

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk

Stap 3: Probabilistische berekeningen van de faalkans van de kleibekleding met gras



Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk

Stap 3: Probabilistische berekeningen van de faalkans van de kleibekleding met gras

Auteur(s)

Suzanna Zwanenburg




Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk

Stap 3: Probabilistische berekeningen van de faalkans van de kleibekleding met gras

Opdrachtgever	Waterschap Hunze en Aa's
Contactpersoon	Erik Jolink, Henk van Norel en Marco Veendorp
Referenties	TKI-financiering
Trefwoorden	Kleibekleding, erosie, faalkans

Documentgegevens

Versie	3
Datum	14-09-2022
Projectnummer	11207091-006
Document ID	11207091-006-GEO-0003
Pagina's	42
Classificatie	
Status	definitief

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	datum
1	S. Zwanenburg	M. Klein Breteler	P. van Steeg	10-6-2022
2	S. Zwanenburg	M. Klein Breteler	P. van Steeg	27-6-2022
3	S. Zwanenburg 	M. Klein Breteler 	P. van Steeg 	14-9-2022

Samenvatting

In het kader van het demonstratieproject Brede Groene Dijk (BGD) wordt onderzocht of een dijk gebouwd kan worden met lokaal gewonnen klei afkomstig van de kwelder en klei gemaakt van zout (bagger)slib. Het onderzoek wordt uitgevoerd onder de naam Onderzoek Geschiktheid Deltaklei (OGD). Binnen het OGD wordt een koppeling gelegd met de Pilot Kleirijperij waarin onderzocht wordt hoe slib om te vormen tot klei.

In de Deltagoot van Deltares is in 2021 de erosiesnelheid bepaald van klei uit de kleirijperij (Klutenplasklei en Valgenwegklei), van de huidige Dollarddijk en van de Groene dijk bij Blija in Friesland. Als vervolg op dat onderzoek zijn in de onderhavige rapportage probabilistische berekeningen beschreven van de faalkans van de kleibekleding van het ontwerp van de Brede Groene Dijk.

Op basis van dit onderzoek in de Deltagoot zijn nieuwe erosieformules ontwikkeld voor dijken met een flauw talud. Deze formules en het erosieproces zoals waargenomen in de Deltagoot is geïmplementeerd in de researchtool van Deltares voor het maken van probabilistische berekeningen.

De researchtool van Deltares maakt gebruik van een Monte Carlo simulatie om de faalkans te bepalen. Voor deze Monte Carlo simulatie zijn er miljoenen stormpiek-condities (combinaties van waterstand, golfhoogte, golfperiode en golfrichting tijdens de top van storm) gemaakt met behulp van Hydra-Ring. Van deze stormpiek-condities zijn vervolgens gebeurtenissen gemaakt met een realistisch verloop van de waterstand en de golfcondities gedurende een storm van 45 uur. De belasting van de gebeurtenissen die gebruikt zijn bij de probabilistische berekeningen verschilt daardoor aanzienlijk van de belasting die gebruikt is bij de Deltagootproeven, omdat in de Deltagoot een constante belasting van ruim 30 uur met de stormpiek-condities is gebruikt.

Daarnaast zijn er ook winterhalfjaren samengesteld uit de miljoenen gebeurtenissen. Er zijn hiermee probabilistische berekeningen uitgevoerd om de erosie te bepalen ten gevolge van de afzonderlijke stormen en ten gevolge van alle stormen gedurende een winterhalfjaar.

Voor deze miljoenen gebeurtenissen in combinatie met verschillende trekkingen van de sterkte van de dijk (de berekening is 10 keer herhaald met steeds een andere seed) is de erosie van de Brede Groene Dijk bepaald. De probabilistische berekeningen geven de erosiediepte als functie van de terugkeertijd als resultaat, waarbij terugkeertijd = $1/\text{faalkans}$ van de kleibekleding met gras.

De probabilistische berekeningen geven een erosiediepte ten gevolge van afzonderlijke stormen van 0,85 m bij de faalkanseis voor het mechanisme GEBU (doorsnede-eis: terugkeertijd van 200.000 jaar). De erosiediepte ten gevolge van alle stormen gedurende winterhalfjaren is 0,92 m bij de faalkanseis voor het mechanisme GEBU. De dikte van de kleilaag op de Brede Groene Dijk is ruim dikker dan 0,92 m. Daarmee is de faalkans van de klei met grasbekleding op het buitentalud van de Brede Groene Dijk veel kleiner dan de faalkanseis en is de bekleding voldoende sterk.

De probabilistische berekeningen geven een aanzienlijk kleinere erosiediepte dan waargenomen in de Deltagoot bij de proeven met de Dollarddijkklei en de klei uit de kleirijperij. Dit komt doordat in de Deltagoot de dijk belast is met de constante stormpiek-condities gedurende ruim 30 uur en bij de probabilistische berekeningen is voor de belasting een

realistisch verloop van de waterstand en de golfcondities gedurende een storm van 45 uur gekozen. Hierdoor is de dijk in de probabilistische berekeningen aanzienlijk korter belast met de stormpiek-condities.

De erosiediepte bij de faalkanseis is zodanig veel kleiner dan de kleilaagdikte op het buitentalud van de Brede Groene Dijk dat het niet nodig is om de faalmechanismen GEBU en GEKB samen te beschouwen met de gecombineerde faalkanseis. Voor de beoordeling in het kader van GEKB levert het beschouwen van GEBU en GEKB tezamen niet veel op omdat de beschikbare kansruimte voor GEKB dicht bij de gecombineerde kansruimte van GEBU en GEKB ligt.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond	7
1.1.1	Aanleiding project	7
1.1.2	Doel van het demonstratieproject Brede Groene Dijk	8
1.1.3	Fasering onderzoek	8
1.2	Onderhavige deelproject	9
2	Aanpak van de probabilistische berekeningen	10
2.1	Algemene opzet van de researchtool	10
2.2	Faalkanseis	11
2.2.1	Faalkanseis voor gras erosie buitentalud (GEBU)	12
2.2.2	Combinatie met erosie op kruin en binnentalud (GEKB)	12
2.3	Gegevens van de dijk en locatie	13
3	Hydraulische belastingen	15
3.1	Genereren van hydraulische belastingen met Hydra-Ring	15
3.2	Bewerking van de condities tot een realistisch stormverloop	17
3.3	Opvolgende stormen	19
3.4	Golfoverslag voor eerste inschatting falen door GEKB	20
4	Erosieformules uit Deltagootonderzoek	21
4.1	Algemene beschrijving van het erosieproces	21
4.2	Fase 1 van het erosieproces	22
4.3	Fase 2 van het erosieproces	24
5	Resultaten van de faalkansberekeningen	27
5.1	Erosie ten gevolge van afzonderlijke stormen	27
5.2	Erosie ten gevolge van winterhalfjaren	30
5.3	Gecombineerde faalkans van GEBU en GEKB	32
6	Conclusies	34
	Referenties	36
A	Controleberekeningen	38
B	Vergelijking erosie Deltagoot en Matlabmodel	40

1 Inleiding

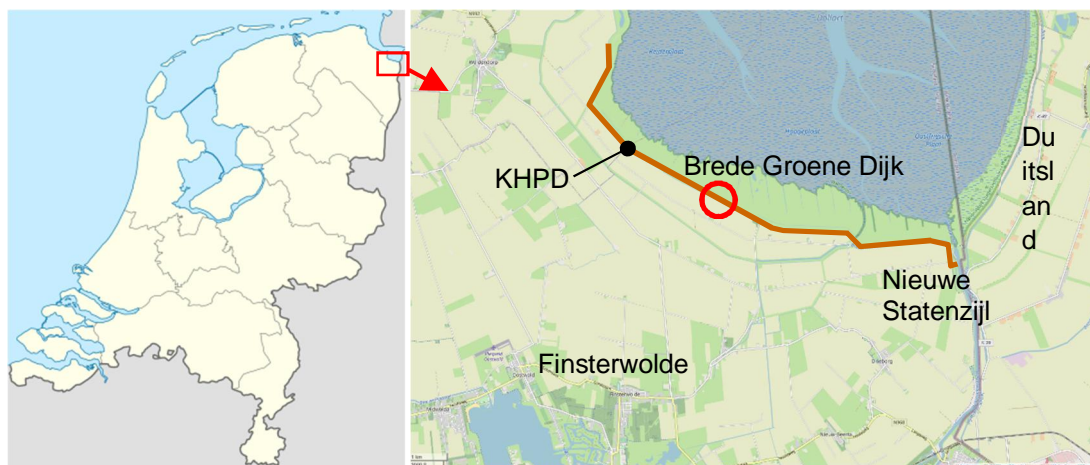
1.1 Achtergrond

In het kader van het demonstratieproject Brede Groene Dijk (BGD) wordt onderzocht of een dijk gebouwd kan worden met lokaal gewonnen klei afkomstig van de kwelder en klei gemaakt van zout (bagger)slib. Het onderzoek wordt uitgevoerd onder de naam Onderzoek Geschiktheid Deltaklei (OGD). Binnen het OGD wordt een koppeling gelegd met de Pilot Kleirijperij waarin onderzocht wordt hoe slib om te vormen tot klei.

Uit de voorbereidingen van het demonstratieproject blijkt dat extra onderzoek in Nederland nodig is om de toepasbaarheid (en voorspelbaarheid van de uiteindelijke functionele eigenschappen) van lokaal gewonnen kweldermateriaal en gerijpte baggerspecie te vergroten. De verwachting is dat een aantal van deze eigenschappen verbeteren door verdere rijping van de klei in de loop van de tijd. Bij de start van een rijpingsproces is er inzicht gewenst of er een geschikt bouw materiaal van te maken is.

Het demonstratieproject Brede Groene Dijk (BGD) is onderdeel van het dijktraject Kerkhovenpolder-Duitsland (normtraject 6-7), zie Figuur 1.1. Aan de zeezijde grenst de kering aan het Natura 2000-gebied van de Dollard, onderdeel van de Waddenzee. Aan de landzijde grenst de kering aan polders van Oost-Groningen. Voorzien is om het project uit te voeren met gerijpte klei afkomstig van de Kleirijperij en van de kwelder. Uit bepalingen op dit materiaal is echter vastgesteld dat het zoutgehalte en het gehalte aan organisch stof van de gerijpte klei niet voldoen aan de voor klei als dijkbouw materiaal geldende eisen (TAW, 1996).

Ter voorbereiding op het demonstratieproject wordt daarom onderzoek uitgevoerd naar de mogelijkheid om met dit materiaal wel een waterveilige dijk te kunnen bouwen. Dit extra onderzoek richt zich op vragen zoals: welke dimensionering is nodig, hoeveel materiaal is daarvoor nodig, is de uitvoering realiseerbaar, hoe gedragen de functionele eigenschappen zich als functie van ouderdom e.d..



Figuur 1.1 Locatie van het demonstratieproject Brede Groene Dijk (KHPD = dijktraject Kerkhovenpolder - Duitsland).

1.1.1 Aanleiding project

Voor het omvormen van de bestaande afgekeurde dijk tot een Brede Groene Dijk is veel klei nodig: er is berekend dat voor een BGD op het traject Kerkhovenpolder-Duitsland dit ca. 1,7

miljoen m³ klei is. Om aan de huidige en toekomstige veiligheidseisen te kunnen voldoen, wordt het talud van de nieuwe dijk namelijk een stuk flauwer. Alleen dan is de dijk in staat om de golfklappen die op de dijk slaan op te vangen. Natuurlijk kan die grote hoeveelheid klei van elders worden aangevoerd: we hebben het dan over vele tienduizenden vrachtwagenbewegingen. Waterschap Hunze en Aa's vroeg zich af of dit anders kon. Er zijn diverse alternatieve kleibronnen in de buurt van de dijk die ook gebruikt kunnen worden. In het demonstratieproject BGD wordt onderzocht of dit kan. Samen met andere partijen kijkt het Waterschap naar de mogelijkheden van klei uit kwelders die vóór de dijk liggen, klei gemaakt van slib uit de binnendijkse brakwater natuurland Breebaart én naar klei gemaakt van zout (bagger)slib uit het havenkanaal van Delfzijl.

Het gebruik van (bagger)slib creëert een win-win situatie. Het wegnemen van slib verbetert de waterkwaliteit in de Eems Dollard, wat positief is voor biodiversiteit in het gebied. Daarnaast kan het gesedimenteerde materiaal, na rijping, vervolgens gebruikt worden bij dijkversterkingen en krijgt het daarmee een maatschappelijke en economische waarde. Kortom, het gebruik van lokaal materiaal draagt bij aan een circulaire inzet.

1.1.2 Doel van het demonstratieproject Brede Groene Dijk

Het doel van dit project is aan te tonen, en daarmee vertrouwen op te bouwen, dat het gerijpte materiaal (het sediment), ondanks een hoog gehalte aan zout en organische stof, geschikt is om er een waterveilige dijk mee te realiseren. Met name het toetsen van verwerkbaarheid en erosiebestendigheid van de gerijpte klei in het veld (proefdijk) en in het laboratorium is hierbij van belang. Bovendien zal een antwoord worden gegeven op de vraag op welke wijze het materiaal verantwoord kan worden toegepast.

Voor het demonstratieproject BGD zal gekeken worden wat het effect is van een flauw talud met helling van 1:7 in combinatie met relatief hoge golven op de erosiesnelheid van de klei. Dit effect is nooit eerder op deze schaal getest en valt momenteel niet binnen het toepassingsgebied van het huidige rekenmodel voor klei-erosie. Het gevolg hiervan is dat er mogelijk te conservatieve aannames worden gedaan voor de dikte van de kleilaag. Daarnaast blijkt uit het demonstratieproject Brede Groene Dijk dat de waarde van een erosiecoëfficiënt van afwijkende kleisoorten niet kan worden bepaald aan de hand van standaard kleiparameters.

1.1.3 Fasering onderzoek

Voor het verwerven van meer inzicht in de toepasbaarheid, en dus inzicht in de functionele eigenschappen, van de huidige Kleirijperij klei – en de manier waarop met een aangepast ontwerp, adequate uitvoering en een afgestemd beheer kan worden gekomen tot een waterveilige dijk – is het onderzoeksplan onderverdeeld in de volgende onderdelen:

1. Definitiefase en bronnenonderzoek
2. Materiaalonderzoek
 - a. Bestaande dijken
 - b. Aanleg proefdijk
3. Probabilistische berekeningen
4. Structuurproeven met bakken klei
5. Evaluatie en tussenrapportage
6. Krimprens en erosiometerproeven
7. Onderzoek diverse parameters
8. Analyse gevolgen afwijkende parameters
9. Deltagootproeven
10. Eindrapportage

1.2 Onderhavige deelproject

De onderhavige rapportage betreft Stap 3 uit paragraaf 1.1.3, die opgesplitst kan worden in twee deelstappen:

1. OpenFOAM berekeningen om de invloed van de waterstand en de golfhoogte op de erosiesnelheid te bepalen.
2. Probabilistische berekeningen met de afgeleide formules voor het bepalen van de faalkans van de kleilaag met gras van het ontwerp van de Brede Groene Dijk.

De onderhavige rapportage gaat over de tweede deelstap: probabilistische berekeningen van de faalkans van de kleilaag met gras.

Als basis voor deze berekeningen zijn het onderzoek in de Deltagoot (Van Steijn en Klein Breteler, 2021) en de OpenFOAM berekeningen (Klein Breteler, 2022) gebruikt. In het Deltagootonderzoek is van vier soorten klei de erosiesnelheid tijdens golfaanval bepaald en de resulterende formules zijn voor een brede range aan waterstanden en golfcondities geverifieerd aan de hand van OpenFOAM berekeningen. De proevenserie met klei van de Dollarddijk is hierbij het meest relevant, gezien de geconstateerde hoge erosiesnelheid. De klei uit de kleirijperij (Klutenplasklei en Valgenwegklei) is in geroerde toestand aangebracht in de Deltagoot waardoor er geen structuurvorming in de klei aanwezig was. Door het ontbreken van structuurvorming is de klei uit de kleirijperij in de Deltagoot waarschijnlijk erosiebestendiger dan wanneer deze een aantal jaar op de dijk heeft gelegen. Daarom zijn voornamelijk de resultaten van de proevenserie met klei van de Dollarddijk als uitgangspunt gebruikt voor de OpenFOAM berekeningen en worden de daarop gebaseerde formules gebruikt in de huidige probabilistische berekeningen.



Figuur 1.2, Golfbelasting op het kleitalud in de Deltagoot.

2 Aanpak van de probabilistische berekeningen

De probabilistische berekeningen zijn uitgevoerd met de researchtool van Deltares, die geprogrammeerd is in Matlab. Deze researchtool is aangepast op basis van de Deltagootproeven en de OpenFOAM berekeningen voor de Brede Groene Dijk. De erosieformules op basis van de erosiesnelheid van de klei tijdens de Deltagootproeven zijn hierin opgenomen. Verder is ook de ontwikkeling van het erosieprofiel in de researchtool aangepast zodat het aansluit op de waargenomen ontwikkeling van het erosieprofiel in de Deltagoot. De erosieformules en de ontwikkeling van het erosieprofiel zijn beschreven in Hoofdstuk 4.

In dit hoofdstuk wordt allereerst de algemene opzet van de researchtool beschreven. Vervolgens worden de faalkanseis voor het mechanisme GEBU en de gecombineerde faalkanseis voor de mechanismen GEBU en GEKB afgeleid. Tenslotte worden de gegevens van de locatie en de dijk beschreven die gebruikt zijn voor de probabilistische berekeningen.

2.1 Algemene opzet van de researchtool

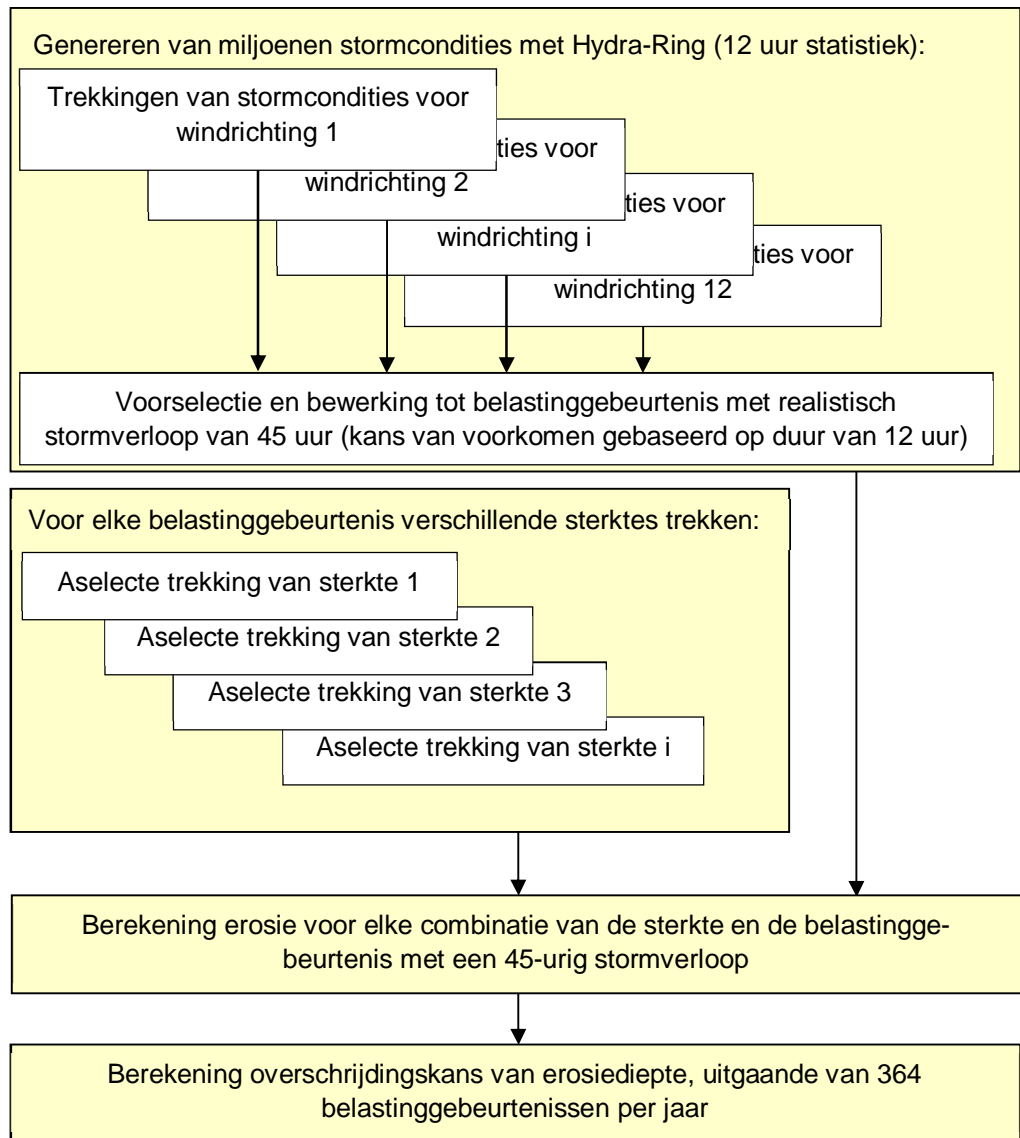
De researchtool van Deltares maakt gebruik van een Monte Carlo simulatie om de faalkans te bepalen. Voor deze Monte Carlo simulatie zijn er miljoenen stormpiek condities (combinaties van waterstand, golfhoogte, golfperiode en golfrichting tijdens de top van storm) gemaakt met behulp van Hydra-Ring. Deze dataset bestaat uit 10.000.000 stormcondities uit 12 windrichtingen met een duur van 12 uur. Er vinden 364 van deze stormcondities plaats tijdens één winterhalfjaar. Dit maakt de dataset representatief voor 333 duizend jaar.

Van deze miljoenen condities is allereerst een voorselectie gemaakt waarin de condities worden weggelaten die geen erosie op kunnen leveren door een te lage waterstand en/of golfhoogte. Deze condities worden weggelaten om de rekentijd te verkorten, maar worden bij het uiteindelijk bepalen van de faalkans wel meegenomen met een erosiediepte van 0 m. Van de condities die wel erosie kunnen veroorzaken wordt een belastinggebeurtenis gemaakt met een realistisch stormverloop van de waterstand, golfhoogte en golfperiode met een duur van 45 uur. De bewerking van de condities tot een realistisch stormverloop is beschreven in Hoofdstuk 3.

Ook de sterkte van de dijk (weerstand van de kleilaag met gras tegen erosie door golfaanval) is geen vast gegeven. Daarom is iedere belastinggebeurtenis gecombineerd met trekkingen van de sterkte van de dijk. De sterkte van de dijk wordt bepaald door erosiecoëfficiënten en modelcoëfficiënten (zie Hoofdstuk 4) die bepalen of het erosieproces langzamer of sneller verloopt. Elke belastinggebeurtenis is gecombineerd met 10 verschillende trekkingen van de erosiecoëfficiënten en modelcoëfficiënten, zodat er rekening gehouden wordt met de onzekerheid in deze parameters: Er zijn berekeningen gemaakt met 10 verschillende seeds. Voor iedere combinatie van een belastinggebeurtenis met een sterke van de dijk is vervolgens de erosie van de Brede Groene Dijk bepaald.

Op basis van de maximale erosiediepte per gebeurtenis is vervolgens de overschrijdingskromme van de erosiediepte bepaald. De erosiediepte met een overschrijdingskans ter grootte van de faalkanseis geeft de minimaal benodigde dikte van de kleilaag met gras. Deze minimaal benodigde dikte wordt vervolgens vergeleken met de kleilaagdikte die aanwezig is op de Brede Groene Dijk om te beoordelen of de kleilaag voldoet. Naast de maximale erosiediepte is ook de overschrijding van de erosiediepte op verschillende hoogtes op het talud beschouwd. Dit is gebruikt om een hoogte-afhankelijke minimale kleilaagdikte te bepalen. De resultaten van de

faalkansberekeningen zijn beschreven in Hoofdstuk 5. Figuur 2.1 geeft de uitgevoerde stappen in de Monte Carlo simulatie weer een schema.



Figuur 2.1 Overzicht van de uitgevoerde stappen in de Monte Carlo simulatie

2.2 Faalkanseis

In WBI-2017 is voor elk faalmechanisme een bepaalde kansruimte beschikbaar gesteld, als deel van de totale faalkans op trajectniveau. Wanneer alleen de erosie van de klei met grasbekleding van het buitentalud wordt beschouwd, wordt de faalkans van de klei met grasbekleding vergeleken met de faalkanseis die volgt uit de beschikbare kansruimte voor dit mechanisme. Deze faalkanseis is uitgewerkt in onderstaande paragraaf.

Anderzijds kunnen er ook twee mechanismen tegelijk beschouwd worden. Wanneer voor alle condities bekeken wordt of de dijk faalt door erosie van de klei met grasbekleding op het buitentalud (GEBU), de kruin en het binnentalud (GEKB), kan de faalkans vergeleken worden met de faalkanseis die volgt uit de gecombineerde kansruimte voor beide mechanismen. Deze faalkanseis is uitgewerkt in Paragraaf 2.2.2.

2.2.1 Faalkanseis voor gras erosie buitentalud (GEBU)

Voor de bekleding op de Brede Groene Dijk geldt het volgende:

- norm op trajectniveau (ondergrens) van traject 6-7: $P_{\max} = 1/3.000$ per jaar
- maximaal toelaatbare faalkans voor de bekledingen: $PB = 0,1 \cdot P_{\max} = 1/30.000$ per jaar
- maximaal toelaatbare faalkans voor gras voor het traject: $PG = 0,5 \cdot PB = 1/60.000$ per jaar
- maximaal toelaatbare faalkans voor graserosie voor het traject: $PGE = 0,9 \cdot PG = 1/66.000$ per jaar
- maximaal toelaatbare faalkans voor graserosie voor een specifieke locatie op de dijk (dijkdoorsnede): $PT = PGE/3 = 1/200.000$ per jaar. Hierin is de factor 3 de lengte-effectfactor voor de hoogte van de waterkering (zie bijlage A in OI2014v4).

Dit betekent dat de kleilaagdikte zodanig moet zijn dat de kans op bezwijken van de klei-bekleding met gras kleiner is dan $1/200.000$ per jaar.

2.2.2 Combinatie met erosie op kruin en binnentalud (GEKB)

Als de berekeningen uitgebreid worden met het mechanisme “erosie kruin en binnentalud” (GEKB) zal enerzijds de faalkans toenemen, want er wordt een extra faalmechanisme toegevoegd. Anderzijds wordt de toelaatbare faalkans veel groter, omdat de beschikbare kansruimte voor GEBU en GEKB gecombineerd kunnen worden. Dat laatste is waarschijnlijk doorslaggevend, waardoor een scherper ontwerp acceptabel zou kunnen worden.

De toelaatbare faalkans van GEKB voor het gehele traject is 24% van de trajectnorm, dus $1/12.500$. Voor deze dijk moet rekening gehouden worden met een lengte-effectfactor van 3, wat uitkomt op een acceptabele faalkans van $1/37.500$. Dit kan opgeteld worden bij de acceptabele faalkans van het buitentalud: $1/37.500 + 1/200.000 = 1/32.000$ per jaar. Vanuit veiligheidsoogpunt is er in het ontwerp van een gecombineerde faalkanseis van $1/37.500$ uitgegaan. Deze faalkanseis voor de combinatie van GEBU en GEKB is daarom ook binnen dit project aangehouden.

Het is te verwachten dat het falen door het mechanisme GEBU optreedt bij een hoge waterstand en hoge golfcondities. Het is denkbaar dat er dan ook falen optreedt door GEKB. Als dat altijd het geval is, en GEKB nooit zonder het falen door GEBU optreedt, zal de faalkans door beide mechanismen tezamen niet groter zijn dan die van GEBU. Het gaat dus voornamelijk om de kans op falen door GEKB, zonder dat er falen optreedt door GEBU. Om een eerste inschatting te maken of er falen door GEKB te verwachten is terwijl het buitentalud niet faalt door erosie (GEBU) is aangenomen dat er falen optreedt door GEKB bij een overslagdebiet van 10 l/s/m of hoger. Dit eenvoudige criterium maakt de berekeningen goed uitvoerbaar en levert een conservatief (veilig) resultaat.

De faalkans is vervolgens bepaald op basis van falen door GEBU en/of een overslagdebiet van minimaal 10 l/s/m . Als de faalkans niet significant verandert door het meenemen van falen door een hoog overslagdebiet (inschatting voor falen door GEKB), is er geen falen door GEKB te verwachten zonder dat er falen door GEBU optreedt. Dan is het voldoende om alleen GEBU door te rekenen en de faalkans te beoordelen aan de hand van de gezamenlijke toelaatbare faalkans van GEBU en GEKB. De resultaten van deze eerste inschatting zijn gegeven in Hoofdstuk 5.

Wordt de faalkans wel significant groter, dan zou falen door GEKB in detail beschouwd kunnen worden door middel van de cumulatieve overbelastingsmethode zodat beide faalmechanismen tezamen worden berekend in de probabilistische som. Deze berekeningen vallen buiten de huidige scope van de probabilistische berekeningen.

2.3 Gegevens van de dijk en locatie

Het demonstratieproject van de Brede Groene Dijk maakt deel uit van de dijk Kerkhovenpolder-Duitsland langs de Dollard. De locatie is aangegeven in Figuur 1.1.

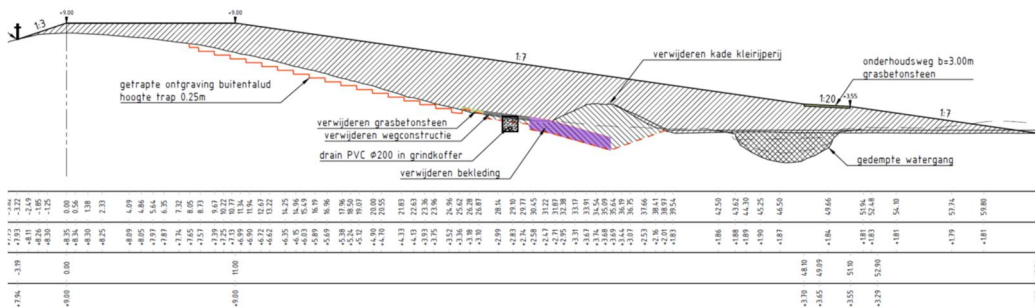
De dijk wordt aangelegd met een taludhelling van 1:7 en een dik kleipakket, zoals te zien is in Figuur 2.1. De dijk krijgt een 11 m brede kruin op NAP+9,00 m. De dijk ligt achter een hoog voorland. De berekeningen zijn uitgevoerd met een voorlandniveau op NAP+2,00 m. De onderhoudsweg op NAP +3,55 m is niet meegenomen in de geometrie voor de probabilistische berekeningen.

De huidige Dollarddijk, die onder de Brede Groene Dijk blijft liggen, heeft een kleibekleding van 80 cm dik. Deze dikte kan ook meegerekend worden bij de kleibekleding van de Brede Groene Dijk. Dit maakt de totale dikte van de kleibekleding 2,5 m dik aan de bovenzijde van het buitentalud; lager op het buitentalud wordt de kleibekleding steeds dikker. Het ontwerp van deze kleilaag is gebaseerd op een maximale erosiediepte van 1,7 m loodrecht op het talud. De extra kleilaagdikte is door de ontwerpers in samenspraak met het Waterschap toegevoegd omdat er in het stormseizoen geen herstelwerkzaamheden kunnen plaats vinden en er daardoor extra risico's zijn na de maatgevende storm betreffende:

- dierlijke graverij,
- opvolgende storm(en) tijdens het betreffende stormseizoen,
- doordat de klei niet meer beschermd wordt door de grasbekleding kan er nieuwe structuurvorming ontstaan,
- een dikkere kleilaag vertraagt het oplopen van de waterspanningen in de dijk.

Daarnaast geeft het optreden van een storm direct na een droge periode ook het risico dat de kleibekleding sneller erodeert. Met dit risico is eveneens rekening gehouden bij het aanhouden van een extra kleilaagdikte.

De normaal op de dijk is in de richting 26°N.



Figuur 2.1, Dwarsdoorsnede van ontwerp van de Brede Groene Dijk

De getijgegevens van 2023 zijn als volgt:

- Laagst astronomisch tij: LAT = NAP-1,86 m
- Gemiddeld laagwater: NAP-1,42 m
- Gemiddeld hoogwater: NAP+1,47 m
- Gemiddelde getijamplitude: 1,45 m

Bij de bewerking van de condities tot een realistisch stormverloop is voor alle condities de gemiddelde getijamplitude van 1,45 m aangehouden.

De berekeningen zijn uitgevoerd voor zichtjaar 2073. Bij de bewerking van de condities tot een realistisch stormverloop is een zeespiegelstijging van 0,52 m meegenomen.

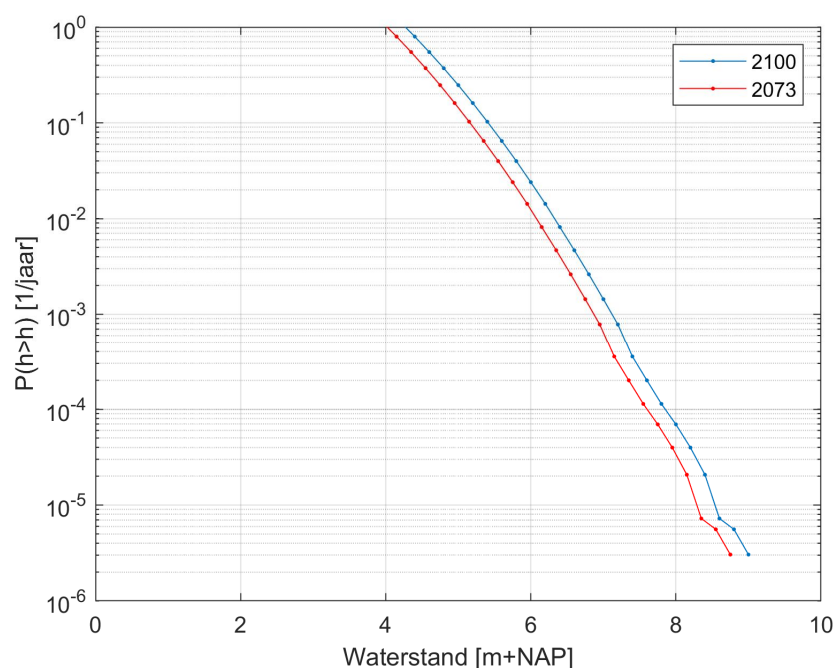
Verder is 10 cm bodemdaling ter plaatse van de dijk verdisconteerd in 2073. Aangenomen is dat de bodemdaling geen invloed heeft op het niveau van de bodem van de Waddenzee.

3 Hydraulische belastingen

3.1 Genereren van hydraulische belastingen met Hydra-Ring

De waterstanden en golfcondities voor de Monte Carlo simulatie zijn gegenereerd door Riskeer (Hydra-Ring), waardoor dit perfect past bij WBI-2017. Riskeer kan met een speciale optie miljoenen combinaties genereren van waterstand, golfhoogte, golfperiode en golfrichting op de top van de storm. Al deze miljoenen realisaties kloppen met de normaal te hanteren overschrijdingskrommes voor waterstanden en golfcondities. Deze realisaties kunnen echter alleen worden aangemaakt voor de zichtjaren die beschikbaar zijn in de hydraulische databases, namelijk 2023, 2050 en 2100.

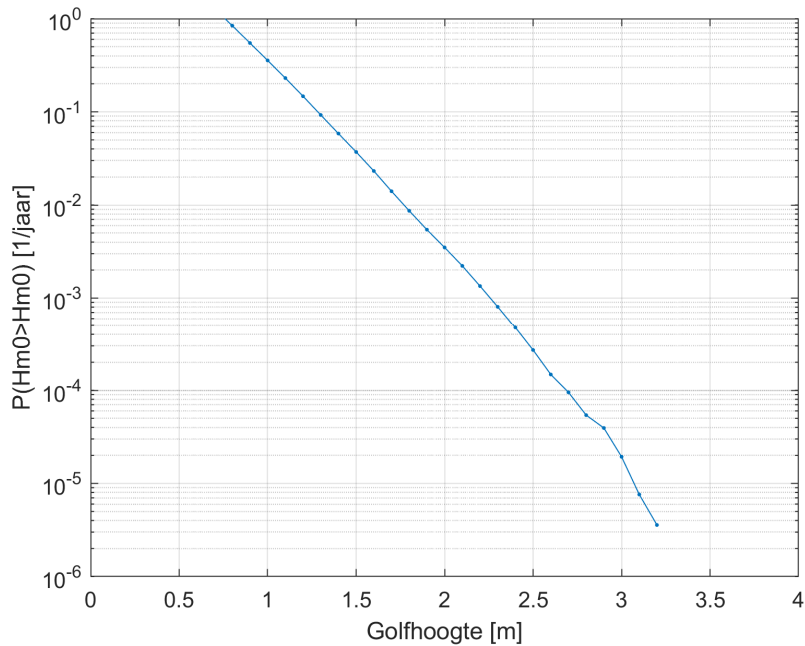
Het zichtjaar waarvoor de berekeningen uitgevoerd moeten worden is echter 2073. Omdat 2073 niet beschikbaar is zijn de golfcondities en waterstanden van 2100 als uitgangspunt gebruikt. Alle waterstanden in de Monte Carlo simulaties zijn vervolgens verlaagd met 25 cm; het verschil in zeespiegelstijging tussen 2073 en 2100. Omdat de golfcondities uit de database van Hydra-Ring worden gebruikt, die daar gegeven zijn als functie van de windsnelheid, is het mogelijk om de statistiek van de waterstanden aan te passen zonder de statistiek van de golfcondities aan te passen. Dientengevolge is het afdoende om de stijging van de zeespiegel alleen te verwerken in de waterstandsstatistiek en niet in de database van de golven (dit is een bekende benadering in het OI2014). De golfcondities van 2100 kunnen daarom in combinatie met een aangepaste waterstandsstatistiek voor zichtjaar 2075 gebruikt worden zonder correctie toe te passen. De overschrijdingskrommes van de waterstand en de golfhoogte zijn gegeven in Figuur 3.1 en Figuur 3.2.



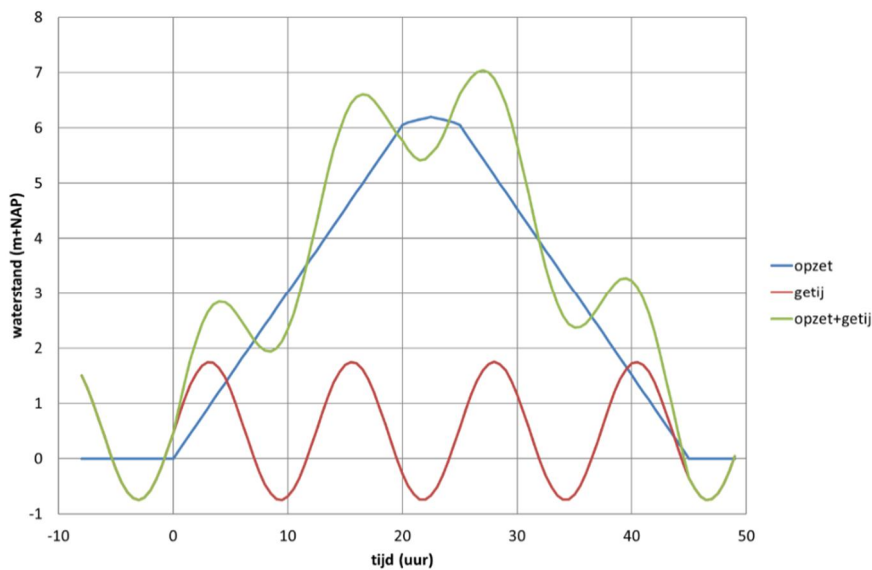
Figuur 3.1 Overschrijdingskromme van de waterstand op basis van de beschouwde waterstanden in de Monte Carlo simulatie voor het jaar 2100 (blauwe lijn) en de gecorrigeerde waterstanden voor het jaar 2073 (rode lijn)

Voor elk van de 12 windrichtingssectoren zijn er evenveel stormen gegenereerd door Hydra-Ring, elk met een duur van 12 uur. Omdat extreme stormen, die maatgevend zijn voor de erosie, veel langer duren dan 12 uur, worden deze stormen kunstmatig verlengd tot een

verlopende waterstand en golfhoogte zoals te zien is in Figuur 3.3. Als basis voor het berekenen van de terugkeertijd en faalkans wordt 12 uur gehanteerd gedurende het winterhalfjaar (dus 364 stormen/jaar), omdat de statistiek in de hydraulische databases die Hydra-Ring gebruikt hierop gebaseerd is. Voor het berekenen van de faalkans is rekening gehouden met de kans van voorkomen van elke windrichting. Zo wordt een storm uit het noordwesten zwaarder meegeteld dan een storm uit het oosten.



Figuur 3.2 Overschrijdingskromme van de significante golfhoogte op basis van de beschouwde golfcondities in de Monte Carlo simulatie voor het jaar 2100 en 2073



Figuur 3.3 Voorbeeld van waterstandsverloop tijdens extreme storm (de zeespiegelstijging is bij het waterstandsverloop van het getij opgeteld)

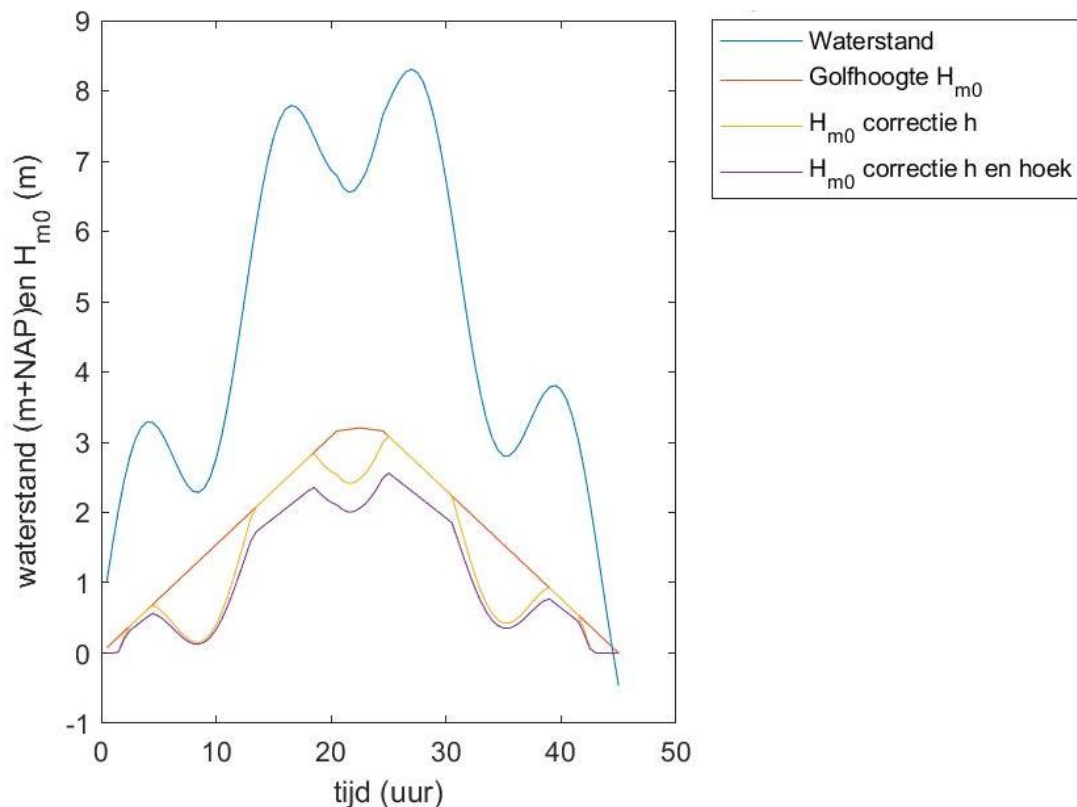
3.2 Bewerking van de condities tot een realistisch stormverloop

Bij de bewerking van de condities tot een realistisch stormverloop wordt verondersteld dat het hoogwater 5,5 uur later valt dan de top van de stormopzet. De stormduur is 45 uur en 2 uur voor de top van de stormopzet is deze 10 cm lager dan de topwaarde. Een voorbeeld van het waterstandverloop is gegeven in Figuur 3.3.

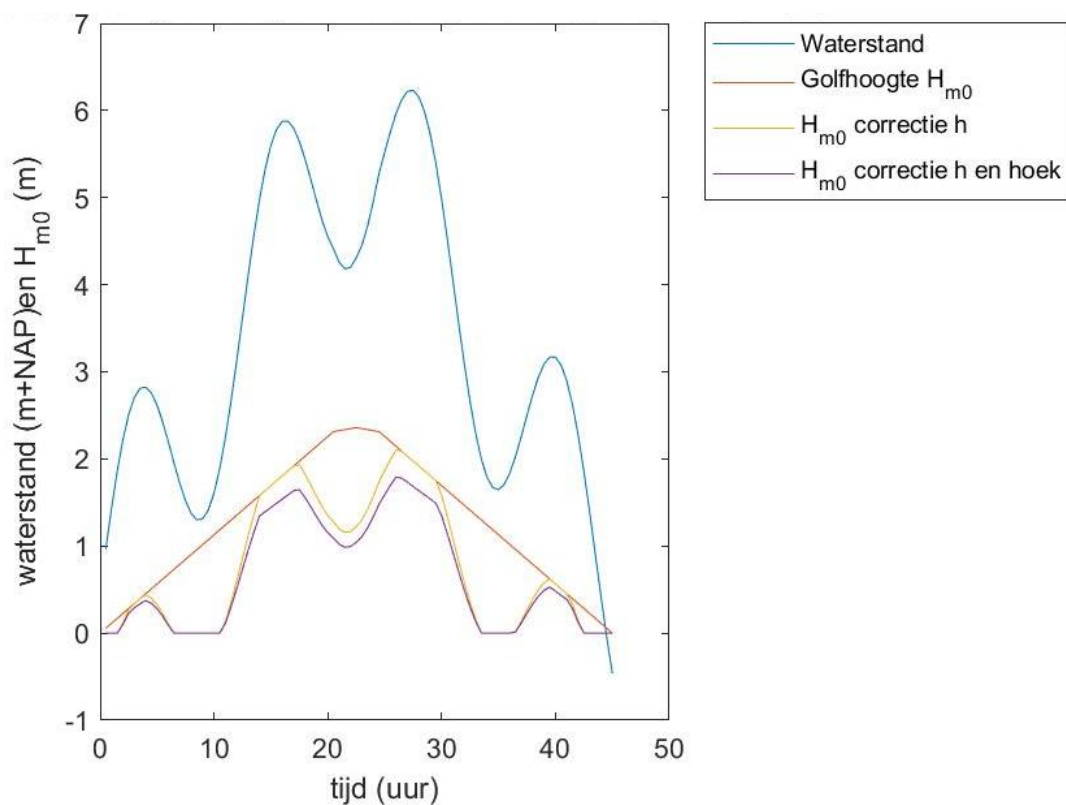
Het verloop van de golfcondities is als volgt samengesteld:

- De golfhoogte heeft hetzelfde verloop als het verloop van de stormopzet.
- De golfperiode op de top van de storm is bepaald met HydraRing; tijdens de rest van de storm is de golfperiode zo gekozen dat de golfsteilheid gedurende de gehele storm hetzelfde is als tijdens de top van de storm.
- Vervolgens is de golfhoogte gereduceerd als de waterdiepte ertoe leidt dat de golven breken op het voorland. De maximaal mogelijke golfhoogte, $H_{m0,max}$, is berekend met onderstaande formules (1) en (2). De golfperiode is niet aangepast.
- De golfsteilheid die gebruikt is bij de erosieberekeningen (zie Hoofdstuk 4), is bepaald op basis van de golfperiode en de golfhoogte die gereduceerd is voor de waterdiepte.
- De golfrichting is gedurende de gehele storm hetzelfde als tijdens de top van de storm.
- De erosieformules (zie Hoofdstuk 4) zijn gebaseerd op loodrecht invallende golven. Voor scheef invallende golven is de equivalente golfhoogte van loodrecht invallende golven bepaald op basis van formule (3) en (4).

Figuur 3.4 en Figuur 3.5 geven twee voorbeelden van het verloop van de golfhoogte gedurende een extreme storm rond het ontwerp punt. In deze figuren is te zien dat door de beperkte waterdiepte tijdens laagwater de golven breken op het voorland en de golfhoogte is gereduceerd. Verder valt op dat de belasting van de condities in Figuur 3.4 groter is dan de belasting van de condities in Figuur 3.5. Doordat bij de probabilistische berekeningen voor iedere gebeurtenis een combinatie van hydraulische belasting en sterkte van de dijk wordt doorgerekend komt het voor dat een grotere belasting samen met een grotere sterkte (Figuur 3.4) en een kleinere belasting samen met een kleinere sterkte (Figuur 3.5) een vergelijkbare erosie opleveren. Dit betekent ook dat de hydraulische belastingen rond het ontwerp punt kunnen verschillen van de condities met de kans van voorkomen ter grootte van de faalkanseis. De hydraulische belasting die gebruikt is in de semi-probabilistische berekeningen voor het ontwerp van de Brede Groene Dijk kunnen hierdoor ook verschillen van de hydraulische belastingen die bij de probabilistische berekeningen gevonden worden rond het ontwerp punt.



Figuur 3.4 Voorbeeld 1 van het verloop van de golfhoogte tijdens een gebeurtenis rond het ontwerp punt (de zeespiegelstijging is bij het waterstandsverloop van het getij opgeteld)



Figuur 3.5 Voorbeeld 2 van het verloop van de golfhoogte tijdens een gebeurtenis rond het ontwerp punt (de zeespiegelstijging is bij het waterstandsverloop van het getij opgeteld)

Als de waterdiepte ertoe leidt dat de golven breken op het voorland, wordt de golfhoogte als volgt gereduceerd:

$$H_{m0,gereduceerd} = \min(H_{m0,max}, H_{m0}) \quad (1)$$

$$H_{m0,max} = 0,53 * d_m \quad (2)$$

Met:

H_{m0} = golfhoogte zonder invloed van de waterdiepte (m)

$H_{m0,max}$ = maximale golfhoogte die kan optreden bij waterdiepte d_m (m)

$H_{m0,gereduceerd}$ = golfhoogte bij de teen van de dijk, indien nodig gereduceerd voor de waterdiepte (m)

d_m = maatgevende waterdiepte voor de dijk, namelijk op een halve diepwatergolf lengte van de dijk (m)

Deze reductie van de golfhoogte is bepaald op basis van diverse metingen waarbij de factor 0,53 het gemiddelde plus eenmaal de standaardafwijking is ($\mu + \sigma$). De afleiding van deze factor staat beschreven in Klein Breteler, 2018a.

Bij scheef invallende golven wordt de volgende formule gebruikt om de equivalente golfhoogte bij loodrechte golfaanval te berekenen (Klein Breteler en Mourik, 2019):

$$\frac{H_{m0,\perp}}{H_{m0,\beta}} = \max\left(0,35; (\cos \beta)^{0,67}\right) \quad \text{voor } -90^\circ < \beta < 90^\circ \quad (3)$$

$$\frac{H_{m0,\perp}}{H_{m0,\beta}} = 0 \quad \text{voor } \beta > 90^\circ \text{ of } \beta < -90^\circ \quad (4)$$

Met:

$H_{m0,\perp}$ = equivalente significante golfhoogte met loodrechte golfaanval (m)

$H_{m0,\beta}$ = significante golfhoogte van de scheef invallende golven

β = hoek van golfaanval ten opzichte van loodrechte golfaanval ($^\circ$)

3.3 Opvolgende stormen

Als er een storm heeft plaatsgevonden die erosie heeft veroorzaakt is het denkbaar dat er in hetzelfde stormseizoen (winterhalfjaar) nog een zware storm kan optreden. Reparatie van de dijk tijdens het stormseizoen is niet altijd mogelijk. Daarom zijn er ook berekeningen uitgevoerd van de totale erosie ten gevolge van alle opeenvolgende stormen gedurende winterhalfjaren.

Deze winterhalfjaren zijn samengesteld met stormen uit de datasets met stormen die door Hydra-Ring zijn gegenereerd. Voor ieder winterhalfjaar zijn 364 windrichtingen getrokken, rekening houdend met de kans van voorkomen van de windrichtingen. Voor iedere windrichting is er vervolgens een storm getrokken uit de verzameling stormen met de betreffende windrichting. De meeste van deze stormen zullen zwak zijn of aflandig en geen erosie geven, maar er zullen winterhalfjaren zijn waarbij er een of meer zware stormen zijn die erosie geven.

De cumulatieve erosie van elk winterhalfjaar is zo gebruikt om de overschrijdskromme van de erosiediepte te bepalen en de faalkans te berekenen voor het totale effect van alle stormen in een winterhalfjaar.

3.4 Golfverslag voor eerste inschatting falen door GEKB

Om een eerste inschatting te maken van de faalkans door erosie van de kruin en het binnentalud is een overslagdebiet van 10 l/s/m of meer als falen beschouwd. De golfverslag is met onderstaande formule bepaald (TAW 2002):

$$q = \sqrt{g \cdot H_{m0}^3} \cdot \frac{0,067}{\sqrt{\tan \alpha}} \cdot \gamma_b \cdot \xi_0 \cdot \exp\left(-4,3 \frac{R_c}{H_{m0}} \frac{1}{\xi_0 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v}\right) \quad (5)$$

$$\text{Met een maximum van: } q = \sqrt{g \cdot H_{m0}^3} \cdot 0,2 \cdot \exp\left(-2,3 \frac{R_c}{H_{m0}} \frac{1}{\gamma_f \cdot \gamma_\beta}\right) \quad (6)$$

Met:

q = gemiddeld golfverslagdebiet ($m^3/s/m$)

g = zwaartekrachtversnelling = $9,81$ (m/s^2)

H_{m0} = significante golfhoogte bij de teen van de dijk (m)

ξ_0 = brekerparameter = $\tan(\alpha)/\sqrt{(s_0)}$ (-)

s_0 = golfsteilheid (-)

$T_{m-1,0}$ = spectrale golfperiode bij de teen van de dijk (s)

$\tan(\alpha)$ = taludhelling van de dijk (-)

R_c = vrije kruinhoogte boven de stilwaterlijn (m)

γ_b = invloedsfactor van de berm (-) = 1 als er geen berm is

γ_f = invloedsfactor van de ruwheid van de bekleding (-) = 1 voor gras

γ_β = invloedsfactor van de hoek van golfaanval (-) = $\max(1-0,0033\beta; 1-0,0033*80)$

β = hoek van golfaanval ten opzichte van de dijknormaal ($^\circ$)

γ_v = invloedsfactor van de kruinmuur (-) = 1 omdat er hier geen kruinmuur is.

4 Erosieformules uit Deltagootonderzoek

In dit hoofdstuk wordt allereerst een algemene beschrijving gegeven van het erosieproces. Vervolgens worden de formules voor de erosiesnelheid en de vorm van het erosieprofiel nader beschreven.

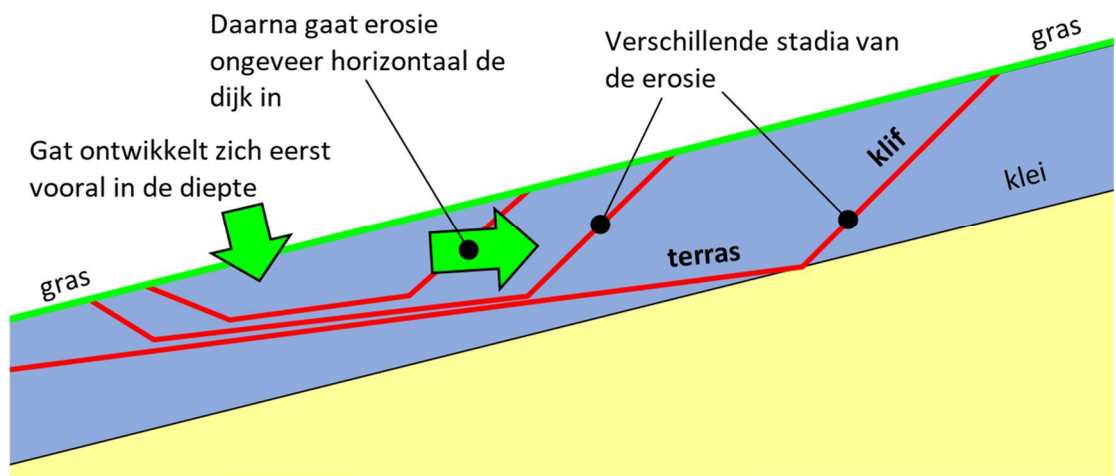
4.1 Algemene beschrijving van het erosieproces

Tijdens de proeven in de Deltagoot is geconstateerd dat het erosieproces in eerste instantie heel traag verloopt (gering erosievolume per uur) en dat de erosie vooral in de diepte groeit. Na het bereiken van een bepaalde erosiediepte gaat het erosieproces vervolgens veel sneller. Dit komt vooral door de invloed van het gras.

In Figuur 4.1 is schematisch weergegeven hoe het erosieproces verloopt. Het start met het ontwikkelen van een gat in het gras. Zodra het erosiegat voldoende is gegroeid, ontwikkelt zich een klif waar de zwaarste hydraulische belasting op aangrijpt. Daar slaan de golven tegenaan en dat geeft de grootste bijdrage aan de erosie. Door de toenemende erosie schuift de klif steeds verder naar achteren en neemt de diepte van het erosiegat toe.

Dit maakt dat er twee hoofdfases in het erosieproces zijn:

1. Erosie van het gras totdat er een kuil is ontstaan en een klif waartegen de golven beuken.
2. Een erosieproces waarbij er een steile klif is die met name onderaan de klif erodeert en het gras ondermijnt.



Figuur 4.1 Schematische weergave van het erosieproces

De erosieformules voor fase 1 en fase 2 zijn beschreven in onderstaande paragrafen. Verder is ook beschreven hoe de ontwikkeling van de vorm van het erosiegat is opgenomen in de researchtool van Deltares voor probabilistische berekeningen.

Het erosieproces zoals opgenomen in de researchtool van Deltares (bestaande uit fase 1 en fase 2) verschilt van het erosieproces zoals toegepast bij de semi-probabilistische berekeningen voor het ontwerp van de Brede Groene Dijk, omdat bij het maken van deze semi-probabilistische berekeningen de Deltagootproeven nog niet uitgevoerd waren. Bij het ontwerp

van de Brede Groene Dijk is een erosieproces aangehouden wat vergelijkbaar is met alleen fase 2 waardoor het erosiegat in het begin van de storm sneller groeit dan waargenomen in de Deltagoot. Om goed aan te sluiten op de resultaten van de Deltagootproeven is bij de probabilistische berekeningen het erosieproces bestaande uit fase 1 en fase 2 opgenomen, waardoor is afgeweken van met erosieproces zoals aangehouden voor het ontwerp van de Brede Groene Dijk.

4.2 Fase 1 van het erosieproces

Tijdens de eerste fase neemt vooral de erosiediepte toe, maar is het erosievolume nog betrekkelijk klein.

Voor de eerste fase van het erosieproces, zolang de erosiediepte kleiner is dan $d_{e,p1 \rightarrow 2}$ (ongeveer 50 cm), wordt gebruik gemaakt van de formule van van Steijn e.a. (2021):

$$d_e = m_1 \cdot f_{\text{overgang}} \cdot c_d \cdot \max(0; H_{m0} - 0,5) (\tan \alpha) \cdot t_{\text{belast}} \quad \text{voor } d_e < d_{e,p1 \rightarrow 2} \quad (7)$$

Met:

H_{m0} = significante golfhoogte bij de teen van de dijk (m)

t_{belast} = duur van de hydraulische belasting (met constante waterstand en golfhoogte) (uur)

c_d = erosiecoëfficiënt, afhankelijk van gras- en kleikwaliteit (= 0,67 per uur voor de beproefde situaties, inclusief het effect van eens per vijf jaar een zeer hete en droge zomer)

d_e = grootste diepte in de erosiekuil (m)

f_{overgang} = invloedsfactor van de overgang op de erosiesnelheid in de eerste fase van het erosieproces = $\max(0; \min(0,44h_{\text{overgang}}/H_{m0} + 0,66; 1))$ (-) in het geval er geen harde bekleding is op het ondertalud geldt: $f_{\text{overgang}} = 1$.

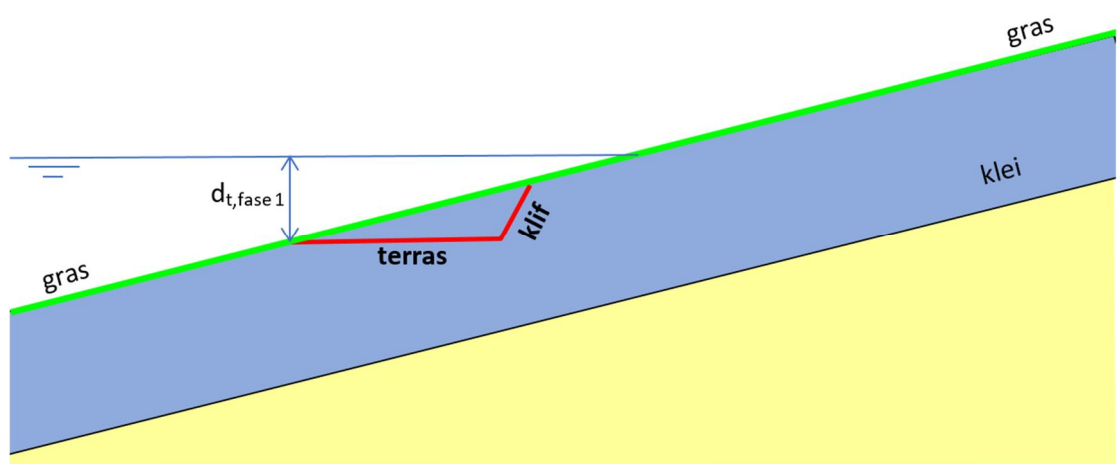
h_{overgang} = waterstand ten opzichte van de overgang van de harde bekleding naar het gras (positief als overgang onder water) (m)

m_1 = modelcoëfficiënt (stochastische variabelen) (-) (normaal verdeeld met: $m = 1$ en $\sigma = 0,4$)

α = taludhelling ($^\circ$)

$d_{e,p1 \rightarrow 2}$ = erosiediepte waarbij fase 1 over gaat naar fase 2 (m) (normaal verdeeld met: $m = 0,5$ en $\sigma = 0,1$)

De vorm van het erosiegat heeft een horizontaal terras en een steil klif met een taludhelling van 2:1, zoals geschetst in Figuur 4.2.



Figuur 4.2 Vorm en locatie erosiegat van fase 1

De locatie waar de erosie begint is de locatie met de zwaarste golfbelasting. Dit is de locatie waar de meeste golfklappen vallen. De horizontale afstand vanaf het snijpunt van de stilwaterlijn met het talud tot de locatie waar de meeste golfklappen vallen ($x_{\phi\max}$) kan bepaald worden met onderstaande formule (Klein Breteler et al (2022b)):

$$\frac{x_{\phi\max}}{H_{m0}} = \min \left\{ \frac{0,42}{\sqrt{s_{op}}} - 0,9; 6,5 \right\} * f_{od,klap} \quad (8)$$

$$f_{od,klap} = \min \left\{ 1; \max \left\{ 1 - \frac{\left(2,8 - \frac{d_m}{H_{m0}}\right) \left(1 - \min\{17,55 * s_{op} + 0,22; 1\}\right)}{0,6}; \min\{17,55 * s_{op} + 0,22; 1\} \right\} \right\} \quad (9)$$

Met:

$x_{\phi\max}$ = de horizontale afstand vanaf het snijpunt van de stilwaterlijn met het talud tot de locatie waar de meeste golfklappen vallen (m)

H_{m0} = significante golfhoogte (m)

s_{op} = golfsteilheid (-)

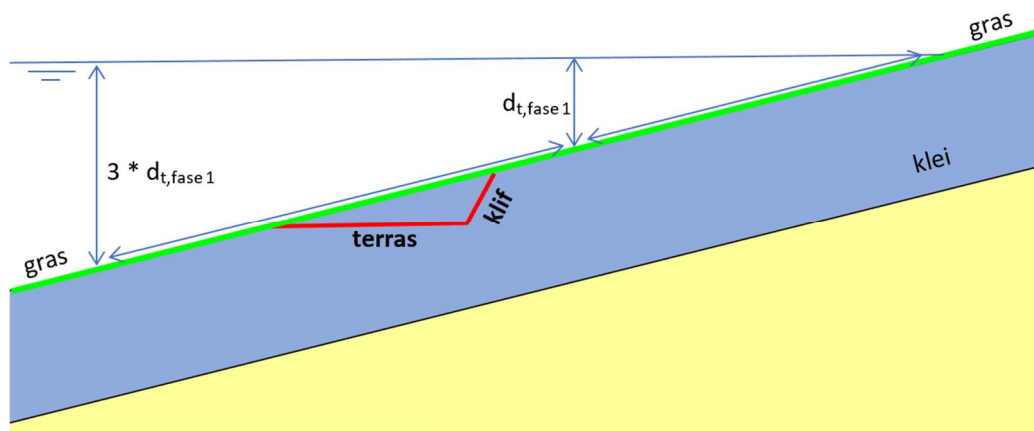
$f_{od,klap}$ = correctiefactor op basis van de invloed van de waterdiepte op de locatie waar de meeste golfklappen vallen (-)

d_m = maatgevende waterdiepte voor de dijk, namelijk op een halve diepwatergolflengte van de dijk (m)

Deze formule is bepaald voor taluds met een helling tussen 1:3 en 1:4. De verwachting is dat voor een talud van 1:7 de horizontale afstand $x_{\phi\max}$ met deze formules wordt onderschat en dat de diepte (d_t) waar de meeste golfklappen vallen ongeveer constant is. Daarom is een schatting gemaakt van de diepte d_t op basis van $x_{\phi\max}$ en een helling van 1:3,5 en is de diepte onder de waterlijn waar de erosie begint ($d_{t, fase1}$) als volgt bepaald:

$$d_{t, fase1} = \frac{x_{\phi\max}}{3,5} \quad (10)$$

Door veranderende golfcondities en/of en veranderende waterstand zal de locatie waar de meeste golfklappen vallen veranderen. Het is echter aannemelijk dat de erosie verder zal groeien op een locatie waar al een erosiegat is ontstaan en wat niet noodzakelijk precies bij $d_{t, fase1}$ onder de waterlijn ligt. Daarom is er gekeken in een zone tussen de waterlijn en $3 * d_{t, fase1}$ onder de waterlijn waar de grootste erosiediepte aanwezig is. Er is aangenomen dat de erosie op deze locatie verder groeit vanaf het horizontale terras, zoals geschetst in Figuur 4.3.



Figuur 4.3 Erosie groeit verder bij grootste erosiediepte tussen stilwaterlijn en $3 * d_{t, fase1}$ onder de stilwaterlijn

4.3 Fase 2 van het erosieproces

Tijdens de tweede fase neemt het erosievolume snel toe, maar wordt de erosiekuil maar langzaam dieper.

De erosie van de klei in de tweede fase van het erosieproces wordt berekend met de formule van Mourik (2020), die onlangs is aangepast door van Steijn e.a. (2021). Deze formule geeft de erosiesnelheid weer (toename van het volume per uur):

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = m_2 \cdot c_e \cdot \left[\max \left(1,32 - 0,079 \cdot \frac{V_e}{H_{m0}^2}; 0,3 \right) \right] \cdot [4,1 \cdot \tan \alpha] \cdot \left[\min \left(3,6; \frac{0,0061}{s_{op}^{1,5}} \right) \right] \cdot [1,7 \cdot (H_{m0} - 0,4)^2] \quad (11)$$

Met:

- $\partial V_e / \partial t$ = erosiesnelheid = toename erosievolume per strekkende meter dijk per uur (m³/m/h)
- V_e = erosievolume per strekkende meter dijk (m³/m)
- c_e = erosiecoëfficiënt, afhankelijk van kleikwaliteit (gekozen voor 0,8, zie Hoofdstuk 5) (-)
- s_{op} = $H_{m0} / (g T_p^2 / (2\pi))$ = golfsteilheid gebaseerd op de significante golfhoogte en piekperiode bij de teen van de dijk (-)
- T_p = golfperiode bij de piek van spectrum (s)
- m_2 = modelcoëfficiënt (normaal verdeeld met $\mu(m_2) = 1,0$ en $\sigma(m_2) = 0,25$) (-)

Aan formule (11) is een maximum toegevoegd aan de invloed van het erosievolume wat al aanwezig is. Deze begrenzing is toegevoegd om te voorkomen dat het erosieprofiel al snel een evenwicht bereikt terwijl dat niet is waargenomen tijdens de Deltagootproeven.

De erosie groeit verder vanuit het erosiegat aan het einde van fase 1. Vanaf de plek met de grootste erosiediepte (klifvoet) groeit de erosie verder omhoog met een flauw talud van 1:9,5.

De locatie waar de erosie begint ($d_{t, fase2}$) ligt bij gelijke belasting iets dieper dan in fase 1 en wordt beschreven met formule (12) (Klein Breteler et al (2012))

$$\frac{d_{t, Mourik2020}}{H_{m0}} = \min \left(0,4 \frac{V_{e, belast}^{0,25}}{H_{m0}^{1,5}} + \frac{0,7}{H_{m0}}; 2 \right) \quad (12)$$

Met:

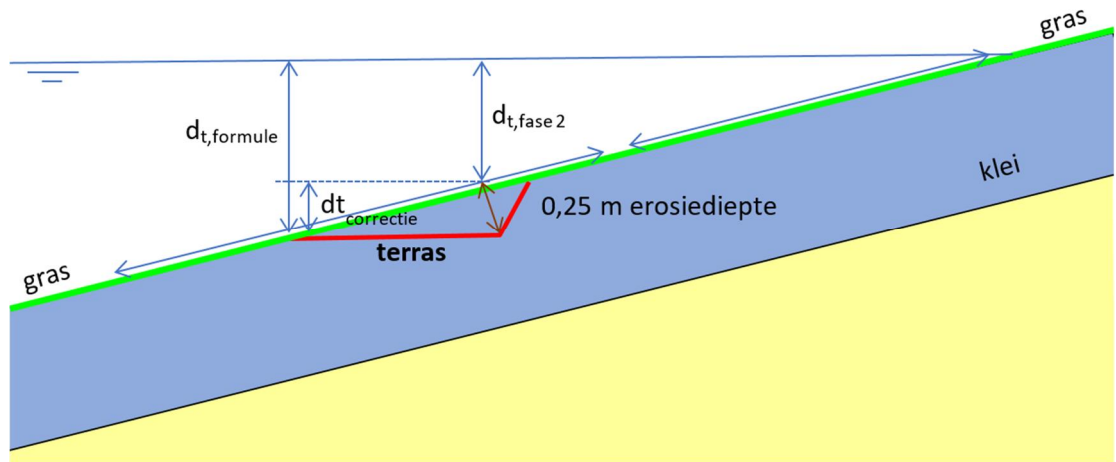
- $d_{t, Mourik2020}$ = diepte onder de stilwaterlijn van de onderrand van de erosiekuil (m)
- H_{m0} = significante golfhoogte bij de teen van de dijk (m)
- $V_{e, belast}$ = erosievolume per meter dijk in de belaste zone (m³/m). De belaste zone is de zone vanaf $d_{t, Mourik2020}$ onder de stilwaterlijn tot aan de kruin van de dijk. $d_{t, Mourik2020}$ moet daarom iteratief bepaald worden.

De erosiediepte volgens formule (12) is gebaseerd op de vorm en ontwikkeling van het erosieprofiel zoals beschreven in Mourik (2020). De ontwikkeling van het erosieprofiel zoals waargenomen bij de Deltagootproeven voor de Brede Groene Dijk (van Steijn e.a. (2021)) wijkt hier echter wat van af, waardoor de diepte waar de erosie begint wordt overschat door $d_{t, Mourik2020}$. In Van Steijn e.a. (2021) is geen nieuwe beschrijving van d_t afgeleid en daarom is dat hier alsnog gedaan. Er is voor de reserchtool van Deltares onderstaande schatting van $d_{t, fase2}$ gebruikt op basis van $d_{t, Mourik2020}$ en een correctie op basis van het gemeten erosieprofiel in de Deltagoot.

$$d_{t, fase2} = d_{t, Mourik2020} - d_{t, correctie} \quad (13)$$

$$d_{t,correctie} = 0,25 \cdot \cos \alpha \quad (14)$$

Figuur 4.4 geeft een toelichting van de erosiediepte $d_{t,fase2}$ die gebruikt wordt bij de erosieberekeningen van fase 2.

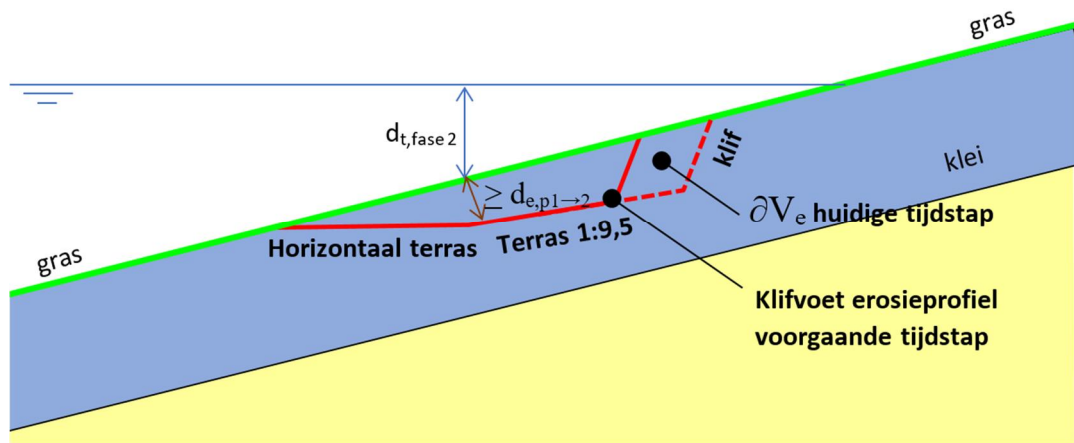


Figuur 4.4 Erosiediepte van fase 2

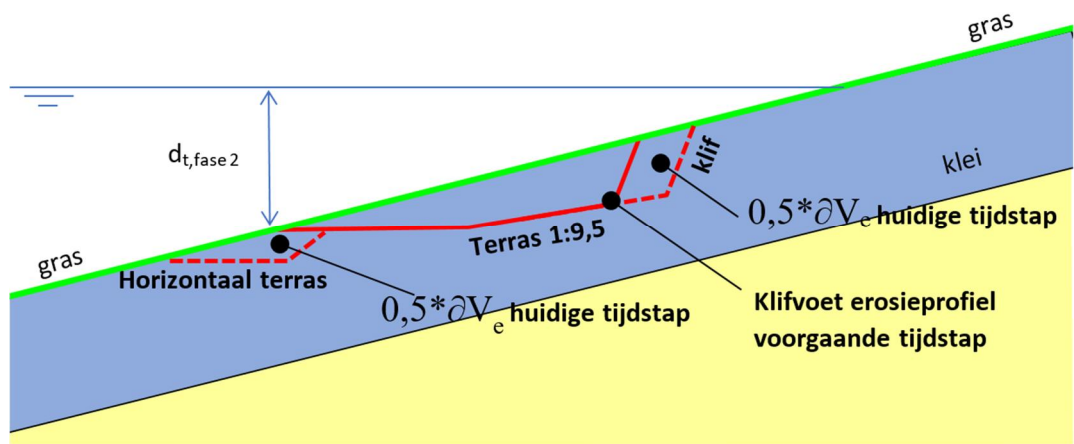
In de software moet voor alle denkbare situaties van stijgende of dalende waterstand en variërende golfcondities het verloop van de vorm van de erosiekuil worden berekend. De Deltagootproeven geven hiervoor slechts ten dele input en daarom zijn op basis van engineering judgement aannames gedaan voor het verloop van het erosieprofiel als aanvulling op de beschikbare kennis uit de Deltagootproeven. Dit is onderstaand beschreven.

Afhankelijk van de erosie die al aanwezig is op de locatie van $d_{t,fase2}$ onder de waterlijn zijn er twee mogelijkheden voor de groei van het erosiegat in fase 2:

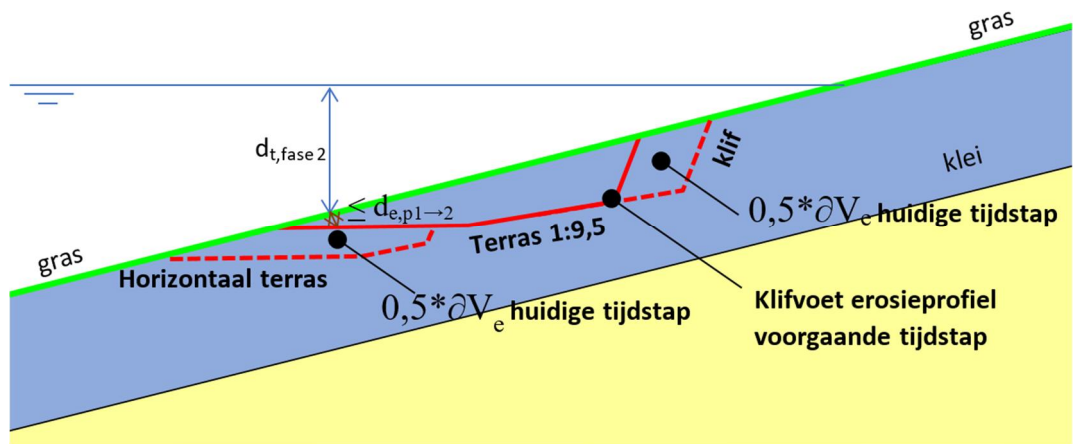
1. De erosie bij $d_{t,fase2}$ onder de waterlijn is groter of gelijk aan de erosiediepte waarbij fase 1 over gaat naar fase 2 ($d_{e,p1 \rightarrow 2}$): er vindt alleen erosie plaats bij de klifvoet. De erosiesnelheid is $\partial V_e / \partial t$. Dit is geschetst in Figuur 4.5.
2. De erosie bij $d_{t,fase2}$ onder de waterlijn is kleiner dan de erosiediepte waarbij fase 1 over gaat naar fase 2 ($d_{e,p1 \rightarrow 2}$): Er vindt erosie plaats zowel bij de klifvoet als bij $d_{t,fase2}$ onder de stilwaterlijn. Bij de klifvoet is de erosiesnelheid $0,5 \partial V_e / \partial t$, net als bij $d_{t,fase2}$ onder de stilwaterlijn. Er zijn twee mogelijkheden voor de vorm van de erosie bij $d_{t,fase2}$ onder de stilwaterlijn
 - a. Vorm van het erosiegat van fase 1 (horizontaal terras en klif van 2:1) als het erosievolume kleiner of gelijk is aan het volume van een erosiegat met diepte $d_{e,p1 \rightarrow 2}$. Dit is geschetst in Figuur 4.6.
 - b. Vorm van het erosiegat van fase 2 (horizontaal terras, terras met talud van 1:9,5 en klif van 2:1) als het erosievolume groter is dan het volume van een erosiegat met diepte $d_{e,p1 \rightarrow 2}$. Dit is geschetst in Figuur 4.7.



Figuur 4.5 Groei van het erosiegat tijdens fase 2: mogelijkheid 1 met alleen groei vanaf de klifvoet



Figuur 4.6 Groei van het erosiegat tijdens fase 2: mogelijkheid 2a met groei vanaf de klifvoet en vanaf $d_{t, fase 2}$ met de vorm van het fase 1 erosieprofiel



Figuur 4.7 Groei van het erosiegat tijdens fase 2: mogelijkheid 2b met groei vanaf de klifvoet en vanaf $d_{t, fase 2}$ met de vorm van het fase 2 erosieprofiel

Door de variërende condities tijdens een storm verplaatst de locatie van $d_{t, fase 2}$ onder de stilwaterlijn langs het buitentalud van de dijk. Hierdoor ontstaat er een erosieprofiel met meerdere kliffen met helling van 2:1, meerdere terrassen met helling van 1:9,5 en (mogelijk) ook meerdere horizontale terrassen. De erosie die verder groeit bij de klifvoet, groeit verder vanaf de klifvoet met de grootste erosiediepte.

5 Resultaten van de faalkansberekeningen

Het erosieproces zoals beschreven in hoofdstuk 4 is geïmplementeerd in de researchtool van Deltares. Vervolgens zijn er probabilistische berekeningen uitgevoerd met de gegenereerde waterstanden en golfcondities, zoals beschreven in Hoofdstuk 3. In de probabilistische berekeningen zijn de volgende als stochastische variabele gebruikt:

- Waterstand (h), gegenereerd met Hydra-Ring
- Significante golfhoogte (H_{m0}), gegenereerd met Hydra-Ring
- Golfperiode bij de piek van het spectrum (T_p), gegenereerd met Hydra-Ring
- Golfrichting (β), gegenereerd met Hydra-Ring
- Modelonzekerheid in formules van eerste fase van het erosieproces (m_1) (normaal verdeeld met: $m= 1,0$ en $\sigma = 0,4$)
- De erosiecoëfficiënt voor het erosieproces in fase 1 (c_d) is 0,67 per uur. Deze waarde is gebaseerd op de beproefde situaties, inclusief het effect van eens per vijf jaar een zeer hete en droge zomer.
- Modelonzekerheid in formules van tweede fase van het erosieproces (m_2) (normaal verdeeld met $\mu(m_2) = 1,0$ en $\sigma(m_2) = 0,25$)
- De erosiecoëfficiënt voor het erosieproces in fase 2 (c_e) is gekozen op basis van de erosiesnelheid van de Dollarddijk in de Deltagoot en de erosiesnelheid van de Valgenwegklei in de Deltagoot. Van de Dollarddijk is bekend dat de klei niet goed is aangelegd waardoor de erosiesnelheid groter zal zijn dan gemiddeld. De klei van de Valgenweg zal worden toegepast op de Brede Groene Dijk, maar was in geroerde toestand aangebracht in de Deltagoot waardoor de erosiesnelheid kleiner zal zijn dan gemiddeld. Op basis hiervan is aangenomen dat de erosiesnelheid van de Dollarddijk ($m_2 \cdot c_e = 1$) een modelonzekerheid (m_2) heeft van 1,25 ($\mu + \sigma$), verder is aangenomen dat de Valgenwegklei een modelonzekerheid (m_2) heeft van 0,75 ($\mu - \sigma$). Dit leidt tot de keuze van 0,8 voor c_e .
- De onzekerheid omtrent de erosiediepte bij de overgang van de eerste naar de tweede fase van het erosieproces (normaal verdeeld met: $m= 0,5$ m en $\sigma = 0,1$ m)

De resultaten van de aangepaste researchtool van Deltares met het nieuwe erosieproces wat volgde uit het Deltagootonderzoek voor de brede Groene Dijk zijn gecontroleerd door de condities zoals getest in de Deltagoot na te rekenen. De resultaten zijn gegeven in Bijlage B en blijken voldoende in overeenstemming te zijn om de probabilistische berekeningen uit te voeren.

Verder zijn er nog controleberekeningen uitgevoerd om te beoordelen of er een voldoende grote dataset van hydraulische belastingen is gebruikt voor de probabilistische berekeningen. Deze resultaten zijn gegeven in Bijlage A. Uit de resultaten blijkt dat er een voldoende grote dataset is gebruikt.

De resultaten van de probabilistische berekeningen met afzonderlijke stormen, met alle stormen gedurende een winterhalfjaar en met de combinatie van GEBU en GEKB zijn gegeven in onderstaande paragrafen.

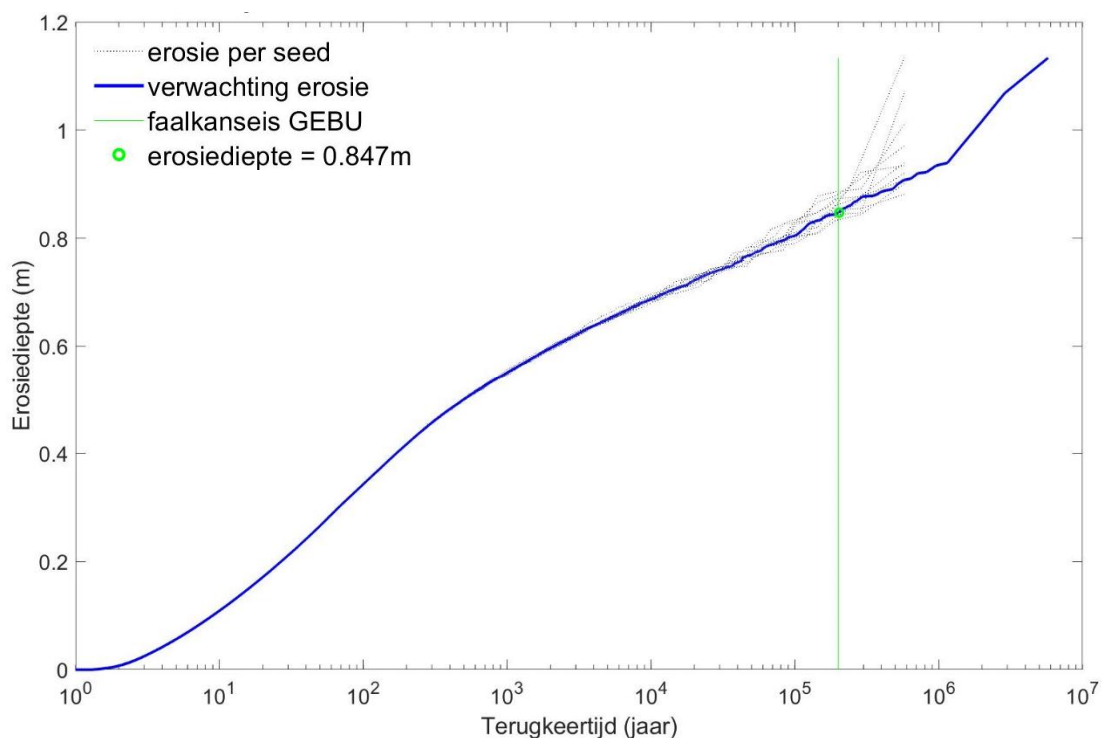
5.1 Erosie ten gevolge van afzonderlijke stormen

De probabilistische berekeningen geven de erosiediepte als functie van de terugkeertijd als resultaat, waarbij terugkeertijd = 1/faalkans van de kleibekleding met gras. Deze overschrijdingskromme van de erosiediepte is gegeven in Figuur 5.1.

De probabilistische berekeningen zijn voor alle gebeurtenissen 10 maal uitgevoerd, elke keer met een andere de trekking (seed) van de sterkteparameters. Op deze manier zijn er verschillende combinaties van sterkte en belasting doorgerekend. De blauwe stippellijnen in Figuur 5.1 geven de resultaten per seed. De resultaten van alle seeds tezamen geven de verwachting van de erosiediepte: de blauwe lijn in Figuur 5.1.

In Figuur 5.1 is verder te zien dat de erosiediepte 0,85 m is bij de faalkanseis voor het mechanisme GEBU (terugkeertijd van 200.000 jaar). De dikte van de kleilaag op de Brede Groene Dijk is ruim dikker dan 0,85 m. Daarmee is de faalkans van de klei met grasbekleding op het buitentalud van de Brede Groene Dijk veel kleiner dan de faalkanseis en is de bekleding ruim voldoende sterk.

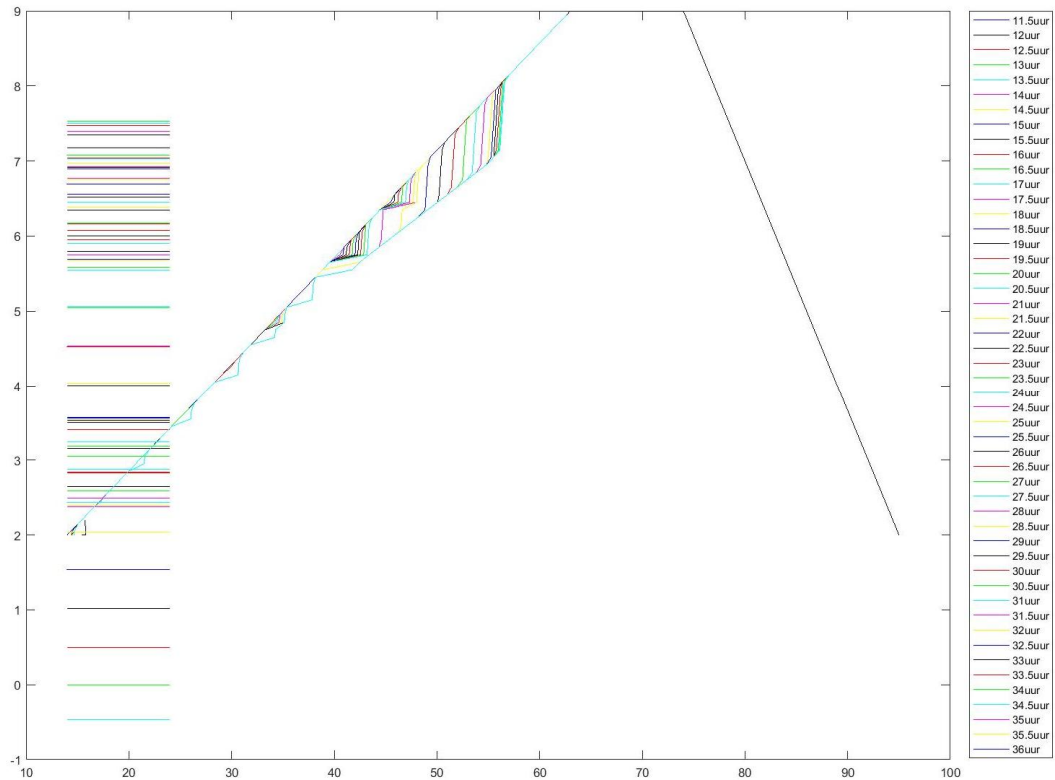
Verder is in Figuur 5.1 te zien dat er erosie met een diepte van orde 10 cm optreedt met een terugkeertijd van orde 10 jaar. Deze resultaten zijn echter mogelijk niet representatief, omdat de erosieformules zijn afgeregeld op basis van hoge golven die voorkomen rond het ontwerppunt (zoals getest in de Deltagoot) en niet voor lagere golven die orde 1/10 jaar voorkomen.



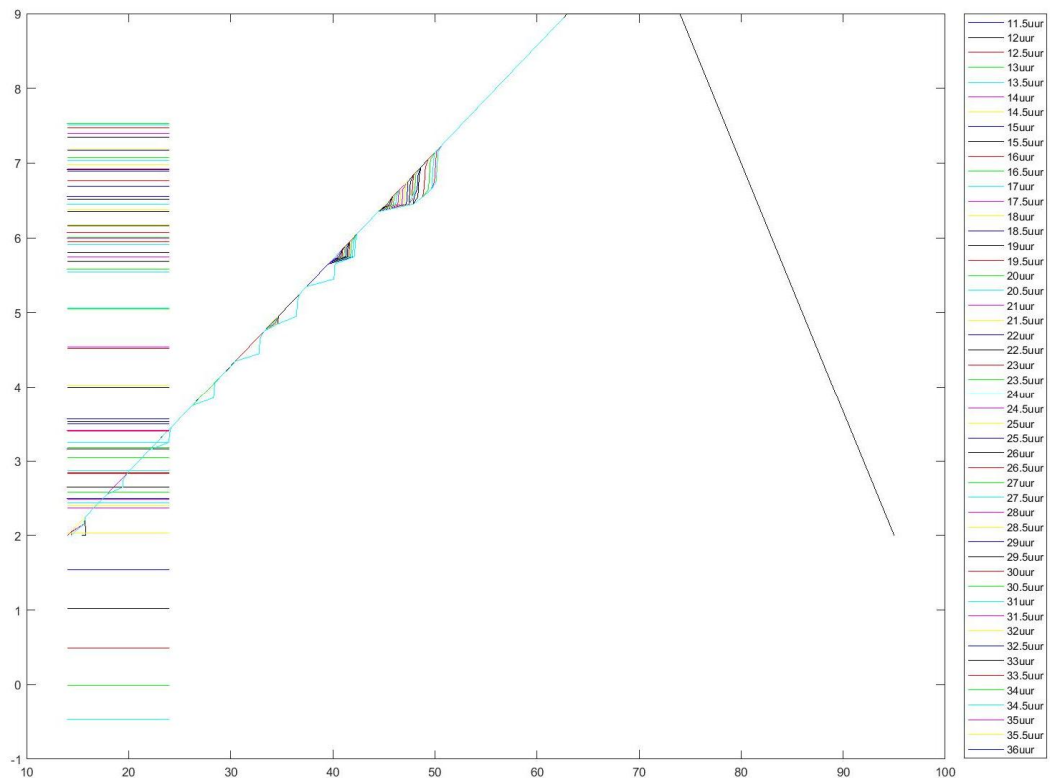
Figuur 5.1 Erosiediepte ten gevolge van afzonderlijke stormen als functie van de terugkeertijd

Twee voorbeelden van de golfhoogtes en de waterstanden die horen bij een gebeurtenis rond het ontwerppunt zijn gegeven in Figuur 3.4 en Figuur 3.5. In deze figuren is te zien dat de belasting van beide gebeurtenissen aanzienlijk verschilt. Een grotere belasting samen met een grotere sterkte (Figuur 3.4) en een kleinere belasting samen met een kleinere sterkte (Figuur 3.5) levert beide een erosiediepte van orde 0,85 m op. Bij deze stormen is de maximale waterstand respectievelijk 8,3 m en 6,3 m. De golfhoogte op de top van de storm is respectievelijk 3,2 m en 2,4 m. Deze golfhoogte wordt echter begrensd door de waterdiepte waardoor de maximale golfhoogte bij de teen van de dijk respectievelijk 3,1 m en 1,9 m is. De golfrichting heeft in beide gevallen een kleine hoek ten opzichte van de dijknormaal. De equivalente loodrecht invallende golfhoogte op de top van de storm is respectievelijk 2,6 m en 1,7 m. De golfcondities liggen in de buurt van de golfcondities die gebruikt zijn in het Deltagootonderzoek voor de Brede Groene Dijk en welke gebruikt zijn om de erosieformules

(7) en (11) te ontwikkelen. Dit geeft aan dat de golfcondities in het ontwerp punt binnen het toepassingsgebied van de erosieformules vallen.



Figuur 5.2 Voorbeeld van de ontwikkeling van het erosieprofiel gedurende een extreme storm en een relatief lage sterkte van de dijk



Figuur 5.3 Voorbeeld van de ontwikkeling van het erosieprofiel gedurende dezelfde extreme storm en een relatief grote sterkte van de dijk

Figuur 5.2 en Figuur 5.3 geven inzicht in de ontwikkeling van het erosieproces bij variërende golfcondities en waterstand, zoals is geïmplementeerd in de researchtool van Deltares. Beide figuren geven het erosieprofiel weer van de gebeurtenis uit de dataset met hydraulische belastingen met de grootste golfhoogte. De horizontale lijnen aan de linkerkzijde van de figuur geven de waterstanden weer tijdens de tijdstappen van 0,5 uur in de storm. Daarnaast is het erosieprofiel van iedere tijdstap van 0,5 uur weergegeven. De erosieprofielen van beide figuren laten zien dat er door de variërende waterstand op verschillende hoogtes een erosiegat is ontstaan in fase 1. Verder is te zien dat in beide gevallen de erosie in fase 2 terecht is gekomen. In Figuur 5.2 is er echter een veel groter erosiegat ontstaan dan in Figuur 5.3. Dit komt door de verschillende trekkingen van de sterkteparameters. De dijk van Figuur 5.2 heeft een kleinere sterkte dan de dijk van Figuur 5.3.

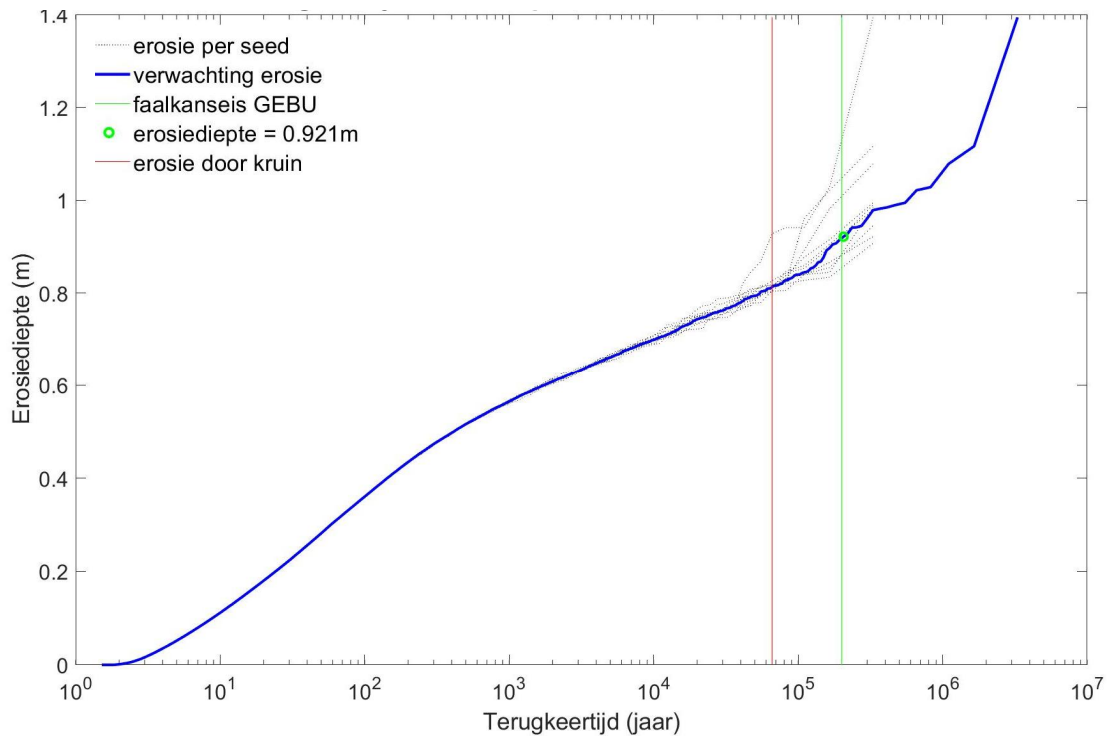
5.2 Erosie ten gevolge van winterhalfjaren

De overschrijdingskromme van de erosiediepte ten gevolge van alle stormen tijdens een stormseizoen (winterhalfjaar) is gegeven in Figuur 5.4. Dit betreft de cumulatieve erosie van alle stormen in een winterhalfjaar.

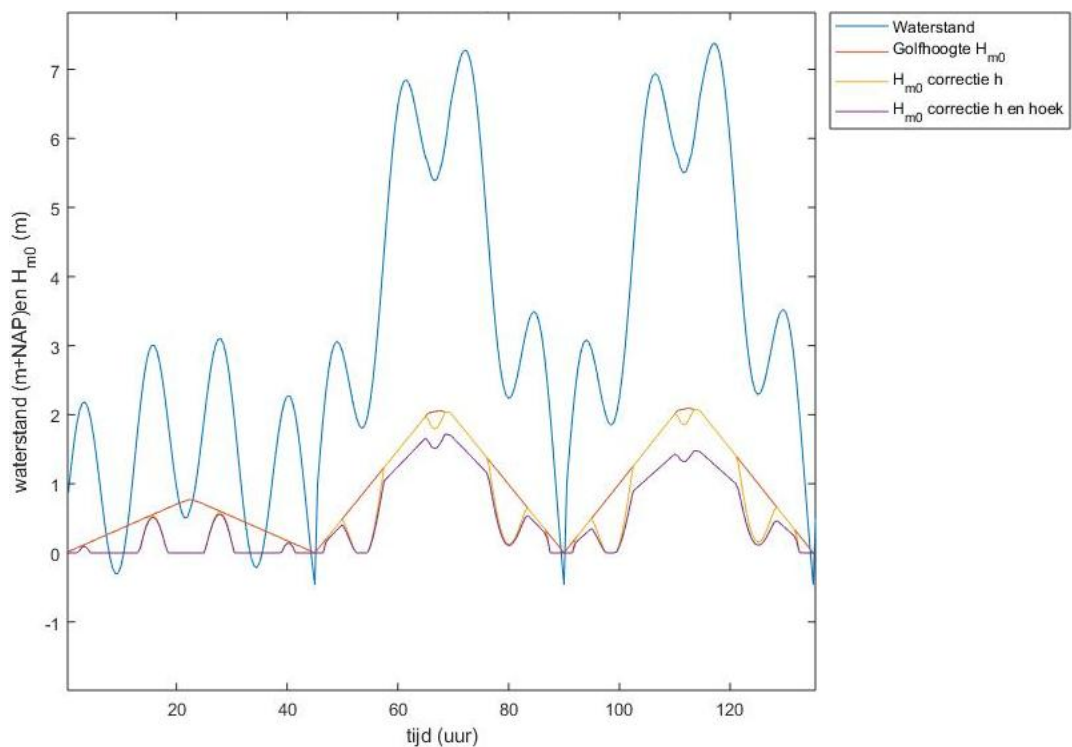
De probabilistische berekeningen zijn voor alle winterhalfjaren 10 maal uitgevoerd, elke keer met een andere trekking (seed) van de sterkteparameters. Op deze manier zijn er verschillende combinaties van sterkte en belasting doorgerekend. De stippellijnen in Figuur 5.4 geven de resultaten per seed. De resultaten van alle seeds tezamen geven de verwachting van de erosiediepte: de blauwe lijn in Figuur 5.4.

In Figuur 5.4 is verder te zien dat de erosiediepte 0,92 m is bij de faalkanseis voor het mechanisme GEBU (terugkeertijd van 200.000 jaar). De erosiediepte bij de faalkanseis ten gevolge van alle stormen gedurende een stormseizoen is orde 0,1 m groter dan de erosiediepte ten gevolge van individuele stormen (0,85 m). De dikte van de kleilaag op de Brede Groene Dijk is echter ruim dikker dan 0,92 m. Daarmee is de faalkans van de klei met grasbekleding op het buitentalud van de Brede Groene Dijk veel kleiner dan de faalkanseis en is de bekleding ruim voldoende sterk.

De rode lijn in Figuur 5.4 geeft de terugkeertijd aan van erosie die de kruin bereikt: een terugkeertijd van 60.000 jaar. In het geval dat het erosieprofiel de kruin snijdt zijn de erosieformules mogelijk niet goed toepasbaar, omdat de erosieformules hier niet voor bedoeld zijn. Met de huidige erosieformules zal de erosie bij de kruin eerst sneller de diepte in groeien dan elders op het talud, omdat het erosievolume over een kleinere hoogte wordt verdeeld. Vanaf het moment dat het terras van het erosieprofiel de kruin snijdt zal het erosieproces echter stagneren bij gelijkblijvende condities (bij lagere waterstanden groeit de erosie wel verder). Of dit in werkelijkheid ook het geval zal zijn is niet bekend. Stagnatie van het erosieproces zal terug te zien zijn in de overschrijdingskromme van de erosiediepte door een afvlakking van de kromme. In Figuur 5.4 is geen duidelijke afvlakking te zien in de erosiediepte. Dit geeft aan dat er nauwelijks stagnatie van het erosieproces is opgetreden bij de doorgerekende winterhalfjaren. Hierdoor is de verwachting dat de resultaten bij de faalkanseis representatief zijn.



Figuur 5.4 Erosiediepte ten gevolge van alle stormen gedurende een stormseizoen (winterhalfjaar) als functie van de terugkeertijd



Figuur 5.5 Alle relevante stormcondities gedurende het winterhalfjaar bij het ontwerp punt

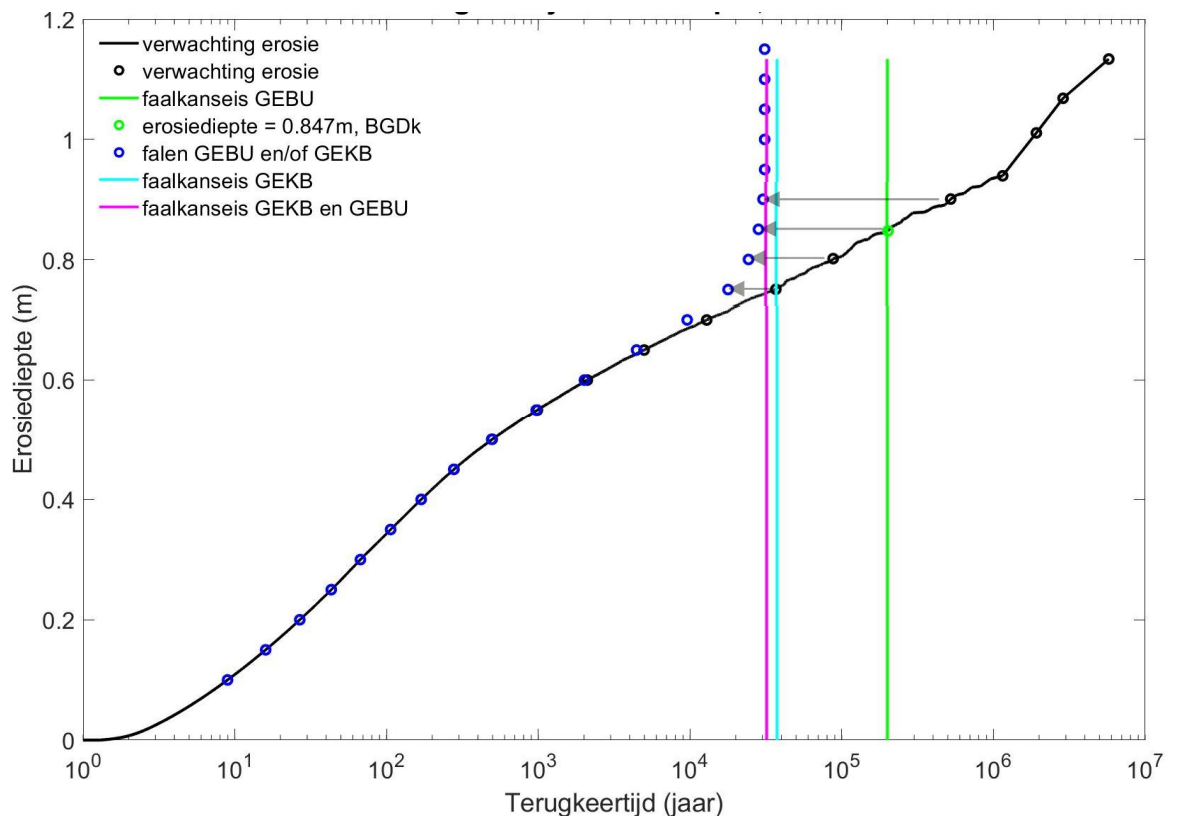
De golfcondities en waterstanden die horen bij de stormen van het winterhalfjaar die de erosiediepte van 0,92 m van het ontwerp punt heeft veroorzaakt, zijn weergegeven in Figuur 5.5. In deze figuur zijn alleen de relevante stormen van dit winterhalfjaar weergegeven. Relevante stormen zijn stormen die erosie kunnen veroorzaken: stormen met een equivalente

loodrecht invallende golfhoogte van minimaal 0,5 m. In het winterhalfjaar van het ontwerp punt treden 3 relevante stormen op. De eerste storm heeft een maximale waterstand van orde 3,1 m en een maximale golfhoogte van orde 0,55 m. De tweede en de derde storm hebben een hogere maximale waterstand van orde 7,3 m en een maximale golfhoogte van respectievelijk 1,7 m en 1,5 m.

5.3 Gecombineerde faalkans van GEBU en GEKB

Als eerste (conservatieve) schatting voor het falen van de grasbekleding van de kruin en het binnentalud (GEKB) is een overslagdebiet van 10 l/s/m of groter aangehouden tijdens de top van de storm. Vervolgens is voor verschillende kleilaagdiktes in de range van 0,1 m tot 1,2 m voor alle gebeurtenissen bekeken of de dijk faalt door het mechanisme GEBU en/of het mechanisme GEKB. Falen door het mechanisme GEBU treedt op als de erosiediepte groter is dan de kleilaagdikte.

De resultaten van de terugkeertijd van falen van de dijk door GEBU en/of GEKB, als functie van de kleilaagdikte op het buitentalud, zijn weergegeven in Figuur 5.6 tezamen met de terugkeertijd van de erosiediepte als alleen het mechanisme GEBU wordt beschouwd.



Figuur 5.6 Terugkeertijd van falen van de dijk door GEBU en/of GEKB afhankelijk van de kleilaagdikte op het buitentalud

Voor het begrijpen van Figuur 5.6 moet steeds de terugkeertijd bij een bepaalde kleilaagdikte beschouwd worden. Er zijn daarbij twee terugkeertijden: alleen GEBU (grootste waarde) en GEBU+GEKB.

In Figuur 5.6 is te zien dat de terugkeertijd van falen van de dijk door GEBU en/of GEKB voor kleilaagdiktes op het buitentalud tot ongeveer 0,5 m gelijk is aan de terugkeertijd van de erosiediepte als alleen het mechanisme GEBU wordt beschouwd. Dit betekent dat voor de gebeurtenissen met een overslagdebiet van 10 l/s/m er ook altijd minimaal 0,5 m erosie

optreedt: er zijn evenveel gebeurtenissen met falen door GEBU en/of GEKB dan gebeurtenissen met falen door GEBU. Voor kleilaagdiktes groter dan 0,5 m zijn er wel meer gebeurtenissen met falen door GEBU en/of GEKB dan gebeurtenissen met falen door GEBU. Hierdoor wordt de terugkeertijd van falen kleiner (en de faalkans groter) voor kleilaagdiktes groter dan 0,5 m wanneer de mechanismen GEBU en GEKB tezamen worden beschouwd.

In Figuur 5.6 is te zien dat grafiek van het falen van de dijk door GEBU en/of GEKB nagenoeg verticaal loopt bij een terugkeertijd van orde 30.000 jaar. Dit betekent dat er ongeveer 1/30.000 jaar golfoverslag van 10 l/s/m of meer optreedt, waardoor de faalkans vanaf hier gedomineerd wordt door golfoverslag (conservatieve schatting voor GEKB) en falen door GEBU geen invloed meer heeft op de faalkans. Voor de gecombineerde faalkanseis van 1/37.500 is daarom geen erosiediepte en benodigde kleilaagdikte te bepalen. Dit betekent echter niet dat de kruinhoogte van de dijk te laag is. Het gebruik van 10 l/s/m of meer golfoverslag als faaldefinitie voor het mechanisme GEKB is conservatief. Wanneer gebruik wordt gemaakt van de cumulatieve overbelastingsmethode om falen van de grasbekleding op de kruin en het binnentalud te bepalen kan een betere schatting van falen door GEKB worden gevonden.

De erosiediepte bij de faalkanseis van GEBU is echter zodanig veel kleiner dan de kleilaagdikte op het buitentalud van de Brede Groene Dijk dat het niet nodig is om de faalmechanismen GEBU en GEKB samen te beschouwen in een gedetailleerde analyse met de cumulatieve overbelastingsmethode.

6 Conclusies

In het kader van het demonstratieproject Brede Groene Dijk (BGD) wordt onderzocht of een dijk gebouwd kan worden met lokaal gewonnen klei afkomstig van de kwelder en klei gemaakt van zout (bagger)slib. Het onderzoek wordt uitgevoerd onder de naam Onderzoek Geschiktheid Deltaklei (OGD). Binnen het OGD wordt een koppeling gelegd met de Pilot Kleirijperij waarin onderzocht wordt hoe slib om te vormen tot klei.

In de Deltagoot van Deltares is in 2021 de erosiesnelheid bepaald van klei uit de kleirijperij (Klutenplasklei en Valgenwegklei), van de huidige Dollarddijk en van de Groene dijk bij Blija in Friesland. Op basis van dit onderzoek zijn nieuwe erosieformules ontwikkeld voor dijken met een flauw talud. Deze formules en het erosieproces zoals waargenomen in de Deltagoot is geïmplementeerd in de researchtool van Deltares voor het maken van probabilistische berekeningen.

De researchtool van Deltares is vervolgens gebruikt om probabilistische berekeningen te maken voor de Brede Groene Dijk. Deze tool maakt gebruik van een Monte Carlo simulatie om de faalkans te bepalen. Voor deze Monte Carlo simulatie zijn er miljoenen stormpiek condities (combinaties van waterstand, golfhoogte, golfperiode en golfrichting tijdens de top van storm) gemaakt met behulp van Hydra-Ring. Van deze stormpiek-condities zijn vervolgens gebeurtenissen gemaakt met een realistisch verloop van de waterstand en de golfcondities gedurende een storm van 45 uur. De belasting van de gebeurtenissen die gebruikt zijn bij de probabilistische berekeningen verschilt daardoor aanzienlijk van de belasting die gebruikt is bij de Deltagootproeven, omdat in de Deltagoot een constante belasting van ruim 30 uur met de stormpiek-condities is gebruikt.

Daarnaast zijn er ook winterhalfjaren samengesteld uit de miljoenen gebeurtenissen, rekening houdend met de kans van voorkomen van de windrichtingen. Er zijn zo niet alleen probabilistische berekeningen uitgevoerd om de erosie te bepalen ten gevolge van de afzonderlijke stormen, maar ook ten gevolge van alle stormen gedurende een winterhalfjaar.

Voor deze miljoenen gebeurtenissen in combinatie met verschillende trekkingen van de sterkte van de dijk (de berekening is 10 keer herhaald met steeds een andere seed) is de erosie van de Brede Groene Dijk bepaald. De probabilistische berekeningen geven de erosiediepte als functie van de terugkeertijd als resultaat, waarbij terugkeertijd = 1/faalkans van de klei-bekleding met gras.

De probabilistische berekeningen geven een erosiediepte ten gevolge van afzonderlijke stormen van 0,85 m bij de faalkanseis voor het mechanisme GEBU (terugkeertijd van 200.000 jaar). De cumulatieve erosiediepte ten gevolge van alle stormen gedurende winterhalfjaren is 0,92 m bij de faalkanseis voor het mechanisme GEBU. De dikte van de kleilaag op de Brede Groene Dijk is ruim dikker dan 0,92 m. Daarmee is de faalkans van de klei met grasbekleding op het buitentalud van de Brede Groene Dijk veel kleiner dan de faalkanseis en is de bekleding ruim voldoende sterk.

De probabilistische berekeningen geven een aanzienlijk kleinere erosiediepte dan waargenomen in de Deltagoot bij de proeven met de Dollarddijkklei en de klei uit de kleirijperij. Dit komt doordat in de Deltagoot de dijk belast is met constante stormpiek-condities gedurende ruim 30 uur en bij de probabilistische berekeningen is voor de belasting een realistisch verloop van de waterstand en de golfcondities gedurende een storm van 45 uur gekozen. Hierdoor is de dijk in de probabilistische berekeningen aanzienlijk korter belast met de stormpiek-condities.

De erosiediepte bij de faalkanseis is zodanig veel kleiner dan de kleilaagdikte op het buitentalud van de Brede Groene Dijk dat het niet nodig is om de faalmechanismen GEBU en GEKB samen te beschouwen met de gecombineerde faalkanseis. Voor de beoordeling in het kader van GEKB levert het beschouwen van GEBU en GEKB tezamen niet veel op omdat de beschikbare kansruimte voor GEKB dicht bij de gecombineerde kansruimte van GEBU en GEKB ligt.

Referenties

Klein Breteler, M., A. Capel, G.A.M. Kruse, G.C. Mourik en D. Kaste (2012)
Erosie van een dijk na bezwijken van de steenzetting door golven
SBW reststerkte; analyse Deltagootproeven
Deltares, rapport 1204200-008, 18 mei 2012

Klein Breteler, M., en G.C. Mourik (2019)
Invloed hoek van golfaanval op graserosie op dijken
Deltares, rapport 11203720-017, 18 juli 2019

Klein Breteler, M. (2021)
Erosie van kleibekleding met gras op boventalud van Waddenzeedijken
Meetverslag Deltagootproeven
Deltares, rapport 11204841-006, 27 augustus 2021

Klein Breteler (2022)
Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk
Stap 3: OpenFOAM berekeningen voor invloed van waterstand en golfhoogte op erosie-
snelheid
Deltares, rapport 11206194-002, 29 maart 2022

Klein Breteler (2022a)
Erosie van kleibekleding met gras op boventalud van Waddenzeedijken
Analyse van de Deltagootproeven en berekeningen met OpenFoam
Deltares, rapport 11204841-006, 14 januari 2022

Klein Breteler, G.C. Mourik en D. Kaste (2022b)
Documentatie Steentoets,
Excel-programma voor het berekenen van de stabiliteit van steenzettingen
Deltares, rapport 11208059-002-GEO-0007, versie 22.2.1, juni 2022

Mourik, G.C. (2020)
Prediction of the erosion velocity of a slope of clay due to wave attack
WTI-2017 Product 5.21
Deltares, report 1209437-017, 20 July 2020

OI-2014 versie 4 (RWS 2017)
Handreiking ontwerpen met overstromingskansen,
Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansen-normen,
RWS, versie v4, Februari 2017

Steijn, P. van, en M. Klein Breteler (2021)
Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk
Stap 9: Meting erosiebestendigheid deltaklei met Deltagootproeven
Deltares, rapport 11206194-002, 5 oktober 2021

TAW (1996).
Technisch rapport klei voor dijken.
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, mei 1996.

TAW (2002).
Technical Report Wave Run-up and Wave Overtopping at Dikes.
Technical Advisory Committee on Flood Defences, the Netherlands, mei 2002.

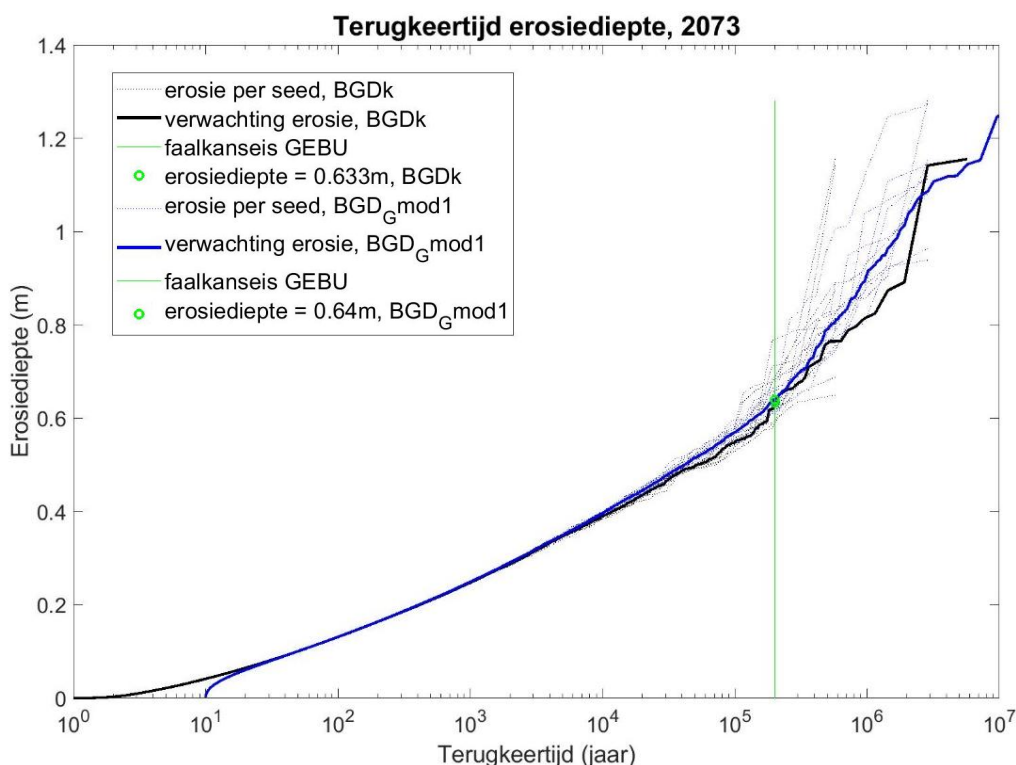
A Controleberekeningen

De dataset die gebruikt is voor de probabilistische berekeningen is representatief voor 333 duizend jaar. Dit ligt dicht bij de faalkanseis van 1/200.000 jaar voor het mechanisme GEBU.

Om te controleren of de dataset van 333 duizend jaar voldoende groot is om erosie met een faalkanseis van 1/200.000 jaar te evalueren is een grotere dataset gemaakt met 5 maal zoveel stormcondities. Deze dataset is derhalve representatief voor 1,67 miljoen jaar. Deze dataset is echter zodanig groot dat de berekeningen zeer lang duren en dat er te weinig werkgeheugen beschikbaar is op de rekenpc's om de berekeningen uit te kunnen voeren. Om toch een indicatie te krijgen van de invloed van de grootte van de dataset zijn berekeningen uitgevoerd met alleen de gebeurtenissen met een golfhoogte van 1 m of hoger. De resultaten van deze berekeningen zijn niet representatief voor kleinere terugkeertijden, maar wel voor de grotere terugkeertijden in de orde van 200.000 jaar.

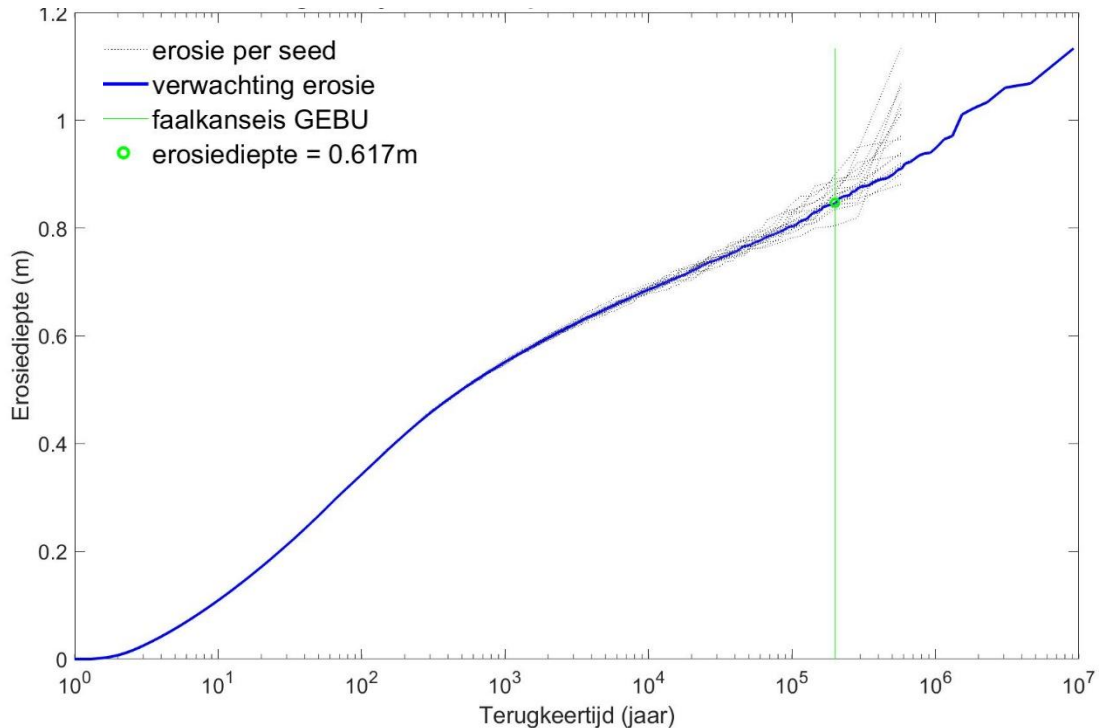
De berekeningen zijn eveneens voor 10 seeds uitgevoerd. De resultaten van de berekeningen met de basis dataset en met de grote dataset zijn gegeven in Figuur A-1. In deze figuur is te zien dat de erosiediepte rond de faalkanseis nauwelijks verschilt voor de basis dataset en de grote dataset. Dit geeft aan dat de basis dataset in combinatie met 10 seeds voldoende groot is voor de probabilistische berekeningen.

Merk op dat deze berekeningen zijn uitgevoerd met het model dat was gebruikt voor versie 1 van dit rapport (andere formule voor fase 1 van het erosieproces). Omwille van de rekentijd zijn de berekeningen met de grote dataset niet opnieuw uitgevoerd met het verbeterde model van het onderhavige rapport. De verbetering van de formule voor het erosieproces zal echter geen invloed hebben op het feit dat de dataset van 333 duizend jaar voldoende groot is. Het opnieuw uitvoeren van deze berekeningen is daarom ook niet nodig.



Figuur A-1 Terugkeertijd van de erosiediepte bepaald met de basis dataset en de grote dataset

Er is eveneens een controle uitgevoerd om te beoordelen of het aantal seeds voldoende groot is (met het verbeterde model van het onderhavige rapport). Voor de basis dataset zijn berekeningen uitgevoerd voor nog 6 extra seeds. De resultaten van de terugkeertijd van de erosiediepte is weergegeven in Figuur A-2. In deze figuur is te zien dat de erosiediepte rond de faalkanseis niet significant verschilt voor de berekeningen met 10 seeds en de berekeningen met 16 seeds. Dit geeft aan dat 10 seeds voldoende is voor de probabilistische berekeningen.



Figuur A-2 Terugkeertijd van de erosiediepte bepaald met de basis dataset met 16 seeds

- erosie per seed
- verwachting erosie
- faalkanseis GEBU
- erosiediepte = 0.847m

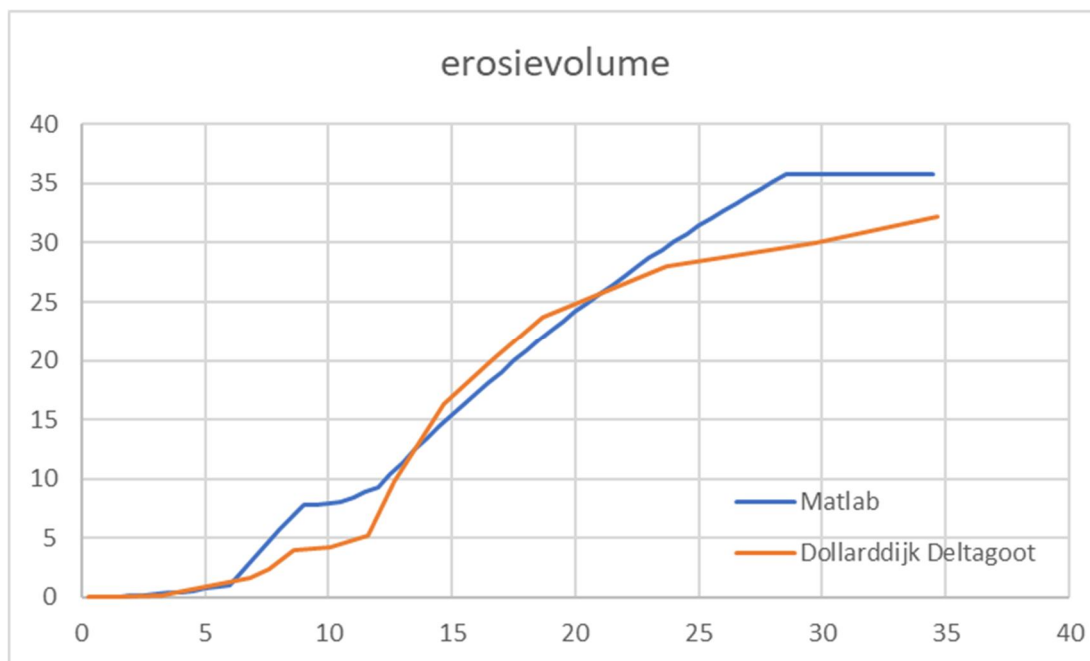
B Vergelijking erosie Deltagoot en Matlabmodel

De researchtool van Deltares, aangepast met het nieuwe erosieproces wat volgde uit het Deltagootonderzoek voor de Brede Groene Dijk, is gebruikt om de Deltagootproef met de Dollarddijkklei na te rekenen. Voor de waterstand en de golven zijn vergelijkbare condities gebruikt als toegepast in de Deltagoot. Verder is de geometrie van het model in de Deltagoot gebruikt en zijn de sterkteparameters van de dijk aangenomen als de volgende deterministische waarden:

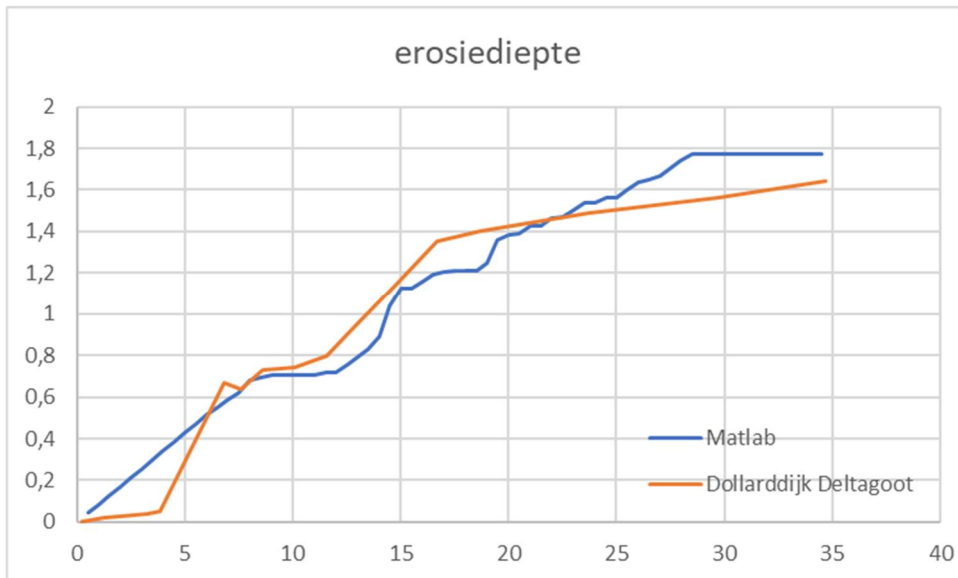
- Modelonzekerheid in formules van eerste fase van het erosieproces (m_1) = 1 (verwachtingswaarde van de verdeling)
- Modelonzekerheid in formules van tweede fase van het erosieproces (m_2) = 1 (verwachtingswaarde van de verdeling) in combinatie met een c_e van 1 (in plaats van 0,8) wat de dijk 1σ zwakker maakt dan de verwachtingswaarde
- Onzekerheid omtrent de erosiediepte bij de overgang van de eerste naar de tweede fase van het erosieproces $d_{e,1 \rightarrow 2} = 0,5$ (verwachtingswaarde van de verdeling)

De resultaten van het erosievolume en de erosiediepte zijn gegeven in Figuur B-1 en Figuur B-2. Zoals te zien in deze figuren komen het erosievolume en de erosiediepte redelijk overeen tot orde 24 uur golfbelasting, daarna wordt de erosie door het Matlabmodel overschat ten opzichte van de erosie in de Deltagoot. In het Matlabmodel wordt vanaf orde 28 uur een maximum erosievolume en erosiediepte bereikt doordat de erosie hier door de kruin gaat.

In werkelijkheid zal door de variërende waterstand en golfcondities er geen of nauwelijks gebeurtenissen zijn met een golfhoogte van orde 2 m die meer dan 24 uur duren. Daarom zullen voor de meeste gebeurtenissen die zijn doorgerekend in de probabilistische berekeningen de geconstateerde afwijking tussen de erosie in de Deltagoot en die in het Matlab-model geen invloed hebben. De resultaten zijn voldoende in overeenstemming om de probabilistische berekeningen uit te voeren met de researchtool van Deltares.



Figuur B-1 Erosievolume van de Dollarddijkklei in de Deltagoot en erosievolume volgens de researchtool van Deltares (Matlab)



Figuur B-2 Erosiediepte van de Dollarddijkklei in de Deltagoot en erosiediepte volgens de researchtool van Deltares (Matlab)



Deltares

www.deltares.nl