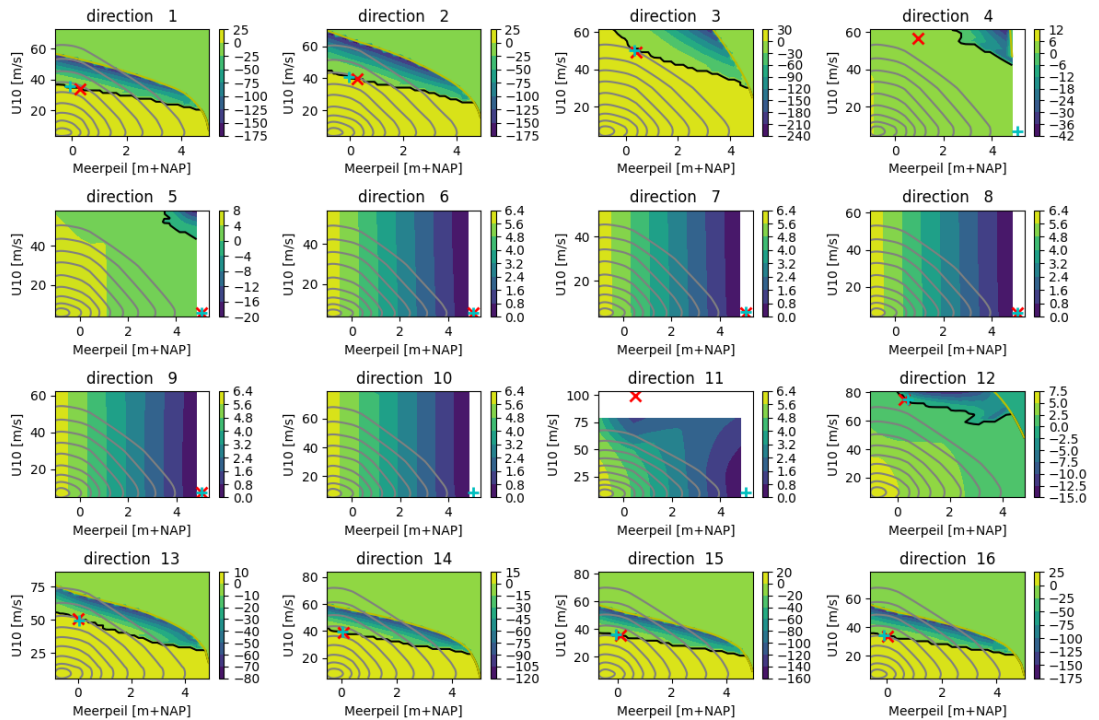
Figur E-3: GEBU-golfploop, locatie 700094, kleurencontour: Z-waarde als functie van meerpeil en windsnelheid, grijze contourlijnen: Lijnen met gelijke afstand tot (0,0) in de U-ruimte (1 tot en met 10), rode lijn: Z=0 functie, gele lijn: overloop.



Figur E-4: GEBU-golfploop inclusief vervolproces erosie, 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.

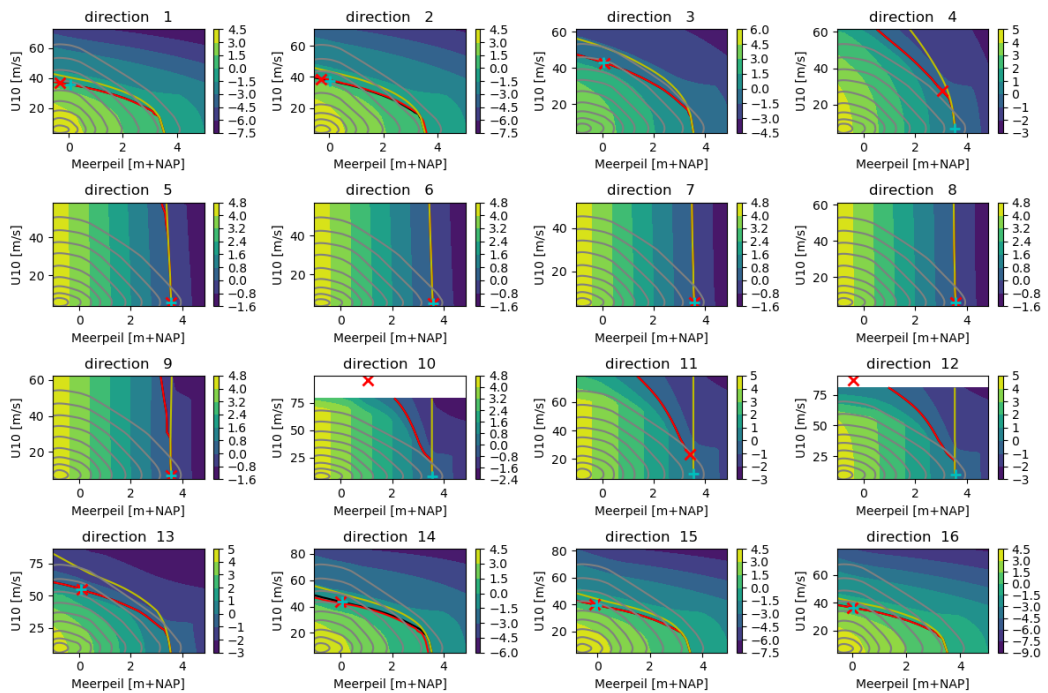


Figuur E-5: GEBU-golfoploop, locatie 700101, kleurencontour: Z-waarde als functie van meerpeil en windsnelheid, grijze contourlijnen: Lijnen met gelijke afstand tot (0,0) in de U-ruimte (1 tot en met 10), rode lijn: Z=0 functie, gele lijn: overloop.

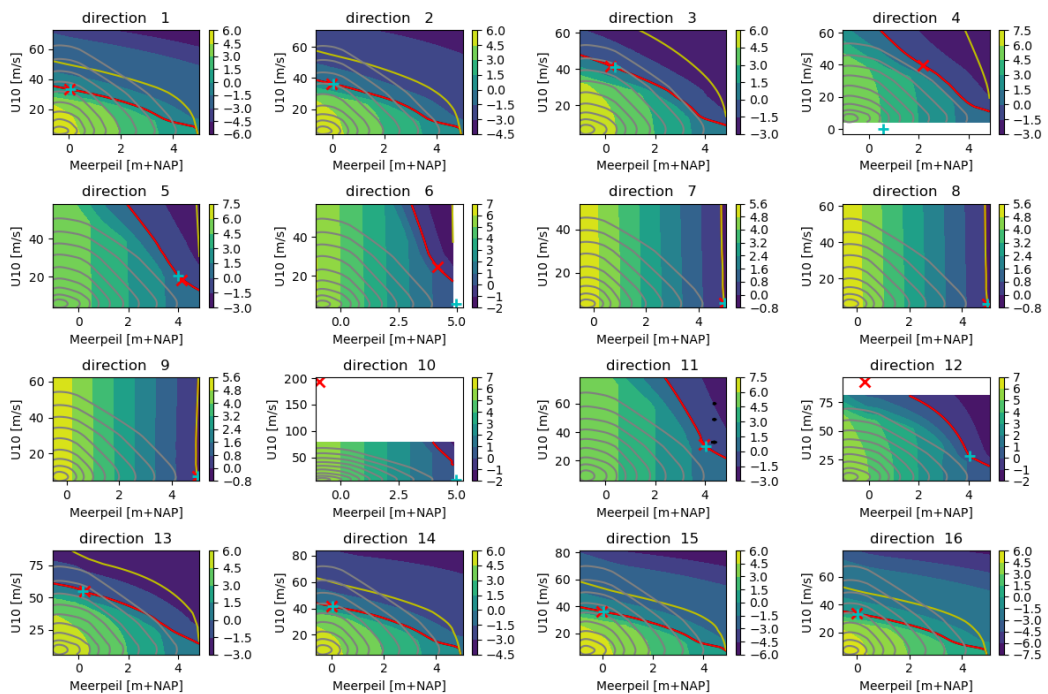


Figuur E-6: GEBU-golfoploop inclusief vervolgproces erosie, locatie 700101, kleurencontour: Z-waarde als functie van meerpeil en windsnelheid, grijze contourlijnen: Lijnen met gelijke afstand tot (0,0) in de U-ruimte (1 tot en met 10), rode lijn: Z=0 functie, gele lijn: overloop.

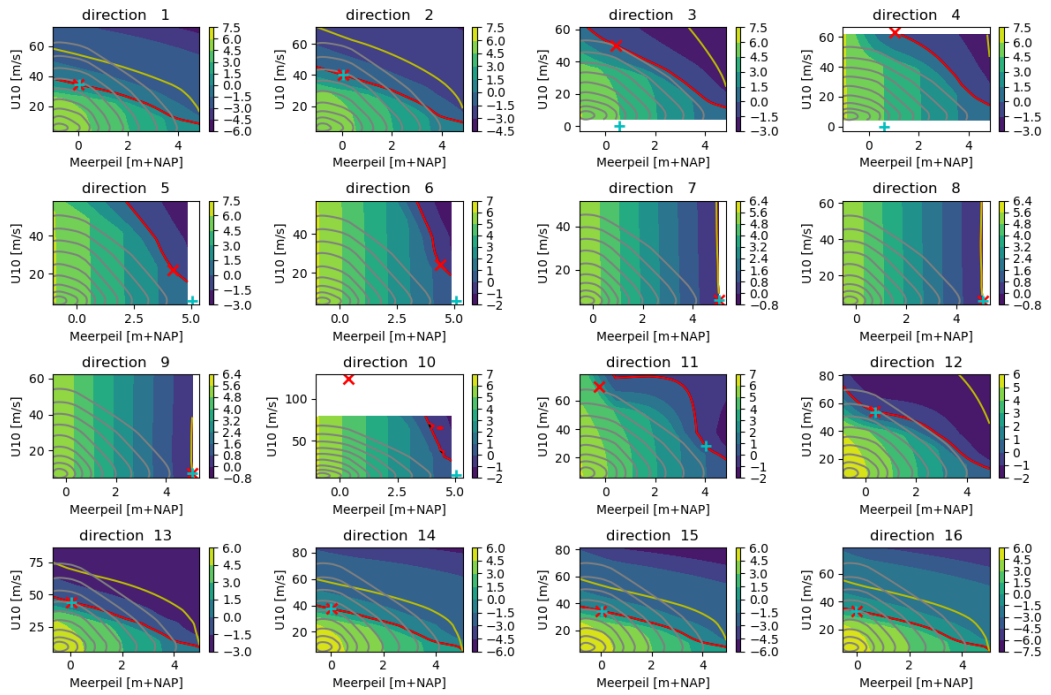
F. Controle U-ruimte GEKB



Figuur F-1: GEKB, locatie 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 F-2: GEKB, 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 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