



# Pilot zandige vooroever Houtribdijk

Guideline ontwerp en beoordeling van dijk-  
voorlandsystemen



Rijkswaterstaat  
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat



EcoShape

**Contact**

Spuiboulevard 210,  
3311 GR Dordrecht  
+31 78 6111 099  
[info@ecoshape.nl](mailto:info@ecoshape.nl)  
[www.ecoshape.nl](http://www.ecoshape.nl)

# Samenvatting

## *Kader*

De pilot voorlandoplossing Houtribdijk was expliciet gericht op het sneller en beter onderbouwd kunnen realiseren van zandige versterkingswerken voor met name de belastingomstandigheden in de grotere meren. De (tussen)resultaten van deze pilot zijn inmiddels toegepast in zowel lopende als komende projecten van het HoogWaterBeschermingsProgramma(HWBP). Voorbeeld van zo'n project is de versterking van de Markermeerdijken tussen Hoorn en Edam, waarvan een deel van de versterkingsoplossing bestaat uit een zandige versterking (de zogenaamde oeverdijk). Ook is de kennis die in deze pilot is opgedaan gebruikt voor de dimensionering van de zandige versterking van het westelijke deel van de Houtribdijk en de zandige buitenranden van de Marker Wadden.

## *Rapportages*

In aanvulling op de meer technische basisrapportages zijn in het kader van de pilot voorlandoplossing Houtribdijk ook een aantal guidelines opgesteld. In een eerder stadium zijn reeds guidelines voor vergunningen en aanleg opgeleverd. Als afronding van het project komen ook een guideline Beheer en Onderhoud, een guideline Ontwerp en Beoordeling van dijk-voorlandssystemen en een notitie inzake de Business Case Zandige vooroevers beschikbaar.

## *Deze guideline*

Dit rapport betreft de guideline Ontwerp en Beoordeling van dijk-voorlandssystemen en geeft een aanzet tot het ontwikkelen van concrete rekenregels en handvatten voor het ontwerpen en beoordelen van voorlandoplossingen voor (bestaande) dijken. Bij de beoordeling van een voorlandoplossing is alleen de huidige toestand van de kering zelf (dijk inclusief voorland) van belang. De faalkans op basis van de huidige sterkte en belasting moet aan de vereisten voldoen. Bij het ontwerp moet rekening worden gehouden met de ontwikkeling in de tijd van de belasting (door zeespiegelstijging, toename rivierafvoer, meer-peilstijging, etc.) en met de sterkte van de kering (verliezen door langstransport, zettingen, etc.). Hierbij moet verantwoord worden omgegaan met onzekerheden in de lange-termijn ontwikkeling; deze kunnen aanzienlijk zijn.

## *Doelstelling*

Het rapport richt zich met name op de technische belemmeringen, zoals het gebrek aan concrete rekenregels en handvatten voor de integrale beoordeling van de veiligheid van de waterkering, inclusief de werking en de standzekerheid van het voorland. Door het wegnemen van deze belemmeringen kan invulling worden gegeven aan het ontwerp van een kering. Dit staat los van de wijze waarop de ontwerprandvoorwaarden worden aangepast aan de toekomstige omstandigheden.

## *Uitwerking*

Voor de uitwerking wordt eerst een beschrijving gegeven van verschillende typen dijk-voorlandssystemen. De typen zijn grofweg onder te verdelen in een voorland dat fungeert als zandige kering en een voorland als belastingrem. Vervolgens zijn de relevante principes voor zowel de beoordeling van bestaande keringen als het (technisch) ontwerp van nieuwe keringen beschreven en is een voorbeeld uitgewerkt. In het uitgewerkte voorbeeld wordt een faalkans berekend voor een dijk met zandig voorland, gebaseerd op de condities en het profiel van de pilot Houtribdijk. Tot slot worden enkele praktische aanbevelingen gedaan voor het opnemen van voorlanden in het ontwerp.

# Inhoudsopgave

Samenvatting.....	3
Inhoudsopgave .....	4
<b>1 Inleiding .....</b>	<b>6</b>
1.1 Kader .....	6
1.2 Probleemstelling.....	6
1.3 Opbouw rapport .....	7
1.4 Totstandkoming.....	7
<b>2 Dijk-voorlandsystemen .....</b>	<b>8</b>
2.1 Verschijningsvormen van voorlandoplossingen .....	8
2.2 Voorland als zandige kering .....	9
2.3 Voorland als belastingrem.....	9
2.4 Invloed op geotechnische faalmechanismen .....	10
<b>3 Principes beoordeling en ontwerp .....</b>	<b>11</b>
3.1 Voorland als zandige kering .....	11
3.2 Voorland als belastingrem .....	11
3.3 Morfologische vervorming.....	12
3.4 Berekening van belastingrem .....	14
3.4.1 Inleiding.....	14
3.4.2 Methode op basis van standzekerheid .....	14
3.4.3 Afslagberekening in het ontwerp punt .....	14
3.4.4 Integrale probabilistische benadering .....	14
3.5 Onzekerheden .....	15
<b>4 Toepassing voor het Markermeer .....</b>	<b>17</b>
4.1 Methode .....	17
4.2 Hydraulische belastingen .....	17
4.3 Overige parameters .....	18
4.4 Profielvorm .....	18
4.5 Relevantie van afslag voorland .....	19
4.6 Overschrijdingskans overslagdebiet.....	20
4.7 Overschrijdingskans golfhoogte .....	23
4.8 Conclusies .....	24
<b>5 Aanbevelingen voor ontwerp .....</b>	<b>25</b>
5.1 Golfoverslag en golfcondities bekleding.....	25
5.2 Geotechnische faalmechanismen .....	25
5.3 Onderhoud zandig voorland .....	25
5.4 Overige aanbevelingen .....	25
Referenties .....	27
Bijlage A – Statistiek Markermeer.....	28



# 1 Inleiding

## 1.1 Kader

Binnen het HoogWaterBeschermsProgramma (HWBP) wordt voor verschillende versterkingsprojecten de afweging gemaakt tussen traditionele versterkingsvormen en meer natuurlijke alternatieven, zoals zandige voorlandoplossingen. Deze laatste versterkingsvorm is langs de Noordzeekust, al dan niet met een achterliggende harde kering, reeds veelvuldig toegepast. Als voorbeeld kunnen kustversterkingen bij Scheveningen, Noordwijk en Katwijk worden genoemd. Voor minder energetische omstandigheden, zoals bij meren en rivieren, spelen informatie-lacunes over de haalbaarheid van een dergelijke oplossing een belangrijke rol in de keuze van het type versterking. Een van die lacunes betreft de wijze van ontwerpen en beoordelen van een voorlandoplossing voor een (bestaande) dijk, een zogenaamd dijk-voorlandstelsel.

In het kader van het HWBP-2 innovatiebudget voor projectoverstijgende innovaties is in de periode 2014-2018 door de Stichting EcoShape een pilot uitgevoerd, waarbij proefsectie met een zandig voorland is aangelegd aan de Markermeerzijde van de Houtribdijk. De pilot was gericht op het bijdragen aan het sneller en beter onderhouden kunnen realiseren van zandige versterkingswerken, specifiek voor grote meren, en kan zo toepassing vinden in lopende en toekomstige HWBP-projecten. Stichting EcoShape was initiatiefnemer van de pilot en heeft de pilot uitgevoerd. Het HWBP-2, uitgevoerd door Rijkswaterstaat, was opdrachtgever voor de pilot. De samenwerkende partijen binnen EcoShape voor de pilot Houtribdijk waren Arcadis, Alterra, Boskalis, Deltares, Van Oord, RHDHV en HKV IJN in Water. Het project zelf bestond uit de aanleg van een proefsectie, uitvoeren van een monitoringsprogramma en data-analyse.

De (tussen)resultaten van deze pilot hebben hun toepassing reeds gevonden in zowel lopende en komende HWBP-projecten. Voorbeeld daarvan is de dijkversterking van de Markermeerdijken tussen Hoorn en Edam waarvan een deel van de versterkingsoplossing bestaat uit een zandige versterking (de zogenaamde oeverdijk). Ook is de in de pilot opgedane kennis gebruikt voor de dimensionering van de zandige buitenranden van de compartimenten van de Marker Wadden.

Bovendien is voor ongeveer de helft van de Houtribdijk gekozen voor een zandige versterking, om de dijk weer te laten voldoen aan de veiligheidseisen. Hierbij is het uitgangspunt aangehouden dat de zandige versterking op zichzelf in staat moet zijn om de maatgevende belasting te keren. De huidige dijk fungeert als opsluiting van het nieuwe zandpakket, maar heeft op dit traject straks verder geen expliciete waterkerende functie meer.

Dit laatste uitgangspunt komt mede voort uit een gebrek aan kennis over de werking van zandige voorlanden in meren, en de bijbehorende officiële beoordelingsmethoden, en is nog gebaseerd op de veiligheidsfilosofie zoals die tot en met 2016 van kracht was. In dit document komen ook hybride keringen nadrukkelijk aan de orde, waarbij het voorland de belasting reduceert, en de dijk de resterende belasting moet kunnen keren. Bij dit type keringen kan worden volstaan met minder zand, wat de keuze voor een zandige versterking eerder aantrekkelijk maakt op andere locaties.

Het voorliggende rapport geeft een aanzet tot het ontwikkelen van concrete rekenregels en handvatten voor het ontwerpen en beoordelen van voorlandoplossingen voor (bestaande) dijken. Bij de beoordeling van een voorlandoplossing is alleen de huidige toestand van de kering zelf (dijk inclusief voorland) van belang. De faalkans op basis van de huidige sterkte en belasting moet aan de vereisten voldoen. Bij het ontwerp dient rekening gehouden te worden met de ontwikkeling in de tijd van de belasting (door zeespiegelstijging, toename rivierafvoer, meer-peilstijging, etc.) en van de sterkte van de kering (verliezen door langstransport, zettingen, etc.). Hierbij moet verantwoord worden omgegaan met onzekerheden in de lange-termijn ontwikkeling; deze kunnen aanzienlijk zijn.

## 1.2 Probleemstelling

De Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017 schrijft voor dat 'het voorland moet worden meegenomen in de schematisering en de beoordeling als dit aanwezig is – ook als het voorland niet opgenomen is in de legger' (artikel 6.6). Volgens de huidige wetgeving dienen alle waterkerende elementen dus ook als zodanig in rekening te

## Ontwerp en beoordeling van dijk-voorlandsystemen

worden gebracht. Als een zandige kering wordt aangelegd, is de dijkbeheerder dus verplicht om zowel de sterkte van het voorland als de (rest)sterkte van de achterliggende kering volledig mee te nemen in ontwerp en beoordeling.

Richtlijnen voor het ontwerpen en beoordelen van dijk-voorlandsystemen conform deze Regeling zijn echter nog niet beschikbaar. Beheerders van waterkeringen ervaren dan ook belemmeringen (zowel juridische als technische) bij het meenemen van voorlanden in de veiligheidsbeoordeling van waterkeringen. In de Projectoverstijgende Verkenning (POV) Voorlanden staan dit soort belemmeringen centraal, en wordt gepoogd deze weg te nemen om tot kostenbesparingen te komen.

Het voorliggende rapport richt zich met name op de technische belemmeringen, die vooral betrekking hebben op het gebrek aan concrete rekenregels en handvatten voor de integrale beoordeling van de veiligheid van de waterkering, inclusief de werking en de standzekerheid van het voorland. Met dit als basis kan ook invulling gegeven worden aan het ontwerp van een kering, los van de wijze waarop de hiervoor te hanteren randvoorwaarden worden aangepast aan de toekomstige omstandigheden.

### 1.3 Opbouw rapport

Dit rapport is als volgt opgebouwd. In hoofdstuk 2 is een beschrijving gegeven van verschillende typen dijk-voorlandsystemen. De typen zijn grofweg onder te verdelen in een voorland dat fungeert als zandige kering en een voorland als belastingrem.

In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op relevante principes voor zowel de beoordeling van bestaande keringen als het (technisch) ontwerp van nieuwe keringen.

In hoofdstuk 4 wordt een voorbeeld uitgewerkt, waarbij een faalkans wordt berekend voor een dijk met zandig voorland, gebaseerd op de condities en het profiel van de pilot Houtribdijk.

Het rapport eindigt met conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 5.

### 1.4 Totstandkoming

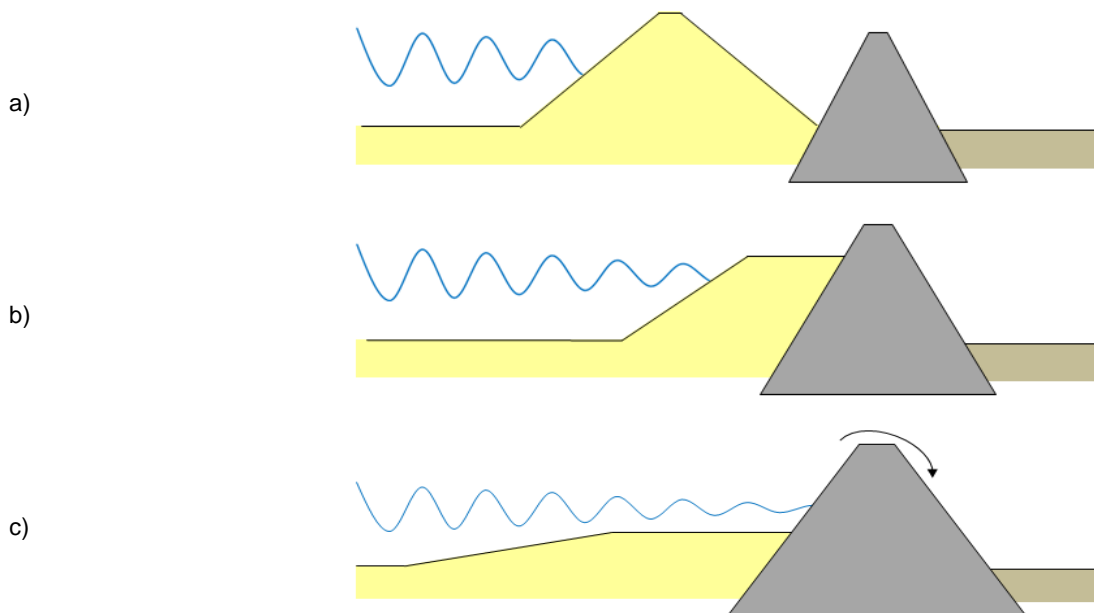
Dit rapport is opgesteld door V. Vuik en S. Ouwerkerk (HKV). De review werd verzorgd door B. Maaskant (HKV/POV-Voorlanden), Q. Lodder (RWS) en H. Steetzel (Arcadis). Laatstgenoemde was als projectmanager van de Pilot Houtribdijk ook verantwoordelijk voor het uniformeren van de verschillende guidelines.

## 2 Dijk-voorlandssystemen

Dit hoofdstuk geeft een beknopt overzicht van de verschillende verschijningsvormen van dijk-voorlandsystemen, en van de invloed die voorlanden kunnen hebben op de diverse faalmechanismen van de dijk. Paragraaf 2.1 laat zien welke verschijningsvormen van een dijk-voorlandstelsel mogelijk zijn. Vervolgens zijn de twee hoofdtypen (een zandige kering of een voorland dat fungeert als belastingrem) nader uitgewerkt in respectievelijk paragraaf 2.2 en paragraaf 2.3. In aanvulling hierop is nog aandacht gegeven aan de effecten op geotechnische mechanismen (paragraaf 2.4).

### 2.1 Verschijningsvormen van voorlandoplossingen

Bij een (aanwezig of op termijn voorzien) veiligheidstekort van een waterkering kan ervoor gekozen worden om deze zandig te versterken. Dit kan door aan de voorzijde een zekere hoeveelheid zand toe te voegen. De omvang van de benodigde zandige veiligheidsversterking hangt nauw samen met de (resterende) rol van de aanwezige dijk binnen de nieuwe waterkering (zie Figuur 2-1 en Tabel 2-1).



Figuur 2-1 Schematische weergave mogelijke combinatieoplossingen met afnemende omvang van de benodigde zandige aanvulling.

Aanduiding	Rol zandige versterking	Rol dijklichaam	Opmerking
a) Zandige kering	Standalone kering (duin)	Geen	Grensprofiel vóór dijk
b) Dijk als grensprofiel	Volledige sterkte	Grensprofiel	Grensprofiel voorin dijk
c) Dijk met voorland	Belastingrem	Regulier	Belastingreductie op dijk

Tabel 2-1 Overzicht van mogelijke zandige versterkingen en relatie met rol van de huidige dijk.

Bij de typen a en b vindt een beoordeling plaats op afslag, die in principe vergelijkbaar is met de beoordeling van de duinen langs de kust. Het verschil tussen de typen is de rol die de dijk heeft binnen (of buiten) het afslagprofiel. Dit wordt nader beschreven in paragraaf 2.2 Bij type c is sprake van een beoordeling zoals voor reguliere dijken, waarbij een reductie wordt toegepast op de golfcondities. Dit wordt nader beschreven in paragraaf 2.3. Tussen deze verschijningsvormen zijn overgangsvormen mogelijk, zoals dijk-in-duin constructies.



Uitgangspunt bij de nieuwe veiligheidsfilosofie is dat de volledige sterkte van alle waterkerende elementen wordt meegenomen bij ontwerp en beoordeling. Type a komt dus alleen in beeld als de aanwezige dijk van zeer slechte kwaliteit is, bij te grote onzekerheden over deze kwaliteit, of bij noodzaak van dure maatregelen bij de dijk indien voor type b of c zou worden gekozen.

In dit verband is het ook goed om kort in te gaan op de effecten van vegetatie. Indien het voorland als zandige kering (duin) fungeert, heeft vegetatie geen (positief) effect op de sterkte van de kering. Aanwezige vegetatie slaat immers gewoon af. Een mogelijk negatief effect wordt verkregen als de aanwezige vegetatie de afslag plaatselijk remt en leidt tot extra afslag naast deze locatie.

De aanwezigheid van vegetatie op een voorland dat dient als belastingrem kan ook tijdens maatgevende condities een effect hebben op de hydraulische condities. Een dergelijk effect kan zich uiten in een reductie van de golfhoogte, maar eventueel ook in een mutatie van de waterstand en/of de golfperiode (zie ook Arcadis, Deltares en HKV, 2017). In beide voorlandvormen heeft de vegetatie ook een effect op het beheer en onderhoud. Deze aspecten komen aan de orde in de 'Guideline Beheer en Onderhoud Zandige Voorlanden' (EcoShape, 2018b).

## 2.2 Voorland als zandige kering

Als het zandvolume primair dient als sterkte, dient de beoordeling te gebeuren op het mechanisme afslag, vergelijkbaar met de beoordeling van duinen langs de Noordzeekust. De manier waarop falen van de gehele waterkering is gedefinieerd, is afhankelijk van de rol die de dijk zelf krijgt toegekend (zie Figuur 2-1).

De dijk speelt geen enkele rol voor de waterveiligheid bij type a. Er is een zelfstandige zandige kering voor de dijk aangelegd. Deze oplossing is bijvoorbeeld gekozen bij de Hondsbossche en Pettemer zeewering. Bij type b fungeert de dijk als het grensprofiel, of tenminste als een deel daarvan. De oplossing met de dijk als grensprofiel is gekozen bij de versterking van de dijk ter hoogte van het Sophiastrand (Noord-Beveland), Nieuwvliet-Groede en Herdijkte Zwarte Polder (beide Zeeuws-Vlaanderen), en zal volgens de huidige plannen worden aangelegd voor de versterking van de Houtribdijk. Na afslag van het voorland dient een grensprofiel zo groot te zijn, dat een volledige doorbraak van de waterkering wordt voorkomen. Hierbij wordt vaak geen rekening gehouden met reeds aanwezig waterkerend vermogen in de aanwezige bekleding en kleilagen van de dijk. De afslag van het voorland mag dan niet verder reiken dan de buitenzijde van de dijk.

Oplossingen waarbij aanwezige sterkte van de achterliggende kering geheel of gedeeltelijk wordt genegeerd, zijn sinds 2017 minder voor de hand liggend, met het oog op de in paragraaf 1.2 genoemde wettelijke bepalingen. Alle elementen die aantoonbaar waterkerend vermogen hebben, moeten ook in het ontwerp en de beoordeling worden meegenomen.

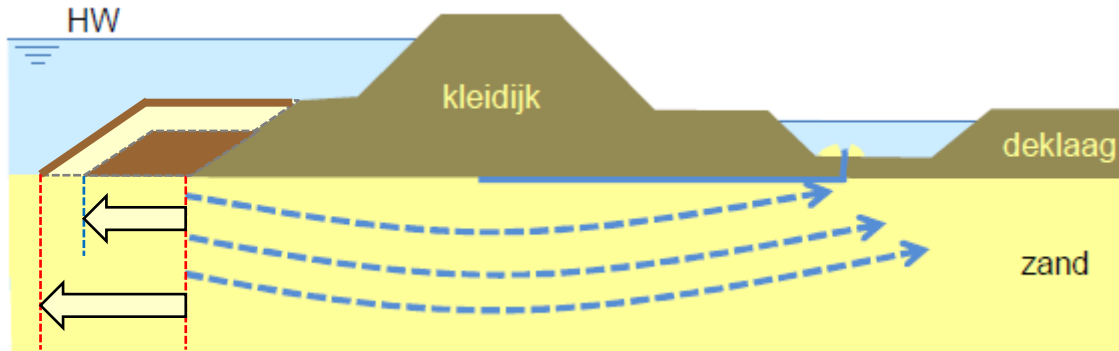
## 2.3 Voorland als belastingrem

Als het zandvolume primair dient om de golfaanval te reduceren, vindt een beoordeling plaats zoals voor reguliere dijken (type c uit Tabel 2-1). Door breking van golven op het ondiepe voorland en, indien relevant, door golfdemping door vegetatie, veroorzaakt de aanwezigheid van een voorland een verlaging van de golfhoogte aan de dijkeeten (Vuik et al., 2018). Als gevolg hiervan worden ook golfoploop en golfoverslag gereduceerd, en is de golfaanval op de bekleding op het buitentalud van de dijk lager. Doordat korte golven relatief sterker breken dan lange golven, wordt de gemiddelde golfperiode ( $T_{m-1,0}$ ) veelal langer. Beide effecten dienen in ogenschouw te worden genomen, om het effect van een voorland op golfoploop en golfoverslag goed te kunnen bepalen. Verder kan er, afhankelijk van de lokale geometrie van het voorland, ook sprake zijn van een verhoging van de lokale waterstand. Vanwege de rol voor zowel voorland als achterliggende kering wordt dit type kering ook vaak aangeduid als hybride kering.

De aanwezigheid van het voorland leidt dus ten opzichte van de hydraulische belasting op de rand van het voorland tot wijzigingen in zowel de waterstand, de golfhoogte als de periode. Ook de op het voorland aanwezige vegetatie kan hier nog een effect op hebben. Een dergelijk effect kan zich uiten in een reductie van de golfhoogte, maar natuurlijk ook in een mutatie van de waterstand en/of de golfperiode (zie ook Arcadis, Deltares en HKV, 2017).

## 2.4 Invloed op geotechnische faalmechanismen

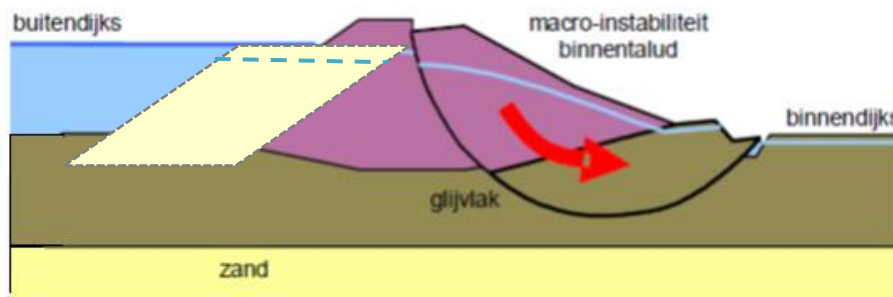
De aanwezigheid van een voorland kan een invloed hebben op de kans van optreden van het faalmechanisme opbarsten in combinatie met piping. Dit is het geval als er sprake is van een afdekkende kleilaag op het voorland, of bij een voorland met een kern van klei. In beide situaties wordt de kwelweglengte tussen binnen- en buitenzijde van de dijk vergroot (Figuur 2-2), en de faalkans voor het mechanisme piping gereduceerd.



Figuur 2-2 Verlenging kwelweglengte in het geval van aanwezigheid van een zandig voorland met afdekkende kleilaag (onderste pijl), of met een zandig voorland met kern van klei (bovenste pijl). Figuur op basis van Deltares (2016).

Daarnaast is er een mogelijke invloed op het faalmechanisme macrostabiliteit.

1. De stabiliteit van het buitentalud wordt vergroot doordat de massa van het voorland het afschuiven langs een glijcirkel bemoeilijkt. Daarmee reduceert een voorland de faalkans voor het faalmechanisme *macrostabiliteit buitenwaarts*.
2. Er is geen rechtstreekse invloed op de stabiliteit van het binnentalud, bij het faalmechanisme *macrostabiliteit binnenwaarts*. Echter, als dit faalmechanisme optreedt, is veelal sprake van een beperkte verlaging van de kruinhoogte van de dijk (1 à 2 meter). Het resterende dijklichaam kan het zand van het voorland blijven opsluiten aan landwaartse zijde. Als het aanwezige zandlichaam ook na eventuele afslag hoger ligt de piekwaterstand tijdens de storm, zal het zandlichaam verhinderen dat water het gebied achter de afgeschoven dijk binnendringt (Figuur 2-3). Alle waterstanden lager dan het voorland krijgen dan een verwaarloosbare bijdrage aan de faalkans, waardoor de totale faalkans van de dijk aanzienlijk gereduceerd kan worden.



Figuur 2-3 Faalmechanisme macro-instabiliteit binnenwaarts, bij een intredepunt van het schuifvlak in de kruin van de dijk (gebaseerd op: Deltares, 2016). Een eventueel aanwezig voorland boven de waterlijn voorkomt een doorbraak in het geval van een afschuiving en verzakking van de dijk (indicatief aangegeven in geel).

## 3 Principes beoordeling en ontwerp

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van relevante processen voor het ontwerpen en beoordelen van dijk-voorlandsystemen, en geeft een aantal mogelijkheden voor het rekenen aan faalkansen.

### 3.1 Voorland als zandige kering

In deze paragraaf staat het systeem centraal waarbij het voor de dijk gelegen voorland fungeert als zelfstandige kering (type a uit Tabel 2-1). Als de dijk als grensprofiel wordt beschouwd (type b uit Tabel 2-1), wordt er aangenomen dat de harde kering bezwijkt zodra de afslag van het voorland de dijk bereikt (kans van 1). Afslag is in principe een proces wat in het dwarsprofiel optreedt. Bij schuine golfval is er daarnaast sprake van een langstransport langs de kering. Voor een kustlangs uniforme oever leidt dit niet tot netto zandverliezen. Als sprake is van een gradiënt in langstransport, is dit wel het geval. Enkele mogelijke oorzaken voor een gradiënt zijn een verschil in oeveroriëntatie, in aanwezigheid van vegetatie, in korreldiameter of in aanwezigheid van vooroeverdammen. Als sprake is van een significante gradiënt in langstransport, moet ook de combinatie van dwarstransport en langstransport in beschouwing worden genomen.

### 3.2 Voorland als belastingrem

In deze paragraaf staat het systeem centraal waarbij het voorland fungeert als belastingrem (type c uit Tabel 2-1). De sterkte van de waterkering bevindt zich in de achterliggende dijk. Deze dient het water en de golven te kunnen keren, waarbij de golven die de dijk kunnen bereiken gereduceerd zijn door de aanwezigheid van het voorland. In de praktijk betekent dit dus dat de hydraulische belasting ter plaatse van de teen van de dijk gewoon kan worden gebruikt voor het doorrekenen van de dijk zelf.

Hierbij kan onderscheid worden gemaakt tussen een situatie met:

- Min of meer vormvast voorland zoals de kwelders met stevige bodem en zeer flauwe taludhelling langs de Waddenzeedijken, of verharde voorlanden langs rivierdijken;
- Niet vormvast voorland dat onder invloed van de hydraulische belasting eerst vervormt (hybride kering).

In dit rapport ligt de focus op de tweede situatie.

Er kan onderscheid gemaakt worden tussen falen door golfoverslag over de kering, of falen door het bezwijken van de bekleding van het buitentalud door golfwerking. Het voorland heeft in beide gevallen de functie van belastingrem, doordat de aanwezigheid van het voorland zorgt voor een lagere inkomende golfhoogte bij de dijk. Falen kan optreden als de belastingrem van het oorspronkelijke voorland onvoldoende groot is, of als deze kleiner wordt door afslag van het voorland. Essentie is dat de dijk voldoende hoog en sterk moet zijn om de hydraulische belasting te kunnen keren, na golfreductie door het (eventueel door afslag kleiner geworden) voorland.

Twee limiettoestanden zijn potentieel relevant voor het falen van de kering:

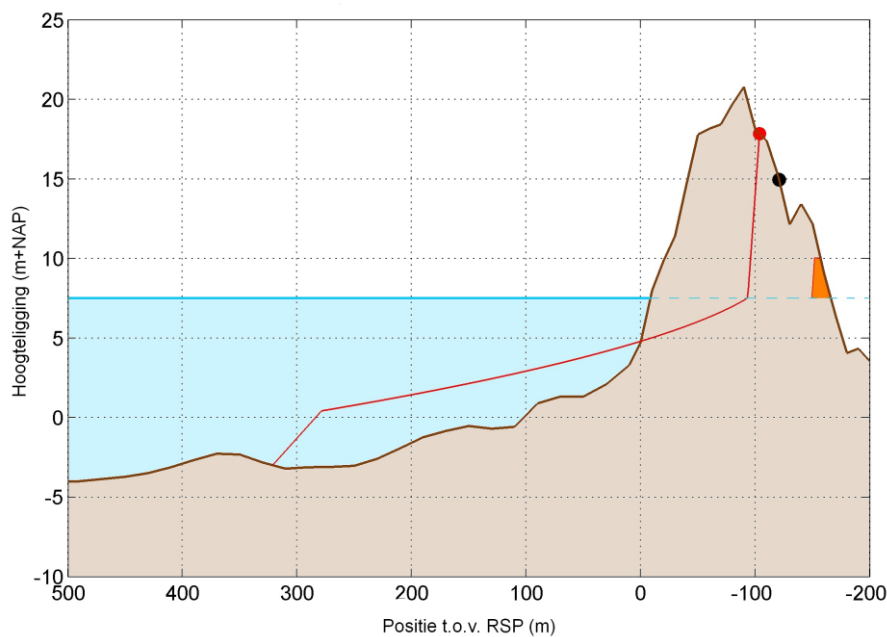
1. Een situatie waarbij het voorland volledig intact blijft, maar een extreme storm leidt tot falen van de dijk, ondanks de belastingrem door het voorland;
2. Een situatie waarbij het voorland volledig verdwijnt en zijn functie verliest, en waarbij een situatie met minder extreme belastingen dan in de eerste situatie leidt tot falen van de dijk.

Tussen deze twee extremen bevindt zich een geleidelijke schaal van een intact voorland naar een volledig geërodeerd voorland. Afhankelijk van de belastingen en het dijk-voorlandstelsel zal de faalkans gedomineerd worden door een bepaald bereik op deze schaal.

### 3.3 Morfologische vervorming

Erosie van het voorland leidt in het uiterste geval tot falen van de zandige kering, of tot volledig verdwijnen van de belastingrem. Erosie kan plaatsvinden door afslag (verplaatsing van zand van hoog in het profiel naar diep water binnen het dwarsprofiel) of door verliezen in langstranding (in het geval van een gradiënt in langstranding).

Bij beoordeling van voorlanden die functioneren als zandige kering kan afslag worden gedefinieerd in termen van afslagvolume of van afslaglengte, analoog aan de beoordeling op duinafslag. Door afslag tijdens een storm zal zand worden getransporteerd vanuit de erosiezone naar de depositiezone (zie Figuur 3-1). Het principe van het beoordelen op duinafslag is dat het afslagprofiel zodanig naar binnen wordt geschoven, dat het volume van de afslagzone gelijk is aan het volume van de depositiezone. Falen treedt op als de afslag verder reikt dan het zogenaamde grensprofiel. Het grensprofiel is het profiel dat nog precies geacht wordt het water te kunnen keren. Aan het afslagvolume kan een afslaglengte worden gekoppeld (de positie van het rode punt in Figuur 3-1, of het zwarte punt, na toevoegen van toeslagen voor onzekerheden). Voor een verdere toelichting verwijzen we naar de Leidraad Zandige Kust (TAW, 2002).



*Figuur 3-1 Afslagprofiel, zoals gedefinieerd voor de duinenkust, met erosiezone (duinvolume boven de rode lijn) en depositiezone (de zone op strand en vooroever, onder de rode lijn). In rood het berekende afslagprofiel, in zwart het maatgevende afslagpunt na toeslagen voor onzekerheid in stormduur en modelonzekerheid.*

Bij beoordeling van een voorland dat functioneert als belastingrem zijn dezelfde processen relevant. Het verschil is dat bij een zelfstandige zandige kering bepalend is of er voldoende volume aanwezig is in het profiel, terwijl bij een voorland als belastingrem de vorm van het voorland bepalend is voor de golfreductie. Voornamelijk het hoogste niveau van het voorland dient behouden te blijven over voldoende afstand vanuit de dijk. Volumeverliezen lager langs het profiel zullen veel minder gevolgen hebben voor de golfhoogte die de dijk kan bereiken.

Bij beoordeling van een bestaande of nog te realiseren zandige kering zijn vier processen potentieel van belang:

1. Volumeverlies door dwarstransport vanuit de erosiezone naar de depositiezone;
2. Volumeverlies door gradiënten in golf-gedreven langstranding tijdens de storm;
3. Volumeverlies door gradiënten in het stromings-gerelateerde transport tijdens storm;
4. Volumeverlies door windtransport tijdens de storm;

Onderdeel 1 betreft de basisberekening, waarbij sprake moet zijn van een balans tussen erosie en depositie, zonder dat de erosie de vastgestelde limiet overschrijdt. De onderdelen 2 en 3 worden veelal als toeslag op het erosievolume meegenomen, soms aangeduid met de wat verwarrende term 'stormtoeslag'. Het verlies van

## Ontwerp en beoordeling van dijk-voorlandssystemen

materiaal door wind wordt normaal gesproken niet in beschouwing genomen, in de veronderstelling dat het hierbij gaat om een beperkte bijdrage ten opzichte van de andere typen verliezen.

Deze verliesposten hebben alleen betrekking op maatgevende stormcondities. Voor het ontwerp van een nieuwe kering dient er aanvullend rekening gehouden te worden met extra verliezen, als gevolg van het cumulatieve transport door een opeenvolging van stormen en milde condities:

1. Volumeverlies door lange-termijn dwarstransport;
2. Volumeverlies door lange-termijn gradiënten in langstransport;
3. Volumeverlies door lange-termijn netto transport van sediment door stroming;
4. Volumeverlies door zettingen;
5. Reductie van het effect van het voorland door zeespiegelstijging / meerpeilstijging. Deze bijdrage wordt in de praktijk vaak vertaald naar een aanpassing van de voor de doorrekening te hanteren hydraulische condities.

De omvang van elk van deze effecten kan worden ingeschat met sedimenttransportformules, morfologische procesmodellen (bijv. Delft3D, XBeach) of kustlijnmodellen (bijv. Unibest). Volumes hangen nauw samen met de aan te houden zichttermijn. De verwachte verliezen kunnen worden opgevangen via ofwel een slijtlaag, ofwel een adequaat plan voor het onderhoud van het zandvolume, vergelijkbaar met de benadering met een basiskustlijn langs de Nederlandse Noordzeekust, en met de definitie van een streefbeeld en een interventiebeeld voor vegetatie in de uiterwaarden van rivieren. Er kan gekozen worden voor worst case scenario's voor klimaatverandering en veranderingen in sterkte, als geen beheer en onderhoud van de kering mogelijk of gewenst is. Als onderhoud niet wordt uitgesloten, of zelfs wordt verwacht, kan uitgegaan worden van minder pessimistische scenario's voor de toekomstige ontwikkelingen.

De combinatie van dwarstransporten en langstransporten tijdens stormen kan op meerdere manieren worden voorspeld. De meest geavanceerde optie is het modelleren met een 3D-model of dieptegemiddeld 2D-model (aangeduid als 2DH-model). Daarbij kunnen dwarstransporten, langstransporten en transporten door stroming gekoppeld worden doorgerekend. XBeach in 2DH-modus zou voor deze toepassing dienst kunnen doen.

Als eenvoudiger en sneller rekenend alternatief kunnen de verschillende verliesposten afzonderlijk worden berekend, en (bij wijze van bovengrensbepaling) worden opgeteld. De afslag in langrichting kan dan worden berekend met een doorsnedemodel, zoals DUROS+ (ENW, 2007; Den Heijer et al. 2012; Vuik et al., 2017), DUROSTA, XBeach in 1D-modus (Den Bieman et al., 2014), of quasi-2D XBeach, waarbij een 2D rooster van maximaal 10 roostercellen breed wordt gebruikt, met een kustlangs uniform profiel (Kolokythas et al., 2016). Voor langstransporten kan een transportformule, zoals Van Rijn (2002) worden toegepast.

Vervolgens dient bepaald te worden hoe groot de gradiënten in het langstransport zullen zijn, ofwel, hoe groot de verschillen in langstransport zijn, en over welke afstand. Golfcondities voor de beoordeling op golfoverslag zijn bekend voor zogenaamde randvoorwaardenlocaties langs de dijk. Voor opeenvolgende randvoorwaardenlocaties kan het langstransport worden bepaald, op basis van de dijkoriëntatie, waterstand en golfcondities, en de sedimentsamenstelling. Verschillen in transport worden vervolgens gedeeld door de afstand tussen de randvoorwaardenlocaties om tot een transportgradiënt te komen (volume sediment per strekkende meter dijk per tijdseenheid). Vermenigvuldiging met de stormduur levert een totaal volumeverlies.

Moeilijker te bepalen gradiënten zijn het gevolg van verschillen in de aanwezige vegetatie langs de dijk of van de aanwezigheid van vooroeverdammen of strekdammen. De best beschikbare kennis moet worden ingezet om de grootte van deze invloeden te bepalen, en de onzekerheid hierin kan worden meegenomen in de faalkansberekening.

## 3.4 Berekening van belastingrem

### 3.4.1 Inleiding

De basis voor een faalkansberekening van een dijk met belastingreducerend voorland is de berekening van golfoverslag of het bezwijken van de dijkbekleding voor een conventionele dijk. Er wordt een reductie toegepast op de golfhoogte, op basis van waterstand, inkomende golfhoogte, en de profielvorm van het voorland. Er zijn zogenaamde voorlandmodules geïmplementeerd in bestaande softwarepakketten zoals PC-Ring, Hydra-NL en Ringtoets/Hydra-Ring. Deze modules bepalen op eenvoudige wijze de golfhoogtereductie over het voorland. Bij een zandig voorland, dat onderhevig kan zijn aan vervorming tijdens dezelfde storm, zijn er echter variaties mogelijk in de manier waarop het voorland wordt meegenomen in deze berekening. De volgende methoden worden hier besproken:

1. Methode op basis van standzekerheid;
2. Afslagberekening in het ontwerp punt;
3. Integrale probabilistische benadering.

### 3.4.2 Methode op basis van standzekerheid

Standzekerheid is het uitgangspunt wat gehanteerd wordt in het Beslisschema Voorlanden, RPS (2015). Na een relevantietoets (voldoet een afgekeurde waterkering wel als een voorland wordt meegenomen) wordt een minimaal gewenste toestand van het voorland per faalmechanisme gedefinieerd. Vervolgens wordt beoordeeld of onder maatgevende omstandigheden deze minimale toestand kan worden gegarandeerd. Als dat het geval is, wordt het effect van het voorland meegenomen in de beoordeling.

Bij een zandig voorland wordt in deze methode eerst berekend welke zone potentieel kan eroderen tijdens een maatgevende storm. Vaak worden toeslagen op de afslag toegepast om rekening te houden met onzekere factoren, zoals de stormduur, korrelgrootte en eventuele langstransportgradiënten. Het resterende profiel wordt als standzeker beschouwd, en meegenomen als voorland in de faalkansberekening van de dijk.

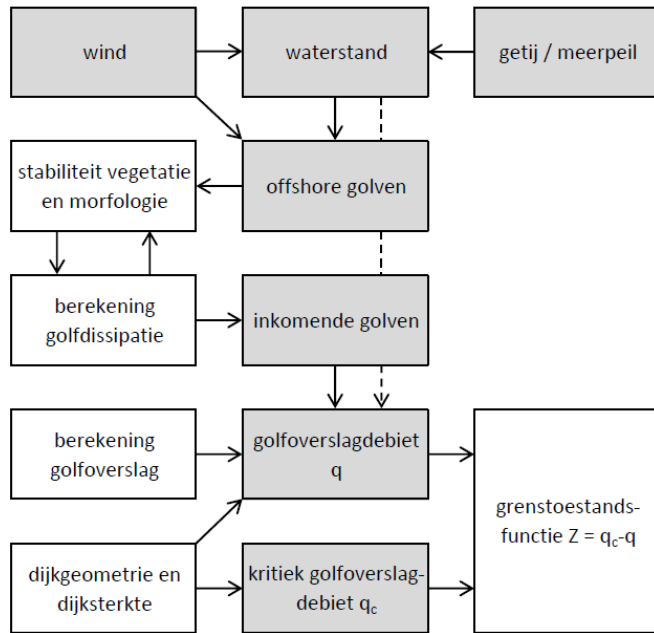
Deze methode kan volstaan als de morfologische vervormingen beperkt zijn. In dat geval is de eenvoud van het scheiden van de berekeningen van afslag en golfoverslag een duidelijk voordeel van deze methode. Bij substantiële morfologische vervorming is er het gevaar dat er conservatieve uitgangspunten worden gehanteerd en gestapeld, terwijl de kleine kans van optreden van deze uitgangspunten niet tot uitdrukking wordt gebracht in de faalkans.

### 3.4.3 Afslagberekening in het ontwerp punt

Bij deze methode wordt het voorland eerst onvervormd in de berekeningen opgenomen. De faalkansberekening (zie hoofdstuk 4) levert een ontwerp punt: de combinatie van windsnelheid, waterstand en golfcondities met de grootste bijdrage aan de faalkans van de kering. Hierbij is een controle nodig of het ontwerp punt duidelijk gedefinieerd is, of dat meerdere belastingcombinaties significant bijdragen aan falen. Eventueel kunnen meerdere combinaties worden beschouwd. Bij die combinatie(s) wordt vervolgens in afzonderlijke berekening(en) de afslag bepaald, gebruik makend van een afslagmodel als DUROS+ of XBeach. Het afgeslagen voorland wordt daarna opnieuw ingevoerd in de faalkansberekening voor de dijk, inclusief een voorlandmodule. Eventueel zou deze procedure iteratief meerdere keren kunnen worden herhaald. Bij beperkte morfologische vervormingen is deze methode goed toepasbaar, omdat het ontwerp punt dan niet noemenswaardig verschuift als gevolg van de afslag. De eenvoudige methode blijft dan bruikbaar, waarbij golfoverslag en afslagberekening gescheiden worden berekend. Deze methode is bijvoorbeeld toegepast voor een zandig, golfoverslagreducerend voorland bij Westkapelle in HKV (2016). Overigens moet bij deze methode ook nog rekening worden gehouden met vervorming ten gevolge van toeslag en verliezen.

### 3.4.4 Integrale probabilistische benadering

Bij een integrale probabilistische benadering worden de golfoverslagberekening, de berekening van golfdemping over het voorland, en de afslagberekening integraal aan elkaar gekoppeld, inclusief de relevante onzekerheden in deze componenten. Figuur 3-2 laat zien hoe een voorlandmodel integraal onderdeel kan worden gemaakt van de faalkansberekening, in dit geval voor het faalmechanisme golfoverslag.



*Figuur 3-2 Schematische weergave van de inzet van een voorlandmodel voor het berekenen van de transformatie van golfcondities en daaraan gerelateerd, de faalkans door golfoverslag.*

Waar in een berekening zonder voorland wind-waterstandstatistiek en een database met golfparameters rechtstreeks op de dijk worden geprojecteerd, wordt nu een voorlandmodel ingevoegd. Het voorlandmodel bevat formules en modellen die de relevante processen beschrijven, zoals shoaling, refractie, golfbreking, golfdemping door vegetatie en bodemwrijving, eventueel aangevuld met het breken van vegetatie door golfwerking en erosie van het voorland. Door de berekening integraal uit te voeren, wordt het ontwerp geoptimaliseerd, en wordt duidelijk hoe alle onzekerheden doorwerken in de uiteindelijke faalkans van de kering. Een standaard instrument om deze integrale probabilistische benadering mee uit te voeren, is nog niet beschikbaar, maar technisch is dit zeker mogelijk, zoals bijvoorbeeld blijkt uit een recent afstudeeronderzoek (Oosterlo, 2015). In het volgende hoofdstuk wordt dit bij wijze van voorbeeld uitgewerkt voor de Houtribdijk, ter plaatse van de pilot.

### 3.5 Onzekerheden

In de faalkansberekening kunnen, behalve de statistiek van de wind en de waterstand, ook onzekerheden in andere variabelen worden meegenomen. Onzekerheden kunnen bijvoorbeeld betrekking hebben op:

1. de karakteristieken van het zandige profiel,
2. de modellen die golfoverslag, golfhoogtereductie of afslag berekenen, of
3. de gebruikte kansverdelingen voor bijvoorbeeld windsnelheid en waterstand.

Ad 1. Verschillende parameters beschrijven de karakteristieken van het zandige profiel, zoals de hoogteligging, taludhelling, karakteristieke korreldiameters als  $D_{50}$  en  $D_{90}$ , en de aanwezigheid van vegetatie. Onzekerheden in deze parameters kunnen als kansverdelingen worden meegenomen in de faalkansberekening. Als de onzekerheid niet sterk doorweegt in de uiteindelijke faalkans, zal een waarde dichtbij het gemiddelde worden gekozen in het ontwerp punt van de kansberekening.

Ad 2. Ook modelonzekerheden kunnen worden gekwantificeerd, en in rekening worden gebracht bij het bepalen van de faalkans. Te denken valt aan onzekerheden in de berekende golfhoogte en hoek van golfinval bij de dijk, maar ook onzekerheden in parameters in de modellen die golfoverslag, of volumeverliezen door dwarstransport en langstransport berekenen. Modelonzekerheden kunnen zowel worden meegenomen door een kansverdeling van modelparameters op te geven, als door een kansverdeling rond de uitkomsten van het model op te geven. Op beide manieren kan een gebrek aan kennis en tekortkomingen in de modellen tot uitdrukking worden gebracht in de faalkans van de waterkering.

Ad 3. Tenslotte dienen in de vernieuwde WBI systematiek ook statistische onzekerheden te worden meegenomen: de onzekerheid in het gekozen type kansverdeling voor de windsnelheid en de waterstand, en de parameters van die kansverdelingen.



## 4 Toepassing voor het Markermeer

In dit hoofdstuk wordt een voorbeeld gepresenteerd van het berekenen van een faalkans van een dijk met zandig voorland langs het Markermeer (type c uit Tabel 2-1), voor de faalmechanismen golfoverslag en golfaanval op de bekleding van het buitentalud.

### 4.1 Methode

Faalkansen zijn berekend door modellen voor afslag van het voorland, golftransformatie over het voorland en golfoverslag over de dijk aan elkaar te koppelen, en probabilistisch aan te sturen met behulp van FORM (First Order Reliability Method). FORM levert het volgende op: een faalkans, een ontwerp punt (design point), en invloedsfactoren per stochastische variabele.

Afslag van het voorland en golftransformatie over het voorland worden berekend met 1D XBeach, in stationaire modus. Voor afslag van het voorland wordt gebruik gemaakt van een standaard storm met een trapeziumvorm in de tijd, waarbij de windsnelheid op de piek 2 uur aanhoudt, met een totale stormduur van 35 uur, conform het voorschrift voor IJsselmeer en Markermeer in de WBI-2017 schematiseringshandleiding voor grasbekledingen. De waterstand en golfbrandvoorwaarden voor het model worden in de faalkansberekeningen getrokken uit de statistiek voor het Markermeer (paragraaf 4.3).

Inkomende golfcondities bij de dijk worden in alle berekeningen bepaald ter plaatse van de oorspronkelijke dijkteen ( $x = 0$  m), en ook golfoverslag wordt berekend op basis van de golfcondities bij dit punt. Voor golfoverslag is gebruik gemaakt van de EurOtop (2016) formules, waarbij de alle parameters in deze formules zijn meegenomen als stochastische parameters in de faalkansberekeningen (aangeduid als C1a, C1b, C2a, C2b, C3a). De golfoverslag die volgt uit EurOtop wordt vergeleken met een kritiek overslagdebiet, waarvoor verondersteld wordt dat de dijk bezwijkt door erosie. Dit kritiek overslagdebiet is vastgesteld op 1 l/s/m.

### 4.2 Hydraulische belastingen

De berekeningen in dit hoofdstuk zijn niet bedoeld voor een officiële veiligheidsbeoordeling. Er is daarom gebruik gemaakt van kansverdelingen, gebaseerd op de tijdreeks van 4 jaar met lokale metingen van waterstanden, wind en golven bij de pilot. De manier waarop deze kansverdelingen en de correlaties tussen de grootheden zijn bepaald, valt buiten de scope van dit rapport, en is daarom opgenomen in Bijlage A.

Parameter	Symbool	Eenheid	Kansverdeling	Parameters	1/1000 jaar
Windsnelheid	U	m/s	GEV	-0,08; 1,71; 20,3	29,4
Meerpeil	m	m+NAP	GEV	-0,15; 0,04; 0,05	0,12
Opwaaing	w	m	GEV	-0,11; 0,08; 0,51	0,91
Sign. golfhoogte	$H_{m0}$	m	GEV	-0,12; 0,10; 1,10	1,58
Piekperiode	$T_p$	s	GEV	-0,11; 0,24; 4,29	5,44
Golfrichting	$\theta$	graden	Normaal	221,5; 24,4	x

Tabel 4-1 Kansverdelingen voor diverse parameters, volgend uit extreme-waarden analyse op meetreeksen van de pilot Houtribdijk. GEV = Generalized Extreme Value distribution.

Symbol	U	m	w	H <sub>m0</sub>	T <sub>p</sub>	θ
U	1	0	0,78	0,82	0,83	0
m	0	1	0	0	0	0
w	0,78	0	1	0,91	0,91	0
H <sub>m0</sub>	0,82	0	0,91	1	0,96	0
T <sub>p</sub>	0,83	0	0,91	0,96	1	0
θ	0	0	0	0	0	1

Tabel 4-2 Correlatiecoëfficiënten voor correlaties tussen de parameters uit Tabel 4-1.

Op basis van slechts 4 jaar data is de onzekerheid over de extreme waarden zeer groot. De zogenaamde staart van de verdeling kan op veel manieren door de data gefit worden. Dit is inherent aan het afleiden van extreme waarde-verdelingen, maar zeker bij deze relatief korte tijdreeks zijn statistische onzekerheden groot. Deze zijn echter niet meegenomen in de verdere analyses. Dit houdt in dat is aangenomen dat bovenstaande kansverdelingen en correlaties de natuurlijke variatie in de betreffende parameters volledig correct beschrijven.

### 4.3 Overige parameters

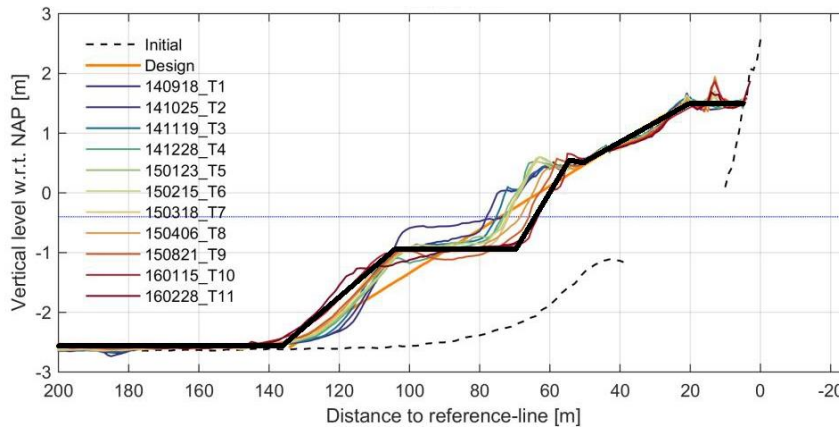
De overige parameters zijn in de berekeningen meegenomen volgens de kansverdelingen in Tabel 4-3. Parameters voor golfoverslag zijn conform EurOtop (2016). De brekerparameter is gebaseerd op berekeningen met 1D SWAN, waarbij de brekerparameter was gekalibreerd op detailmetingen van golfbreking over het plateau van de pilot in 2017. Uit deze berekeningen volgden zeer hoge brekerparameters, in de orde van 0,80. De kansverdelingen voor facAs en facSk zijn gebaseerd op Oosterlo (2015).

Parameter	Symbol	Eenheid	Kansverdeling	Parameters
Parameters golfoverslag	C1a	-	Normaal	0,023; 0,003
	C1b	-	Normaal	2,70; 0,20
	C2a	-	Normaal	0,09; 0,0135
	C2b	-	Normaal	1,50; 0,15
	C3a	-	Normaal	-0,79; 0,29
Brekerparameter	γ	-	Normaal	0,80; 0,20
XBeach asymmetrie parameter	facAs	-	Normaal	0,123; 0,041
XBeach skewness parameter	facSk	-	Normaal	0,375; 0,126
Mediane korreldiameter	D <sub>50</sub>	µm	Normaal	200; 20

Tabel 4-3 Kansverdelingen van parameters in de faalkansberekeningen.

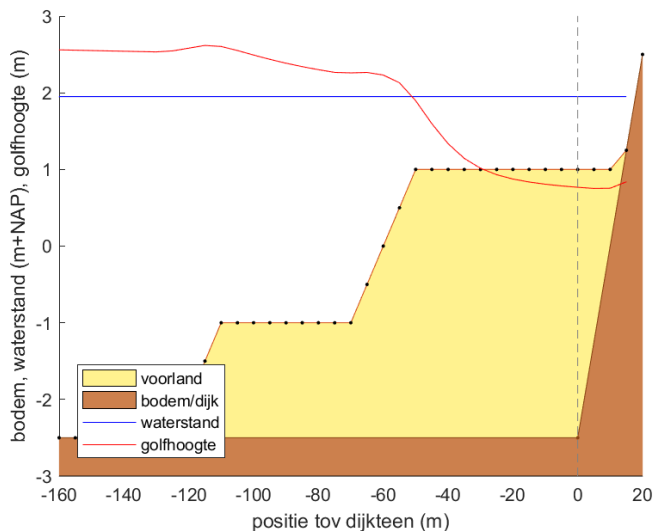
### 4.4 Profielvorm

Het profiel bij de pilot Houtribdijk nam al snel na aanleg een karakteristieke vorm aan, die gedurende de gehele levensduur van de pilot aanwezig is gebleven. Figuur 4-1 toont de profielen voor een dwarsraai in het centrale deel van de pilot, voor de eerste 11 morfologische inmetingen. In oranje is het ontwerpprofiel te zien. Dit ontwerpprofiel kon niet volledig worden gerealiseerd tijdens de aanleg, zoals te zien is bij T1: het zand was aangebracht op een niveau van ongeveer -0,5 m NAP, met vervolgens een steil natuurlijk talud naar de oorspronkelijke bodem op -2,5 m NAP. Binnen korte tijd hebben golven, stroming en de daarop volgende sedimenttransporten het profiel vervormd, met een steil profiel rond de waterlijn, gevolgd door een vlak plateau op -1,0 m NAP van ongeveer 50 m breed, en vervolgens een talud naar de meerbodem. De contour van dit karakteristieke profiel is in zwart ingetekend in Figuur 4-1.



Figuur 4-1 Dwarsprofiel in het centrale deel van de pilot Houtribdijk volgens de eerste 11 morfologische inmetingen, met in oranje het ontwerpprofiel en in zwart de contouren van het karakteristieke profiel zoals dat zich vormde binnen korte tijd.

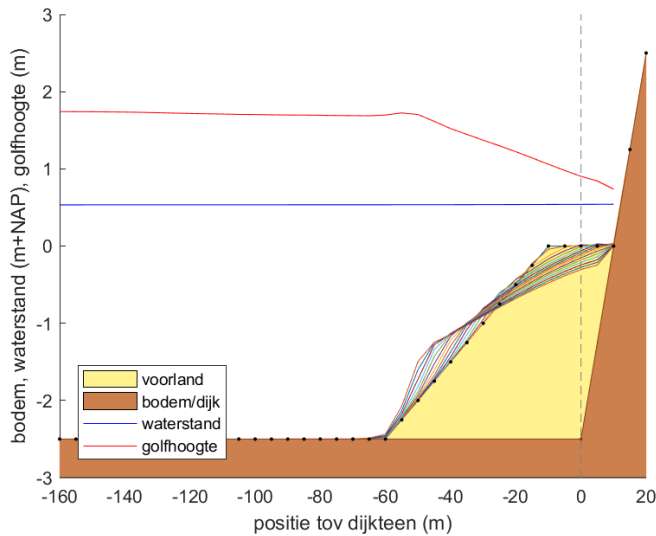
Er zijn faalkansen berekend voor dit karakteristieke profiel, en voor een meer schematisch profiel met een constant niveau over een breedte van 50 m, gevolgd door een recht 1:20 talud.



Figuur 4-2 Vereenvoudigd karakteristiek profiel, zoals gebruikt in de berekeningen. De rode lijn geeft een voorbeeld van de reductie van de golfhoogte bij een waterstand van 2 m NAP.

## 4.5 Relevantie van afslag voorland

De golven op het Markermeer zijn niet zodanig groot, dat tijdens één storm grote delen van het voorland worden afgeslagen. Bij het voorland van 50 m breed en een 1:20 talud bereikte de afslag in geen van de berekeningen de dijk. Ook niet bij meenemen van onzekerheden in parameters voor de morfologie, zoals de korreldiameter  $D_{50}$ , en XBeach modelparameters  $facAs$ ,  $facSk$  en de brekerparameter  $\gamma$ . Het laatste deel van het profiel (tegen de dijk aan) blijft op dezelfde hoogte, waardoor de afslag nauwelijks invloed heeft op de inkomende golven. Alleen bij een zeer smal voorland (10 meter breed, zie Figuur 4-3) lukt het om de dijk te bereiken, en enige invloed op de faalkans te hebben. Een zandig voorland van 10 meter breed zal normaliter niet worden aangelegd voor veiligheid, omdat transporten tijdens dagelijkse omstandigheden dan al snel tot een veiligheidsprobleem zouden leiden.

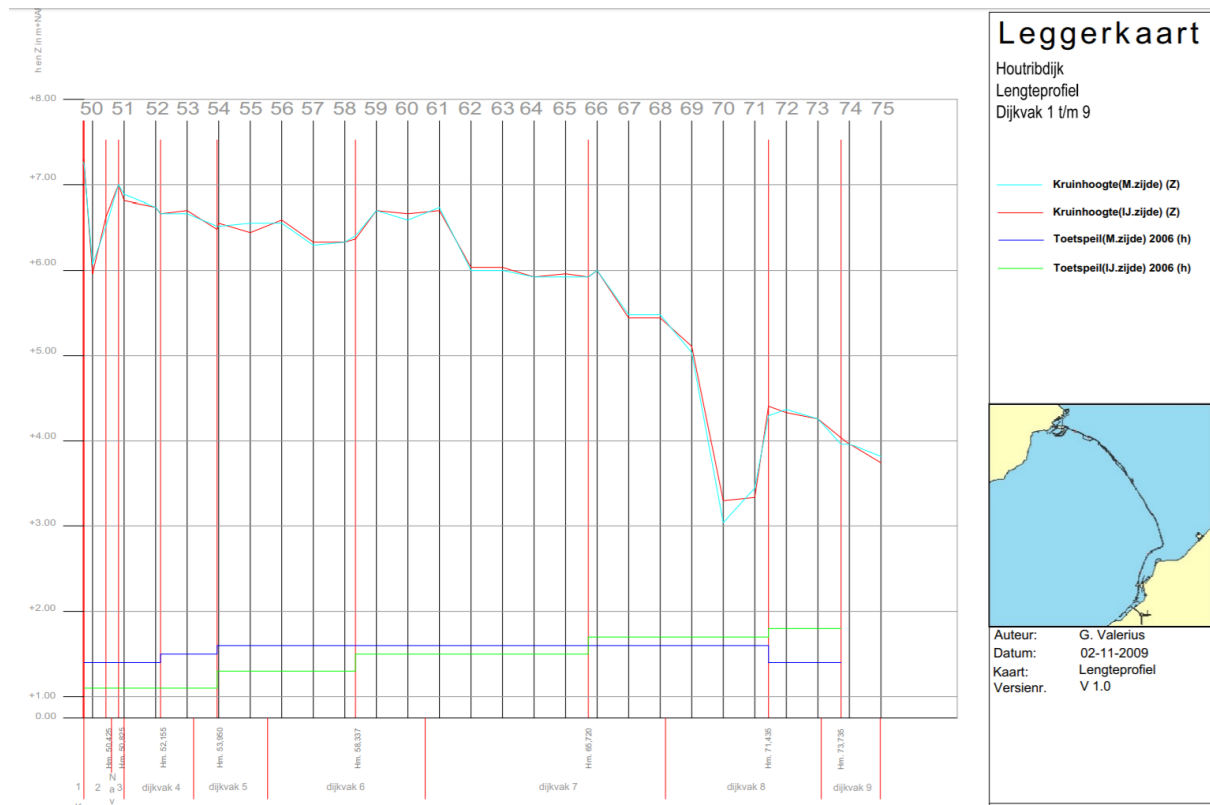


Figuur 4-3 Voorbeeld van afslag van een klein voorland (10 m breed), met de bijbehorende waterstand en verloop van de golfhoogte tijdens de piek van de storm (blauwe en rode lijn).

De conclusie is dat voor het Markermeer afslag van het voorland tijdens ontwerpcondities niet van belang is, zolang een stabiel begintalud aanwezig is (bijvoorbeeld 1:20). Deze conclusie was ook van toepassing op het zandige voorland bij de zeedijk van Westkapelle, waar verschillen in faalkans voor Jarkus-profielen van opeenvolgende jaren veel groter waren dan het verschil in faalkans als gevolg van afslag tijdens één ontwerpstorm (HKV, 2016). Transporten tijdens dagelijkse omstandigheden hebben dus meer invloed op de morfologie en de veiligheid dan de afslag tijdens één extreme storm. In de berekeningen in volgende paragrafen is daarom niet meer met afslag gewerkt, en is alleen de golftransformatie tijdens de piek van de storm berekend.

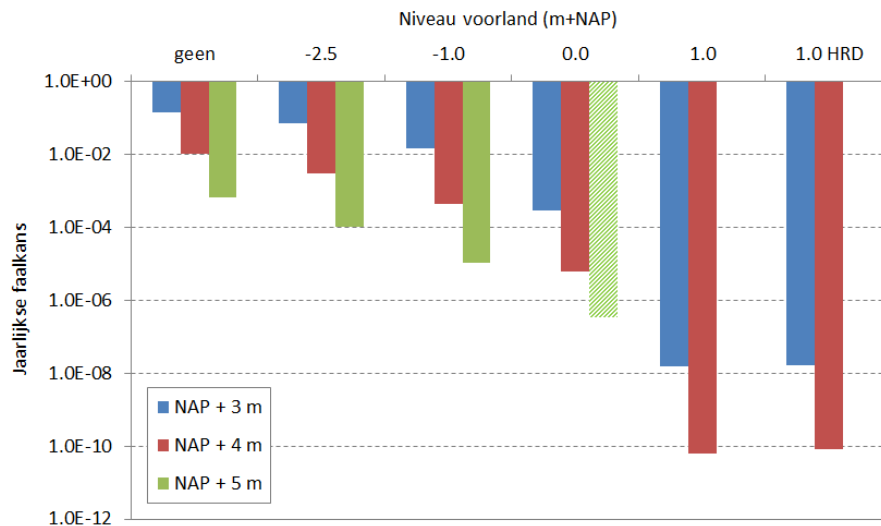
## 4.6 Overschrijdingskans overslagdebiet

De kruinhoogte van de huidige Houtribdijk varieert van ongeveer 6,5 m NAP bij Enkhuizen tot ongeveer 4,0 m NAP bij Lelystad (Figuur 4-4). Bij aanwezigheid van een hoog voorland resulteerden grote kruinhoogtes in een situatie waarbij de overslag niet groot genoeg kon worden. Dit zorgde voor faalkansberekeningen zonder geldig resultaat (geen convergentie). Alleen bij een verlaagde dijk kon met de statistiek van het Markermeer voldoende golfoverslag worden bereikt om tot een faalkans groter dan nul te komen. Er is daarom gerekend met fictieve dijkhoogtes van 3, 4 en 5 m NAP, bij een taludhelling van 1:4 en een kritieke waarde van het golfoverslagdebiet van 1 l/s/m.



Figuur 4-4 Kruinhoogte Houtribdijk volgens de legger in 2009.

Figuur 4-5 toont de berekende faalkansen voor diverse kruinhoogtes (de verschillende kleuren balken) en verschillende configuraties van het voorland (de labels langs de horizontale as). De gestreepte balk geeft aan dat er geen convergentie was in de berekening met voorland op 0,0 m NAP en dijk op 5 m NAP: het overslagdebiet was nog steeds kleiner dan het kritieke overslagdebiet in het design point. Bij een voorland op 1,0 m NAP kon geen faalkans meer worden berekend, het bereiken van overslagdebieten nabij 1 l/s/m was in combinatie met een dijkhoogte op 5 m NAP niet mogelijk.



Figuur 4-5 Faalkansen bij verschillende kruinhoogtes (zie legenda) en niveaus van het voorland (zie horizontale as).

'Geen voorland' houdt in dat de faalkans rechtstreeks is berekend op basis van de statistiek, zonder toepassing van XBeach. Bij een niveau van -2,5 m NAP is gerekend met een vlakke bodem in XBeach. Te zien is dat toepassing

## Ontwerp en beoordeling van dijk-voorlandsystemen

van XBeach ook bij een vlakke bodem leidt tot lagere faalkansen door golfhoogtereductie. Dit is een indicatie dat de statistiek relatief hoge golven bevat ten opzichte van de waterdiepte. Toepassing van XBeach bij een vlakke bodem kan dus worden gezien als een fysische nabewerking op de golvenstatistiek. Bij de andere niveaus is sprake van een verhoogd voorland met een breedte (dwars op de dijk) van het vlakke deel van 50 m, en vervolgens een 1:20 talud naar het niveau van -2,5 m NAP. Bij '1,0 HRD' is de karakteristieke profielvorm van de pilot Houtribdijk (zie Figuur 4-2) aangehouden, en in alle andere berekeningen het vereenvoudigde profiel (zoals in Figuur 4-3, maar dan zonder afslag, en 50 m breed).

Zonder voorland is de jaarlijkse faalkans 14% per jaar bij een dijk van 3 m NAP, wat neerkomt op een terugkeertijd van 7 jaar (Tabel 4-4). Toepassing van XBeach op vlakke bodem laat de terugkeertijd toenemen tot 14 jaar. Een voorland heeft grote invloed op de faalkans, met een terugkeertijd oplopend tot 66 miljoen jaar bij een voorland op 1,0 m NAP. De oorzaak hiervoor is dat de waterstand in zeer extreme situaties nog steeds niet ver boven het voorland uitkomt, waardoor hoge golven niet in staat zijn om de dijk te bereiken en noemenswaardige golfoverslag te veroorzaken. Anders geredeneerd: bij een waterstandstatistiek met een bovengrens, zoals op de meren, zijn voorlanden zeer effectief in het reduceren van de kans op golfoverslag. De profielvorm (met plateau of met constante taludhelling) leidt niet tot een wezenlijk verschil in faalkans.

De invloedsfactoren laten zien welke onzekerheden dominant zijn voor het falen van de kering, namelijk de onzekerheid in:

1. Windsnelheid
2. Significante golfhoogte
3. Meerpeil
4. Opwaaiing
5. Brekerparameter  $\gamma$

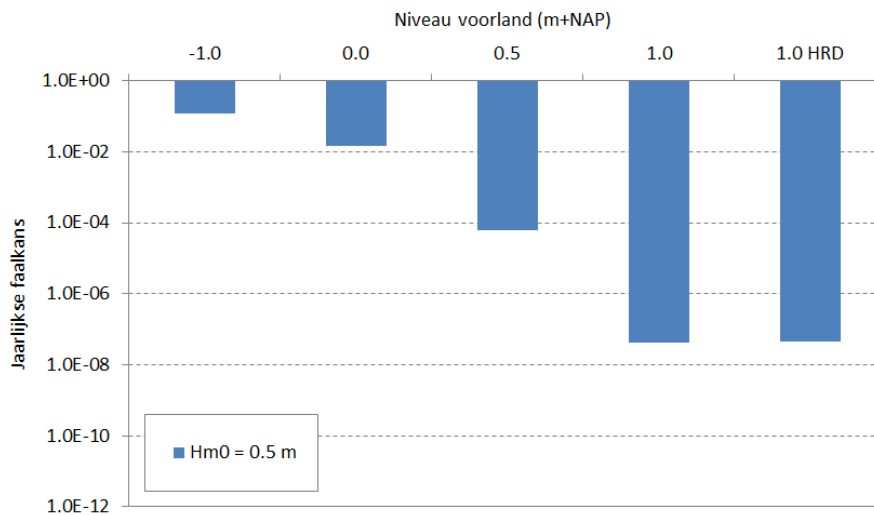
In Tabel 4-4 is verder te zien dat de brekerparameter  $\gamma$  zeer grote waarden aanneemt in het design point, tot wel 1,09 bij een voorland van 1,0 m NAP en een dijkhoogte van 3,0 m NAP. Bij een dijkhoogte van 4,0 m NAP wordt zelfs  $\gamma = 1,20$  gevonden. Dit houdt in dat (individuele) golven tot 1,2 maal de waterdiepte kunnen bestaan. Normaliter is  $\gamma$  in de orde van 0,7 (default waarde in SWAN is 0,73). Tijdens stormen worden op het Markermeer opmerkelijk hoge golven gevonden ten opzichte van de waterdiepte, waarom gekozen is voor een kansverdeling met een gemiddelde van 0,8 en een standaardafwijking van 0,2. Of waarden boven 1,0 daadwerkelijk realistisch zijn (zij het met een kleine kans van optreden) verdient nader onderzoek, omdat dit van significante invloed is op de golven die in het XBeach model de dijk kunnen bereiken. Een nadere detailanalyse is hier op zijn plaats, evenals een reflectie op eerder werk in de context van SBW (Sterkte en Belasting Waterkeringen) voor het Merengebied.

		qc = 1 l/s/m					
kansen	NAP + 3 m, 1/4 talud						
	Voorland	-2.5	-2.5	-1.0	0.0	1.0	1.0 HRD
	Xbeach	Nee	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
	Pf	1.4E-01	7.1E-02	1.4E-02	2.8E-04	1.5E-08	1.7E-08
	T	7	14	70	3,568	6.6E+07	5.9E+07
	beta	1.08	1.47	2.19	3.45	5.54	5.52
Design point	C1a	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023
	C1b	2.64	2.62	2.60	2.69	2.69	2.69
	C2a	0.089	0.089	0.089	0.091	0.091	0.091
	C2b	1.49	1.49	1.49	1.40	1.40	1.40
	C3a	-0.79	-0.79	-0.79	-0.79	-0.79	-0.79
	windsnelheid	23.4	24.3	26.2	29.0	34.1	34.1
	Hm0	1.40	1.46	1.62	1.89	2.55	2.55
	Tp	4.83	4.98	5.33	5.91	7.32	7.33
	meerpeil	-0.04	-0.03	-0.02	0.01	0.09	0.09
	opwaaïing	0.71	0.76	0.88	1.13	1.66	1.66
	gamma	0.80	0.89	0.94	1.06	1.09	1.09
Invloedsfactor <sup>2</sup>	C1a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	C1b	0.07	0.07	0.05	0.00	0.00	0.00
	C2a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	C2b	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	0.01
	C3a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	windsn	0.65	0.58	0.58	0.50	0.52	0.53
	Hm0	0.24	0.19	0.19	0.17	0.18	0.18
	Tp	0.02	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01
	meerpeil	0.01	0.02	0.02	0.05	0.10	0.10
	opwaaïing	0.01	0.02	0.03	0.09	0.10	0.10
	gamma	0.00	0.09	0.10	0.15	0.07	0.07

Tabel 4-4 Details van de faalkansberekeningen voor golfoverslag bij een dijkhoogte van 3 m NAP: kansen (bovenste blok), design point (middelste blok) en gekwadrateerde invloedsfactoren (onderste blok). De rode balken dienen ter visualisatie.

## 4.7 Overschrijdingskans golfhoogte

Uit het voorgaande blijkt dat de kans op falen door golfoverslag bij de daadwerkelijke kruinhoogte (Figuur 4-4) al snel verwaarloosbaar klein zijn bij toepassing van een klein voorland. Daarom hebben we als toevoeging nog een berekening uitgevoerd van de overschrijdingskans van een significante golfhoogte van 0,5 m bij het buitentalud van de dijk. Deze golfhoogte wordt vaak gezien als een waarde waarbij gras nog kan worden toegepast als dijkbekleding. Te zien is dat de kans op falen nog meer dan 1% per jaar is bij een voorlandniveau van 0,0 m NAP, maar dat deze kans snel afneemt tot orde  $10^{-7}$  bij een voorland op 1,0 m NAP. Dat houdt in dat een dijk met grasbekleding in combinatie met een zandig voorland op minimaal 1,0 m NAP een kansrijke combinatie lijkt te zijn. Hoewel op het Markermeer golven van aanzienlijk groter dan 0,5 m voor kunnen komen (zie Tabel 4-1),



Figuur 4-6 Jaarlijkse overschrijdingskans van een significante golfhoogte van 0,5 m bij het dijktalud, voor diverse voorlandniveaus (horizontale as).

		Overschrijdingskans Hm0 = 0.5 m				
kansen	Voorland	-1.0	0.0	0.5	1.0	1.0 HRD
	Xbeach	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
	Pf	1.2E-01	1.4E-02	6.2E-05	4.2E-08	4.4E-08
	T	8	70	16,256	2.4E+07	2.3E+07
	beta	1.16	2.19	3.84	5.36	5.35
	design point	windsnelheid	20.0	25.5	30.2	33.7
Hm0	1.17	1.56	2.02	2.49	2.50	
Tp	4.33	5.18	6.18	7.20	7.23	
meerpeil	-0.05	-0.01	0.02	0.07	0.08	
opwaaiing	0.54	0.85	1.23	1.62	1.62	
gamma	0.58	1.02	1.10	1.15	1.12	
invloedsfactor^2	windsn	0.05	0.45	0.51	0.52	0.53
	Hm0	0.02	0.15	0.17	0.18	0.18
	Tp	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
	meerpeil	0.01	0.07	0.06	0.08	0.09
	opwaaiing	0.01	0.08	0.09	0.10	0.10
	gamma	0.91	0.25	0.15	0.11	0.09

Tabel 4-5 Details van de berekening van een overschrijdingskans van een golfhoogte van 0.5 m: kansen (bovenste blok), design point (middelste blok) en gekwadrateerde invloedsfactoren (onderste blok). De rode balken dienen ter visualisatie.

## 4.8 Conclusies

Op basis van de in dit hoofdstuk gepresenteerde voorbeeldberekening voor het Markermeer trekken we de volgende conclusies:

1. Bij een stabiele taludhelling (1:20) en enige breedte van het voorland (50 m) heeft afslag van het voorland geen significante invloed op de faalkans van de achterliggende dijk.
2. Relatief kleine voorlanden leiden al tot een zeer sterke reductie van golfhoogte en golfoverslag op het Markermeer, vanwege het beperkte bereik van de waterstand tijdens extreme stormen.
3. De golfhoogte die de dijk bereikt wordt gedomineerd door de aandrijvende windsnelheid, de onzekerheid in de opwaaiing en offshore golfhoogte gegeven die windsnelheid, het meerpeil, en de brekerparameter (die de verhouding van golfhoogte tot waterdiepte bepaalt in het model).



## 5 Aanbevelingen voor ontwerp

Voor het ontwerpen en beoordelen van dijk met zandig voorland is het nodig om een faalkans te kunnen berekenen van het gecombineerde systeem. In dit hoofdstuk worden praktische aanbevelingen gedaan voor het meenemen van voorlanden in deze berekeningen.

### 5.1 Golfoverslag en golfcondities bekleding

Gezien het beperkte belang van afslag, is volledig gekoppeld doorrekenen van afslag en golfreductie naar verwachting zelden of nooit nodig. We bevelen daarom een praktische werkwijze aan voor de faalmechanismen golfoverslag en erosie van het buitentalud na falen van de bekleding van het buitentalud door golfklappen:

- Stap 1: een faalkansberekening met onvervormd voorland, bijvoorbeeld met Hydra-NL of Riskeer, inclusief voorlandmodule;
- Stap 2: uitvoeren van een afzonderlijke afslagberekening met de waterstand en golfcondities uit het illustratiepunt (design point), bijvoorbeeld met XBeach;
- Stap 3: uitvoeren van een tweede faalkansberekening met (eventueel geschematiseerd) vervormd voorland.

De verwachting is dat deze faalkans vrijwel gelijk is aan die met het onvervormde voorland. Indien niet, kan afslag ook integraal worden opgenomen in de faalkansberekening (mogelijkheid 1). Dit rapport laat zien dat dit kan, evenals eerder werk op de TU Delft (Oosterlo, 2015), maar het is (gelet op de meerwaarde) zeer rekenintensief, en zal niet snel de gestandaardiseerde werkwijze worden.

### 5.2 Geotechnische faalmechanismen

Voorlanden kunnen de kans van optreden van geotechnische faalmechanismen als volgt reduceren:

- De kans op piping kan worden verkleind als een voorland met afdekkende kleilaag of kern van klei wordt aangebracht, en de kwelweglengte vergroot;
- De kans op macro-instabiliteit buitenwaarts wordt gereduceerd door de massa van het voorland die rust op het dijklichaam;
- Een voorland reduceert de kans van optreden van macro-instabiliteit binnenwaarts niet, maar voorkomt doorbraak bij waterstanden onder het niveau van het voorland. Aan waterstanden onder het niveau van het voorland (na eventuele morfologische vervorming) kan een faalkansbijdrage van nul worden toegekend.

### 5.3 Onderhoud zandig voorland

Bij ontwerp van een zandig voorland moet rekening gehouden worden met vervorming tijdens dagelijkse condities. Het verdient daarom aanbeveling om een profielvorm te kiezen, die passend is bij het golfklimaat ter plaatse. Bij een flauw talud (minder dan 1:20) zullen geen grote verliezen in dwarsrichting optreden. Schuine golfval en stroming kunnen leiden tot zandverlies in langsrichting van de dijk. Mitigerende maatregelen daarvoor zijn strekdammen, langsdammen, een zandmotor, een slijtlaag, en/of regelmatig onderhoud via zandsuppleties. De Guideline Beheer en Onderhoud (EcoShape, 2018b) gaat hier in meer detail op in.

### 5.4 Overige aanbevelingen

Overige aanbevelingen voor toepassing van zandige voorlanden langs de oevers van meren:

1. Zoek voor beheer en onderhoud van zandige oplossingen de analogie met het beheer van uiterwaarden (streefbeeld en interventiebeeld voor de begroeiing), het reguliere beheer van dijken (maaien, sproeien, scheurreparatie, ongediertebestrijding), en het beheer van de zandige Noordzeekust via een basiskustlijn, een kustfundament en een systeem met JarKus-raaien. Daaruit zal blijken dat een zandig voorland niet wezenlijk verschillend is, en eveneens te inspecteren en onderhouden is. Als onderhoudskosten zijn voorzien in een Life

## Ontwerp en beoordeling van dijk-voorlandsystemen

Cycle Cost (LCC) benadering, zijn alleen nog afspraken nodig over het uitvoeren van de taken voor monitoring en onderhoud.

2. Maak onderscheid tussen het ontwerp van een veiligheidsprofiel en een onderhoudsbuffer. Een veiligheidsprofiel moet met voldoende grote kans in staat zijn om zijn taak te vervullen tijdens extreme stormen, waardoor conservatieve keuzes gerechtvaardigd kunnen zijn. Een onderhoudsbuffer kan worden ontworpen op basis van de redelijkerwijs te verwachten zandverliezen. Als keuzes eventueel te optimistisch zijn gemaakt, kan dit worden ondervangen door monitoring en wat extra onderhoud. Deze aanpak leidt tot een goedkopere oplossing dan het preventief ondervangen van onzekerheden via grote hoeveelheden extra zand tijdens de aanleg.
3. Doe onderzoek naar de waarden die de brekerparameter aan kan nemen, aangezien deze parameter sterk bepalend is voor de golfhoogte die bij aanwezigheid van een voorland de dijk kan bereiken.

# Referenties

- Arcadis, Deltares en HKV (2017). Effectiviteit Voorlanden HR. Onderzoeksrapportage fase B POV Waddenzeedijken. 31 maart 2017
- Deltares (2016). Fenomenologische beschrijving faalmechanismen WTI. Deltares rapport 1220078-000. 18 februari 2016.
- Den Bieman, J. P., Stuparu, D. E., Hoonhout, B. M., Diermanse, F. L., Boers, M., & van Geer, P. F. (2014). Fully probabilistic dune safety assessment using an advanced probabilistic method. Coastal Engineering Proceedings, 1(34), 9.
- EcoShape (2018a). Pilot Voorlandoplossing Houtribdijk. Interim-rapportage februari 2018.
- EcoShape (2018b). Guideline Beheer en Onderhoud Zachte Voorlanden.
- ENW (2007). Technisch Rapport Duinafslag. Mei 2007.
- Den Heijer, C. K., Baart, F., & van Koningsveld, M. (2012). Assessment of dune failure along the Dutch coast using a fully probabilistic approach. Geomorphology, 143, 95-103.
- HKV (2016). Faalkansontwikkeling Westkapelse zeedijk. Memo pr3156.10. Februari 2016.
- Kolokythas, G. A., Raquel, S., & Blanco, M. R. D. (2016). Morphological Evolution of a Bed Profile Induced By a Storm Event at the Belgian Coast Predicted By XBeach Model. In The 26th International Ocean and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Oosterlo, P. (2015). A method to calculate the probability of dike failure due to wave overtopping, including the infragravity waves and morphological changes. MSc. thesis TU Delft.
- RPS (2015). Beslisschema voorlanden. April 2015.
- Van Rijn, L.C. (2002). Longshore Sand Transport. ICCE 28th, 2439–2451.
- TAW (2002). Leidraad Zandige Kust.
- Vuik, V., van Balen, W., van Vuren, S. (2017). Fully probabilistic assessment of safety against flooding along the Dutch coast. Journal of Flood Risk Management 10 (3), 349–360.

# Bijlage A – Statistiek Markermeer

Statistiek voor het Markermeer is bepaald op basis van de ongeveer 4 jaar lange meetreeks ter plaatse van de pilot Houtribdijk. Hier zijn met behulp van een ADV golven en waterstanden gemeten, en windsnelheden met behulp van een windmeter op de damwand naast de pilot.

Omni-directionele statistiek is als volgt bepaald:

1. Events bepalen via een Peak over Threshold methode, waarbij gedurende minimaal 6 uur de 95% percentielwaarde voor significante golfhoogte, opwaaiing, waterstand of windsnelheid werd overschreden;
2. Fitten van marginale kansverdelingen voor deze events, wat resulteert in overschrijdingskansen per event;
3. Bepalen van de correlatie tussen variabelen, en deze beschrijven aan de hand van bivariate copula's (van het type Gaussisch en Gumbel);
4. Fitten van een Poissonverdeling voor het aantal events boven de threshold per jaar ( $N$ );
5. Het genereren van een reeks van 10,000 jaarmaxima door voor elk jaar:
  - a. Een aantal events  $N$  te trekken via de Poissonverdeling;
  - b. Per 2 variabelen  $N$  combinaties te trekken uit de copula, en deze te substitueren in de marginale verdelingen, wat bijvoorbeeld  $N$  combinaties van windsnelheid en golfhoogte oplevert;
  - c. Het bepalen van het jaarmaximum van de afhankelijke variabele, en de bijbehorende waarde (op hetzelfde moment) van de onafhankelijke variabele.
6. Fitten van marginale verdelingen en een copula door de 10,000 jaarmaxima.

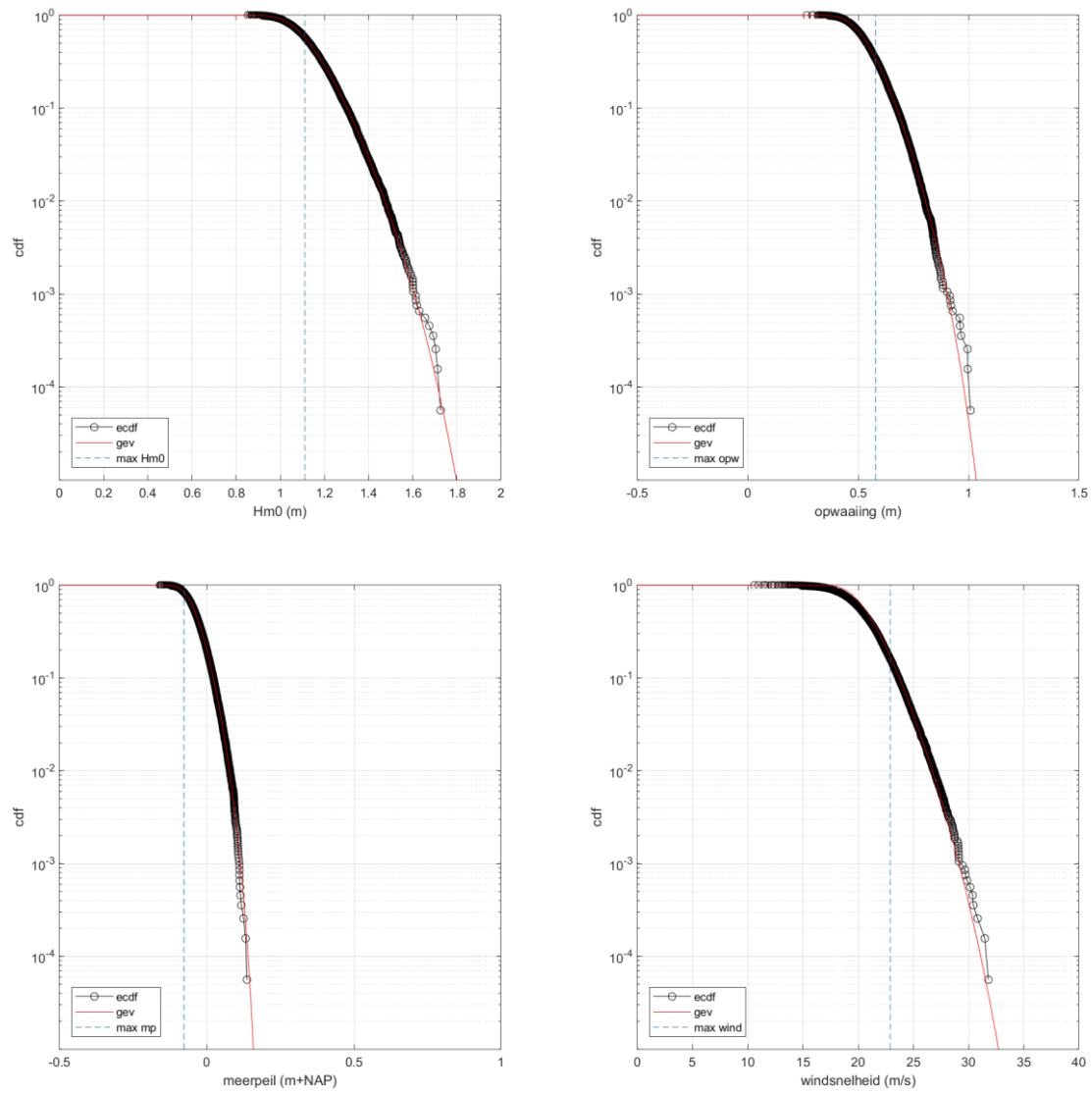
Deze methode is toegepast op verschillende combinaties van twee variabelen (met bivariate copula's):

1. Windsnelheid en golfhoogte
2. Windsnelheid en opwaaiing
3. Golfhoogte en golfperiode
4. Golfhoogte en golfrichting (geen correlatie)
5. Golfhoogte en (lokaal) meerpeil (geen correlatie)

Deze methode resulteert in omni-directionele statistiek van de relevante parameters. Dit wijkt af van de officiële statistiek voor het Markermeer, en heeft ook niet het doel om deze te vervangen. De werkwijze is ook redelijk 'quick and dirty' uitgevoerd, wat volstond voor de context van een voorbeeldberekening. De voordelen van deze aanpak binnen de context van deze studie zijn:

1. Er wordt gerekend met omni-directionele statistiek, wat veel minder rekentijd vergt dan een berekening voor elke windsector.
2. Er wordt gebruik gemaakt van de ter plaatse van de pilot voorlandoplossing Houtribdijk gemeten condities, waardoor de verbinding tussen de voorbeeldberekening en de pilot wordt versterkt.

## Ontwerp en beoordeling van dijk-voorlandssystemen



Figuur A-1 Marginale verdelingen voor significante golfhoogte (linksboven), opwaaiing (rechtsboven), (lokaal) meerpeil (linksonder) en windsnelheid (rechtsonder). In zwart de gesampled jaarmaxima, in blauw het gemeten maximum gedurende 4 jaar, in rood de gefitte kansverdeling.

**Contact**

Spuiboulevard 210,  
3311 GR Dordrecht  
+31 78 6111 099  
[info@ecoshape.nl](mailto:info@ecoshape.nl)  
[www.ecoshape.nl](http://www.ecoshape.nl)