

## Kennis voor keringen GEKB Overgangen en objecten



# Kennis voor keringen GEKB Overgangen en objecten

## **Auteur(s)**

André van Hoven

## Kennis voor keringen GEKB Overgangen en objecten

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	Myron van Damme
<b>Referenties</b>	Plan van aanpak overgangen en objecten GEKB, Deltares projectnummer 11205263, d.d. 16 oktober 2020
<b>Trefwoorden</b>	grasbekledingen, waterveiligheid, overgangen en objecten, GEKB, COM, Cumulatieve overbelastingmethode, invloedsfactoren, lengte-effect, kliferosie

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	2.0
<b>Datum</b>	19-12-2022
<b>Projectnummer</b>	11208057-012
<b>Document ID</b>	11208057-012-GEO-0001
<b>Pagina's</b>	80
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	André van Hoven Ligaya Wopereis (Hoofdstuk 5 en Bijlage B)	

# Samenvatting

Overgangen en objecten zijn een zwakke schakel in de grasbekleding, wat van invloed is op de benodigde kruinhoogte van de dijk (faalmechanisme GEKB – Gras Erosie Kruin en Binnentalud). Meervoudig gebruik van waterkeringen maakt het vermijden van objecten en overgangen niet realistisch. Omdat objecten en overgangen vanuit beheer en onderhoud en waterveiligheid een belangrijke rol spelen is het van belang om de invloed van overgangen en objecten op de faalkans van de grasbekleding beter te onderbouwen.

In het kader van het BOI (Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium) is hiertoe een eerste aanzet gedaan, waarbij is uitgegaan van 'worst case' invloedsfactoren voor overgangen en objecten, ongeacht welke overgangen en objecten op de dijk aanwezig waren ( $\alpha_a=1,4$ ;  $\alpha_M=1,8$  en  $\alpha_S=0,9$ ).

In het kader van deze studie is een verfijning uitgevoerd, waarbij onderscheid is gemaakt tussen verschillende typen overgangen en objecten, verschillende categorieën dijken en is hiervan uitgaande gekeken naar de lengte-effectfactor. Bij de verschillende categorieën dijken is geen gebruik gemaakt van 'worst case' invloedsfactoren maar zijn onzekerheden over de invloed van diverse overgangen en objecten in rekening gebracht. Voor het bepalen van de categorisering is een beroep gedaan op de expertgroep grasbekledingen. Daarnaast is een vierde categorie dijken geïntroduceerd, bestaande uit een kleikern waar geen grasbekleding van betekenis op aanwezig is (fragmentarische zode). Dit komt voor langs rivierdijken waar rondom bebouwing tuintjes, bestrating, struiken aanwezig zijn en dus geen bekleding. Zanddijken en zanddijken met een kleibekleding met een 'fragmentarische zode' zijn buiten beschouwing gebleven.

De studie heeft geleid tot aanbevelingen met betrekking tot de te hanteren factoren, per categorie dijken, inclusief de lengte-effectfactor. Daaruit blijken objecten op het talud dominant.

Voor de categorie dijken met (deels) een fragmentarische zode, in combinatie met een kleikern worden kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet gegeven. Er is maar zeer beperkte ervaring met bresinitiatie van (kale)kleidijken. Dit heeft geresulteerd in een zeer grote bandbreedte van het kritisch golfoverslagdebiet voor deze categorie dijken. Er is voor deze categorie dijken nog geen lengte-effectfactor afgeleid, waardoor de kansverdelingen niet in een standaard GEKB beoordeling kunnen worden gebruikt (met lengte-effectfactoren van grasbekledingen).

Tenslotte is een impactstudie uitgevoerd, waarbij de betrouwbaarheidsindices zijn bepaald voor diverse locaties bij diverse watersystemen, enerzijds uitgaande van worst case invloedsfactoren en anderzijds met de in dit rapport aangebrachte differentiatie. Zoals verwacht blijkt de winst veelal gering, resulterend in een lagere faalkans en benodigde kruinhoogte.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Invloedsfactoren overgangen en objecten</b>	<b>8</b>
2.1	Model erosie grasbekledingen	8
2.2	Typen overgangen en objecten	11
2.3	Kwantificering invloedsfactoren	12
2.3.1	$\alpha_S$ lagere sterkte bij overgang en object	12
2.3.2	$\alpha_a$ versnelling en vertraging frontsnelheid	13
2.3.3	$\alpha_M$ type i Overgang in bekledingstype of ruwheid	14
2.3.4	$\alpha_M$ type ii obstakels	16
2.3.5	$\alpha_M$ type iii objecten parallel aan stroming	20
2.3.6	$\alpha_M$ type iv geometrische overgangen	20
2.4	Samenvatting en discussie	23
<b>3</b>	<b>Categorisering dijkvakken en invloedsfactoren per categorie</b>	<b>25</b>
3.1	Inleiding	25
3.2	Aanpak	25
3.3	Resultaat	26
<b>4</b>	<b>Sterkte kleikern</b>	<b>29</b>
4.1	Inleiding	29
4.2	Faalbeschrijving	29
4.3	Modellering en uitgangspunten	30
4.4	Resultaten	34
<b>5</b>	<b>Invloed gewijzigde sterktemodellering op lengte-effect factoren voor GEKB</b>	<b>38</b>
5.1	Inleiding	38
5.2	Aanpak	39
5.2.1	Bepaling van het lengte-effect	39
5.2.2	Schematisering van objecten	40
5.2.3	Schematisatie dijktrajecten	40
5.3	Resultaten	42
5.3.1	Basiscases	42
5.3.1.1	Dijktraject 50-1	43
5.3.1.2	Dijktraject 8-4	45
5.3.2	Gevoeligheidsanalyse	45
5.3.2.1	Variatie in correlatie tussen objecten	46
5.3.2.2	Variatie in categorieën	46
5.3.2.3	Variatie in correlatielengte van alle sterkteparameters	47
5.3.2.4	Variatie in betrouwbaarheid per dijkvak	47

5.3.3	Fragmentarische zode	48
5.4	Conclusies	50
<b>6</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>54</b>
6.1	Conclusies	54
6.2	Aanbevelingen	55
<b>7</b>	<b>Referenties</b>	<b>57</b>
<b>A</b>	<b>Narekenen <math>\alpha_M</math> overgang weg - gras</b>	<b>59</b>
A.1	Vechtdijk proeven winter 2020-2021	59
A.1.1	Korte samenvatting proefopzet	59
A.1.2	Terugrekenen $U_c$ en $\alpha_M$	62
A.1.3	Conclusie	65
A.2	Ijsseldijk project Zwolle – Olst	65
A.2.1	Korte samenvatting	65
A.2.2	Terugrekenen $U_c$ en $\alpha_M$	69
A.2.3	Conclusie	71
A.3	Golfoploopprouwen Waddenzeedijken	71
A.4	Golfoploopprouwen Noord-Beveland	75
<b>B</b>	<b>Impactanalyse objecten en overgangen op dijken</b>	<b>79</b>

# 1 Inleiding

Overgangen en objecten vormen een bewezen zwakke schakel in de grasbekleding en een bekleding is zo sterk als de zwakste schakel. Op de huidige dijken zijn een overweldigende hoeveelheid overgangen en objecten aanwezig. Vanuit waterveiligheid gezien is het gunstig om overgangen en objecten zoveel mogelijk te vermijden, iets wat met het meervoudig ruimtegebruik van de waterkeringen slechts beperkt mogelijk is. Er is daarom behoefte aan inzicht in hoe groot het negatieve effect is. Dit is direct van invloed op de benodigde kruinhoogte van een dijk.

In het WBI2017 (Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017) werd niet expliciet rekening gehouden met de negatieve invloed van overgangen en objecten in de grasbekleding bij het faalmechanisme GEKB (gras erosie kruin en binnentalud). In het kader van het OI2014 (Ontwerpinstrumentarium 2014) en later het BOI (Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium) is dit wel gedaan. Hierbij is gebruik gemaakt van 'worst case' invloedsfactoren voor overgangen en objecten, ongeacht welke overgangen en objecten op de dijk aanwezig waren.

In het kader van onderhavige studie is een verfijning uitgevoerd, waarbij onderscheid is gemaakt naar verschillende typen overgangen en objecten, verschillende categorieën dijken en is gekeken naar de invloed op de faalkans van dijktrajecten (lengte-effect). Bij de verschillende categorieën dijken is in tegenstelling tot de vorige studie [17] geen gebruik gemaakt van 'worst case' invloedsfactoren maar zijn onzekerheden over de invloed van diverse overgangen en objecten in rekening gebracht. Hiervoor is gebruik gemaakt van bestaande kennis en reeds beschikbare golfoverslag- en oploopprouwen. Voor het bepalen van de categorisering van dijken is een beroep gedaan op de expertgroep grasbekledingen.

Een vierde categorie dijken is geïntroduceerd waarop geen bekleding of een 'fragmentarische zode' aanwezig is [23] maar die wel volledig uit klei bestaat en daardoor ook een significante weerstand biedt tegen erosie door golfoverslag. Dit is een type dijk dat volgens de beelden van de expertgroep veelvuldig voorkomt, met name langs rivieren. Rondom panden bij of op deze dijken is geen grasbekleding aanwezig maar tuinen, bestrating, struiken en dergelijke. Zanddijken en zanddijken met een kleibekleding met een 'fragmentarische zode' zijn buiten beschouwing gebleven.

Voor elk van de gedefinieerde categorieën dijken wordt een aanbeveling gedaan met betrekking tot de te hanteren factoren, inclusief de lengte-effectfactor. Alleen voor dijken met een kleikern en een fragmentarische zode is nog geen lengte-effectfactor afgeleid.

In een korte impactstudie (Bijlage B) zijn de aanpak met worst case factoren en de in dit rapport gehanteerde differentiatie naast elkaar gezet voor diverse dijken bij diverse watersystemen. Dit laat een geringe winst zien, resulterend in een iets lagere faalkans en een iets lagere benodigde kruinhoogte.

## 2 Invloedsfactoren overgangen en objecten

### 2.1 Model erosie grasbekledingen

Falen van de grasbekleding is gedefinieerd als het doorbreken van de toplaag. De toplaag heeft een dikte van orde 0,2 m. Door wortels in de toplaag en de invloed van wortels op de samenhang tussen grondkorrels en aggregaten, is de toplaag aanzienlijk erosiebestendiger dan de grondlaag hieronder. De diepte tot waar de positieve invloed van wortels op de erosiebestendigheid aanwezig is, is bepalend voor de dikte van de toplaag. Deze kan aanzienlijk afwijken van 0,2 m. Bij golfverslagproeven is meermaals een vrij scherpe overgang gezien tussen de toplaag en veel minder erosiebestendige lagen hieronder. Na doorbreken van de toplaag ging de verdieping van de erosie veel sneller. Het overslaande water kleurde dan ineens bruin door de meegevoerde klei en zand van onder de toplaag.

Bij grootschalige golfverslagproeven is waargenomen dat het doorbreken van de toplaag vaak in twee fasen gebeurt. Eerst werd een stuk van de zode verwijderd, ofwel ontbrak ergens een stukje zode door een graafgangetje of kaal plekje tussen pollen gras (Figuur 2.1). Deze kale plek breidt vervolgens uit in met name stroomafwaartse richting. Na verwijdering van de zode komt een gladde grondlaag tevoorschijn waar veel wortels in zitten (Figuur 2.2). Verdieping van de erosie door de laag onder de zode gaat vaak langzaam totdat er, vaak bij een grote golf, een stukje uit deze laag wordt verwijderd. Dan gaat de erosie snel de diepte in en breidt ook in omvang uit (Figuur 2.3). De tijd tussen het ontstaan van kale plekken, het afstropen van de zode en de doorbraak van de toplaag was wisselend. Vaak zat er veel tijd tussen maar een enkele keer ging het relatief snel (Figuren overgenomen uit [4]).



Figuur 2.1 Ontstaan van een kaal plekje (Golfverslagproeven St. Philipsland).





*Figuur 2.2 Afstropen van de zode (links Afsluitdijk, rechts Delfzijl na aanbrengen van schades).*



*Figuur 2.3 Doorbraak toplaag; links Boonweg (kleibekleding op zandkern), rechts Overijsselse Vechtdijk (volledige zanddijk).*

Falen van de grasbekleding (=doorbraak van de toplaag) op de kruin en het binnentalud van een dijk door erosie bij golfoverslag wordt berekend met de cumulatieve overbelastingmethode (COM). Met deze methode wordt een schadegetal  $D$  ( $m^2/s^2$ ) berekend. Wanneer de kritische waarde van het schadegetal wordt overschreden geldt dit als

rekenkundig falen van de grasbekleding. De formule voor het berekenen van het schadegetal is als volgt:

$$D = \sum_{i=1}^N \max\left(\alpha_M (\alpha_a U_i)^2 - \alpha_S U_c^2; 0\right)$$

Waarin:

- D Schadegetal ( $m^2/s^2$ ).
- N Aantal overslaande golven (-).
- $U_i$  Frontsnelheid overslaande golf op de buitenkruinlijn (m/s).
- $U_c$  Kritische snelheid grasbekleding (m/s).
- $\alpha_a$  Versnellingsfactor voor talud (-).
- $\alpha_M$  Belastingverhogende factor voor het in rekening brengen van het effect van objecten en of overgangen op erosie van de grasbekleding (-).
- $\alpha_S$  Sterkteverlagende factor voor het in rekening brengen van het effect van objecten en of overgangen op erosie van de grasbekleding (-).

Bij verschillende waarden van het schadegetal horen de volgende schadebeelden:

- $D \approx 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$  Eerste schade.
- $D \approx 4000 \text{ m}^2/\text{s}^2$  Meerdere kale plekken.
- $D = 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$  Falen grasbekleding; doorbraak toplaag.

Hierbij wordt opgemerkt dat de criteria 'eerste schade' en 'meerdere kale plekken' veel minder constant zijn dan het falen van de toplaag. Het falen van de toplaag is met name gebruikt voor het kalibreren van het model. Het verschil in schadegetal tussen een eerste schade en doorbraak van de toplaag was relatief variabel.

De belasting in het model wordt gekarakteriseerd door de frontsnelheid van de overslaande golfvolumes in het kwadraat vermenigvuldigd met de invloedsfactor  $\alpha_M$ . Uitgangspunt zijn de frontsnelheden van de oplopende golven op de buitenkruinlijn. Met de versnellingsfactor  $\alpha_a$  wordt de frontsnelheid verder in het dwarsprofiel berekend.

De factor  $\alpha_M$  werkt op de frontsnelheid in het kwadraat. Deze factor verdisconteert de belastingverhoging door de aanwezigheid van overgangen en objecten in de grasbekleding.

De sterkte van de grasbekleding wordt gekarakteriseerd door de kritische stroomsnelheid in het kwadraat. De invloedsfactor  $\alpha_S$  (-) verlaagt deze sterkte, omdat het gras langs een object niet 'vast' zit aan het object. De wortels groeien er wel tegenaan maar er niet aan vast. Bij geometrische overgangen, zoals van talud naar achterland, is de grasbekleding niet onderbroken en is deze factor gelijk aan 1.

In dit hoofdstuk wordt vanuit theoretische gronden en resultaten van golfoverslagproeven een schatting van de invloedsfactoren  $\alpha_M$  en  $\alpha_S$  gegeven voor verschillende typen overgangen (Paragraaf 2.2). In tegenstelling tot de vorige studie [17] wordt hierbij niet uitgegaan van een worst case scenario maar wordt zo goed mogelijk een bandbreedte geschat waarbinnen de factoren liggen. Dit laatste is nodig voor de probabilistische analyse van dijkvakken met meerdere overgangen en objecten (Hoofdstuk 4) en de bepaling van de lengte-effectfactor (Hoofdstuk 6).

## 2.2 Typen overgangen en objecten

Het aantal overgangen en objecten op dijken is overweldigend. Wegen, fietspaden, wegovergangen langs het talud, wegmeubilair, dijkpalen, hekwerk, bankjes, taludtrappen, bomen, bebouwing, de overgang van een talud naar berm of het achterland et cetera en elk in meerdere varianten, vormen, afmetingen en plek in het dwarsprofiel van de dijk. Om de beoordeling behapbaar te maken zijn de overgangen en objecten ingedeeld in typen. Elk type wordt vervolgens beschreven met een kansverdeling van de bijbehorende invloedsfactoren. De volgende typen worden onderscheiden:

### **Type i – in het vlak glad naar ruw (gras)**

Overgang in het vlak van het maaiveld van een relatief gladde bekleding (bijvoorbeeld een weg) naar een relatief ruwe grasbekleding. De overgang in ruwheid zorgt voor een verhoogde schuifspanning op de grasbekleding. De sterkte is verminderd doordat het wortelnet van de grasbekleding zich niet of moeilijk hecht aan een harde bekleding, zoals beton of asfalt.

### **Type ii – object dat uit de grasbekleding steekt**

Een object dat uitsteekt vanuit de grasbekleding, bijvoorbeeld hekwerk, bebording, bankjes, bomen. Overslaande golfvolumes zullen om het object heen stromen. Op de kopse kant van het object kan het golfvolumen een drukpuls of impact geven en rondom de hoeken van het object kunnen eveneens hogere drukgradiënten optreden. In beide gevallen leidt dit tot een hogere belasting. De sterkte is verminderd doordat het wortelnet zich niet of moeilijk hecht aan het object.

### **Type iii – stroming langs een object of overgang**

Bij een object, bijvoorbeeld een wand van een coupure, of een taludtrap haaks op het dijk-talud kan golfoverslag langs dit object of overgang stromen. De stroming botst niet tegen het object en stroomt er niet overheen maar er parallel langs. Omdat een wand of taludtrap wel een zekere weerstand op de stroming zal uitoefenen zal er een zekere belastingverhoging (of verlaging) op de grasbekleding kunnen optreden. Verwacht wordt dat minder is dan voor type i of ii. De sterkte is wel verminderd doordat het wortelnet zich niet of moeilijk hecht aan het object of overgang.

### **Type iv – geometrische overgang van talud naar achterland**

Onderaan het talud zullen de golfoverslagvolumes ombuigen naar het achterland. Deze uitwisseling van impuls tussen de stroming en de grasbekleding leidt tot een verhoging van de belasting. De grasbekleding op deze overgang is niet verzwakt, er is enkel sprake van een belastingverhoging.

De typering in deze vier typen is een verbetering ten opzichte van de vorige studie [17], waarbij is uitgegaan van één set invloedsfactoren voor de slechtst denkbare overgang of object ( $\alpha_a=1,4$ ;  $\alpha_M=1,8$  en  $\alpha_S=0,9$ ). Dit wordt verondersteld 'worst case' te zijn. Ondanks dat in het kader van deze studie een verfijning plaatsvindt blijft er sprake van een sterke vereenvoudiging. Er zullen mengvormen zijn, bijvoorbeeld iets schuin invallende golfoverslag over een type iii overgang zal afhankelijk van de overgang of het object ook (gedeeltelijk) kunnen worden getypeerd door i of ii. Een rand tussen een asfaltweg en grasbekleding (type i) zal indien het hoogteverschil groot is leiden tot een type ii overgang met een heel grote breedte. De vereenvoudiging wordt desondanks gemaakt vanuit praktische overwegingen en vanwege gebrekkige kennis over de invloed van alle verschillende (mengvormen) van overgangen en objecten. De gebrekkige kennis heeft zich vertaald in een vrij ruime onzekerheidsmarge. Evaluatie van de resultaten en eventuele nieuwe inzichten over de invloed van overgangen en objecten moeten leiden tot aanscherping.

## 2.3 Kwantificering invloedsfactoren

Er zijn drie invloedsfactoren,  $\alpha_s$  op de sterkte,  $\alpha_a$  op de frontsnelheid ter plaatse van de buitenkruinlijn en  $\alpha_M$  op de belasting, zijnde de lokale frontsnelheid in het kwadraat. In deze paragraaf worden de invloedsfactoren gekwantificeerd. Hierbij wordt  $\alpha_M$  onderverdeeld voor verschillende typen overgangen:

- Type i Overgang bekledingstype, glad naar ruw.
- Type ii Obstakel die uit de grasbekleding steekt, verder onderverdeeld in klein, middelgroot en groot.
- Type iii Objecten parallel aan de stroming.
- Type iv Geometrische overgang van talud naar berm of achterland.

In het kader van dit project heeft geen inhoudelijke kennisontwikkeling plaatsgevonden op dit gebied. De beperkte hoeveelheid beschikbare informatie is gebruikt, deels vanuit theoretische modellen en deels uit resultaten van grote erosieproeven. De grote onzekerheden zijn vertaald in brede kansverdelingen van  $\alpha_M$ .

### 2.3.1 $\alpha_s$ lagere sterkte bij overgang en object

Een grasbekleding kan door een object worden onderbroken. Bijvoorbeeld door een paal, pand, weg of een boom. Het stukje grasbekleding langs het object is dan aan één zijde niet verankerd aan naburig gras, waardoor het makkelijker is om dit stukje uit de bekleding te trekken.

Gegeven een vierkant stukje of blokje zode dat wordt uitgetrokken dat aan vier kanten vast zit aan naburig gras en aan de onderkant aan de onderlagen dan is de uittrekkraft  $F$  hiervan gelijk aan vier keer de kracht op een zijkant plus de kracht van de onderkant. Als het stukje gras aan één kant is onderbroken is dan is de uittrekkraft gelijk aan drie keer de kracht op de zijkant plus de kracht op de onderkant. De sterktereductie, ofwel de reductie van de benodigde uittrekkraft wordt gelijk gesteld aan de  $\alpha_s$ . Het uittrekken van het blokje zode is uitgevoerd met de grastrekker [6]. Door twee of vier zijkanten los te steken resulterend in een uittrekkraft  $F_{2proef}$  en  $F_{4proef}$  kan de  $\alpha_s$  worden berekend door de volgende formule:

$$\alpha_s = \frac{1,5F_{2proef} - 0,5F_{4proef}}{2F_{2proef} - F_{4proef}}$$

Een dataset van grastrekproeven die is geanalyseerd in het kader van [6] leverde met deze formule een range van  $\alpha_s=0,82 - 0,95$  met een gemiddelde van 0,86 (-). In [5] is een waarde 0,9 (-) gehanteerd. De exacte waarde is afhankelijk van de verhouding tussen de weerstand die wordt geleverd tussen de onderkant (resultaat van  $F_{4proef}$ ) en de zijkanten en is enigszins variabel.

Er zijn diverse kanttekeningen te plaatsen bij deze theoretische benadering. Een andere vorm dan een vierkantje, bijvoorbeeld een driehoek of een halve cirkel, zal leiden tot een andere theoretische waarde van  $\alpha_s$ . De plaatselijke kwaliteit van de graszode is mogelijk nog belangrijker. De kwaliteit kan beter of slechter zijn als gevolg van het object. Een zandiger grond langs een weg kan voordelig of nadelig uitpakken voor het wortelstelsel en daarmee de erosiebestendigheid. Muizenactiviteiten langs randjes kunnen de kwaliteit verslechteren. De vochthuishouding langs objecten en wegen kan zodanig zijn dat de graskwaliteit hier negatief of positief wordt beïnvloed. Verder valt te denken aan gevolgen van verkeer dat uitwijkt net naast een weg en het effect van strooizout. Deze effecten zijn visueel waarneembaar en te beoordelen, bijvoorbeeld door het steken van een plag langs een object en te kijken naar de aansluiting van het wortelnet op het object. Hiermee kan worden bepaald of de kwaliteit van

de grasbekleding 'gesloten' of 'open' is tot aan de aansluiting op het object. In Figuur 2.4 (links) wordt hiervan een voorbeeld gegeven.



*Figuur 2.4 Gestoken plag langs betonconstructie: wortelbel sluit netjes aan. Gestoken plag langs fietspad, wortelnet deels in het asfalt verankerd, plag scheurt niet langs de overgang.*

Vanwege de relatief geringe variabiliteit van  $\alpha_S$  en het geringe effect hiervan op de faalkans ten opzichte van de variabiliteit van  $\alpha_M$  in combinatie met  $\alpha_a$  is binnen deze studie uitgegaan van een vaste waarde van  $\alpha_S = 0,9$ . Benadrukt wordt dat het hierbij gaat om een 'nette overgang', waarbij het wortelnet evenals de bovengrondse plantdelen aansluiten op het object. Indien de grasbekleding niet netjes aansluit en er sprake is van kale grond, of een 'fragmentarische zode', dan is de cumulatieve overbelastingmethode niet bruikbaar als erosiemodel. Hier wordt in hoofdstuk 4 aandacht aan besteed.

Bij een geometrische overgang van talud naar berm of achterland (type iv) is er geen sprake van een onderbreking van de grasbekledingen en is  $\alpha_S$  gelijk aan 1,0.

### 2.3.2 $\alpha_a$ versnelling en vertraging frontsnelheid

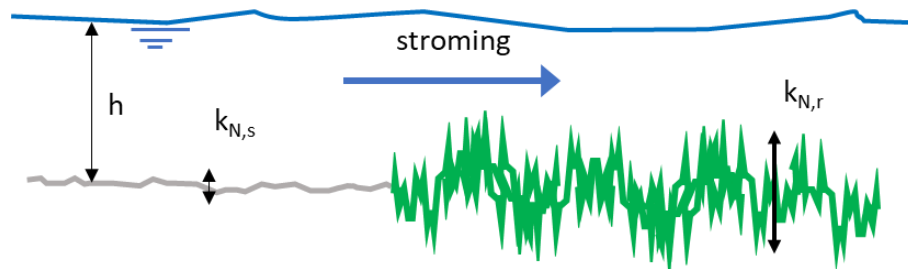
De factor  $\alpha_a$  (-) verdisconteert het versnellen en eventueel vertragen van de frontsnelheid op de kruin en het talud van de dijk, ten opzichte van de frontsnelheid op de buitenkruinlijn.

In het algemeen zal de frontsnelheid op de kruin lager worden ( $\alpha_a < 1$ ) en op het talud hoger ( $\alpha_a > 1$ ). De versnelling en vertraging is afhankelijk van de breedte van de kruin, de taludhelling en taludlengte maar ook van het overslagvolume, de aanvangssnelheid op de buitenkruinlijn en de ruwheid van de kruin en het talud. Voor het in rekening brengen hiervan zijn benaderende formules beschikbaar [12]. Vanuit praktische overweging is de factor  $\alpha_a$  gedifferentieerd naar kruin: 1,0 en talud: 1,4, evenals is gedaan bij de vorige studie naar de invloed van overgangen en objecten [17]. Hierbij wordt er mee rekening gehouden dat de grotere overslagvolumes in het algemeen de schade leidend tot falen veroorzaken en dat deze bij een talud in de range van 1:2,3 à 1:4 een versnelling hebben van circa 1,4. Kleinere volumes versnellen minder en kunnen ook vertragen. Deze volumes geven in het algemeen echter geen of een zeer geringe bijdrage aan de schade.

### 2.3.3

#### $\alpha_M$ type i Overgang in bekledingstype of ruwheid

Een stroming van een relatief glad naar een relatief ruw oppervlak ondervindt een toename van de schuifspanning tussen stroming en oppervlak, zoals schematisch weergegeven in Figuur 2.5.



Figuur 2.5 Principeschets overgang glad naar ruw.

Uit stroomgootproeven met afwisselend ruwe en gladde bodems is gebleken dat op de overgang zelf de toename van de schuifspanning hoger is dan de schuifspanning van de aangepaste stroming op het ruwe oppervlak. De toename van de schuifspanning kan worden vertaald in de belastingfactor  $\alpha_M$  (zie voor de afleiding en achtergrond [1] en [2]).

$$\alpha_M = 2 - \frac{k_{N,s}}{k_{N,r}} \left( \frac{\ln \left( \frac{10h}{k_{N,s}} \right)}{\ln \left( \frac{10h}{k_{N,r}} \right)} \right)^2 \quad \text{met de Nikuradse equivalente zanddiameter, of}$$

$$\alpha_M = 2 - \left( \frac{n_{M,s}}{n_{M,r}} \right)^6 \left( \frac{\ln \frac{10h}{(8\sqrt{g}n_{M,s})^6}}{\ln \frac{10h}{(8\sqrt{g}n_{M,r})^6}} \right)^2 \quad \text{met Manning coëfficiënten.}$$

Hierin zijn:

$k_{N,s}$  Nikuradse ruwheid glad (smooth) oppervlak (m).

$k_{N,r}$  Nikuradse ruwheid ruw (rough) oppervlak (m).

$n_{M,s}$  Manning coëfficiënt, glad (smooth) oppervlak ( $s/m^{1/3}$ ).

$n_{M,r}$  Manning coëfficiënt, ruw oppervlak ( $s/m^{1/3}$ ).

$h$  waterlaagdikte (m).

$g$  Zwaartekrachtversnelling ( $m/s^2$ ).

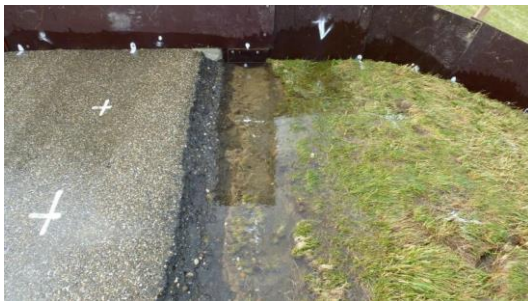
Opgemerkt wordt dat de overgang van een stroming van een relatief ruwe (gras)bekleding naar een gladdere (harde)bekleding resulteert in een belastingfactor die rekenkundig lager is dan 1. Dit is in het kader van deze studie echter niet relevant, omdat het niet leidt tot een rekenkundig hogere belasting op het gras, maar een lagere belasting op de harde bekleding.

De Manning coëfficiënt kan worden geschat aan de hand van bestaande tabellen voor diverse materialen, zoals gegeven in [2]. De wrijving die de stroming ondervindt door ruwheid kan ook worden gekarakteriseerd door de equivalente zanddiameter volgens Nikuradse [3]. De belastingfactor  $\alpha_M$  wordt naast de ruwheden bepaald door de waterlaagdikte, die voor golfoverslagvolumes kan variëren van enkele centimeters tot ongeveer 0,3 m voor volumes van meerdere kubieke meters per strekkende meter.

Uitgaande van een equivalente zanddiameter volgens Nikuradse van 2 tot 5 mm voor asfalt (niet afgewerkt beton, [3]), 2 tot 5 cm voor gras en een waterlaagdikte van 0,05 tot 0,2 m leidt dit tot een theoretische belastingfactor van 1,5 tot 1,8 (-).

Door Van Bergeijk [18] is met een 2D numeriek stromingsmodel (OpenFOAM®) onderzoek gedaan naar de invloed van overgangen in ruwheid en de overgang van een richel, bijvoorbeeld een wegverharding die boven de grasbekleding uitsteekt, of die juist iets verdiept ligt. De numerieke berekeningen geven normaal- en schuifspanningen op het bekledingsoppervlak in tijd en plaats. De berekende normaal- en schuifspanningen met een overgang zijn vergeleken met de normaal- en schuifspanningen zonder overgang en hieruit kan in theorie een  $\alpha_M$  worden teruggerekend. Een belangrijke conclusie is dat verschillen in ruwheid, zonder hoogteverschil maar heel beperkt leiden tot verhoging van schuif- en normaalspanningen. De omgerekende  $\alpha_M$  is in de orde van 1,2 (-). Veel groter is de verhoging van de schuif- en normaalspanningen bij richels c.q. hoogteverschil. De normaal en schuifspanningsverhoging laat zich bij richels vergelijken met die voor een 2 tot maximaal 8 keer hogere stroomsnelheid, afhankelijk van de hoogte van de richel. Hierbij wordt direct opgemerkt dat in dit geval met name de normaalspanning veel hoger wordt en dat dit niet eenduidig kan worden omgerekend naar een  $\alpha_M$ . Voor de bruikbaarheid van de resultaten van Van Bergeijk zou moeten worden gekeken op welke manier de toename van de combinatie van normaal- en schuifspanningen tot een passende  $\alpha_M$  kunnen worden omgerekend.

Bij een aantal golfoploop- en golfoverslagproeven is een overgang van bekledingstype beproefd. Eerder is in [5] een analyse uitgevoerd voor een golfoverslagproef op de Durmedijk in België en de Waaldijk bij Millingen, beide met een weg op de kruin. Bij de Durmedijk is alleen het begin van schade opgetreden, waardoor de  $U_c$  en  $\alpha_M$  niet nauwkeurig konden worden vastgesteld. In [5] werd een  $\alpha_M$  van 1,7 à 2 afgeleid, afhankelijk van de aanname van  $U_c$ . Bij de Waaldijk is falen van de overgang opgetreden, eveneens leidend tot een schatting van 1,7 à 2. Hierbij wordt opgemerkt dat de overgang geen 'nette' overgang was, omdat het gras tot circa 0,5 m van de weg was aangetast door verkeer [24] (Figuur 2.6).



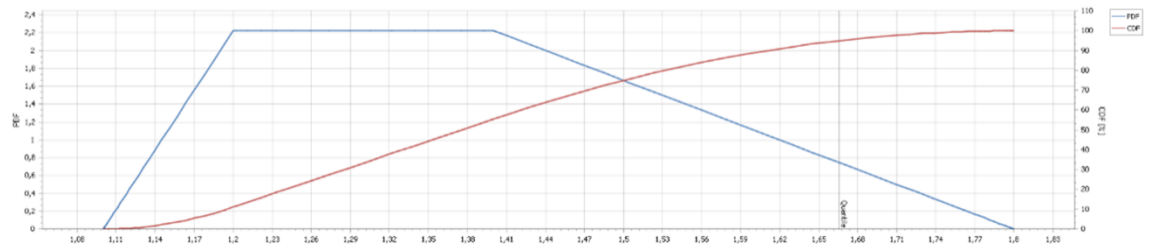
*Figuur 2.6 Wegovergang op de Waaldijk bij Millingen.*

In het kader van deze studie zijn latere (na [5]) golfoverslagproeven op de IJsseldijk, Vechtdijk (beide gras op zand bekledingen) en golfoploopproeven op de Scheldedijk Noord Beveland en op enkele Waddenzeedijken teruggerekend. Bij de golfoverslagproeven was er een wegverharding op de kruin aanwezig, bij de golfoploopproeven ging het om een overgang van een harde bekleding op het buitentalud naar de grasbekleding hoger op het talud. De wegverharding op de Vechtdijk lag aanzienlijk hoger dan de grasbekleding, de weg op de IJsseldijk lag wat lager dan de grasbekleding, omdat het gras over de betonverharding was gegroeid, en de aansluitingen tussen gras en harde bekleding op de Waddenzeedijken en Noord Beveland lagen vrijwel op gelijke hoogte. De analyse wordt beschreven in Bijlage A en leidt tot het resultaat:

Vechtdijk	$\alpha_M$ tussen 1,15 en 1,8 .
IJsseldijk	$\alpha_M$ tussen 1 en 1,7.
Noord Beveland	$\alpha_M$ tussen 1 en 1,3.
Waddenzeedijken	$\alpha_M$ tussen 1 en 1,5.

Ondanks het uitvoeren van de grootschalige erosieproeven blijft er vaak enige onzekerheid over de  $U_c$  van de grasbekleding. Dit komt bijvoorbeeld door het niet bezwijken van de grasbekleding (Noord Beveland, Waddenzeedijken, Vechtdijk enkele stroken en IJsseldijk enkele stroken), ofwel door een aantasting bij de overgang (Vechtdijk), ofwel door onzekerheden over de bereikte frontsnelheden (Waddenzeedijken en Noord Beveland), of een combinatie van deze onzekerheden. De onzekerheid over  $U_c$  leidt tot een onzekerheid over  $\alpha_M$ . Om een proefresultaat te verklaren, bijvoorbeeld schade, falen of juist niet falen is een combinatie van  $U_c$  en  $\alpha_M$  nodig, waarbij een relatief hoge  $U_c$  leidt tot een relatief hoge  $\alpha_M$  en omgekeerd. Daarmee ontstaat een directe rekenkundige (niet fysische) correlatie tussen de voor deze vier locaties geschatte  $\alpha_M$  en  $U_c$ . Bij de toepassing van de cumulatieve overbelastingmethode voor de schatting van het lengte-effect (Hoofdstuk 5) wordt gebruik gemaakt van zowel de kansverdelingen van de  $U_c$  als de kansverdeling van  $\alpha_M$ . Deze kansverdeling van  $U_c$  is niet afkomstig van de terugrekende  $U_c$ 's uit de laatste proeven, maar van eerdere proeven, waarbij overgangen en objecten niet aanwezig waren, of expliciet niet werden beschouwd bij de bepaling van de  $U_c$  en dus niet (rekenkundig) gecorreleerd aan de hier gegeven schatting van de kansverdeling van  $\alpha_M$ .

Er is een relatief grote onzekerheid ten aanzien van de waarde van  $\alpha_M$ , waardoor een relatief brede kansverdeling van  $\alpha_M$  passend is. Theoretische modellen en proefresultaten liggen niet op één lijn. Afgezien van de grote toenames van de normaalspanningen bij een hoogteverschil op basis van [18], lijkt een bovengrens van 1,8 redelijk evenals een ondergrens van iets boven 1,0. Indien er geen sprake is van een niet al te groot hoogteverschil (Noord Beveland en Waddenzeedijken), dan ligt het zwaartepunt aan de lage kant van deze range. Er is daarom gekozen voor een verdeling in de vorm van een trapezium, met karakteristieke punten 1,1 (minimum), 1,2; 1,4 en 1,8 (maximum) (Figuur 2.7).



Figuur 2.7 Verdeling  $\alpha_M$  overgang type i.

Het hoogteverschil is een onzekere factor bij deze verdeling van  $\alpha_M$ . Gezien de waarnemingen bij de beproefde overgangen met een hoogteverschil van 0 tot ruim 0,15 m (Vechtdijk en Millingen) zou deze beperkt moeten blijven tot orde 0,05 à 0,1 m.

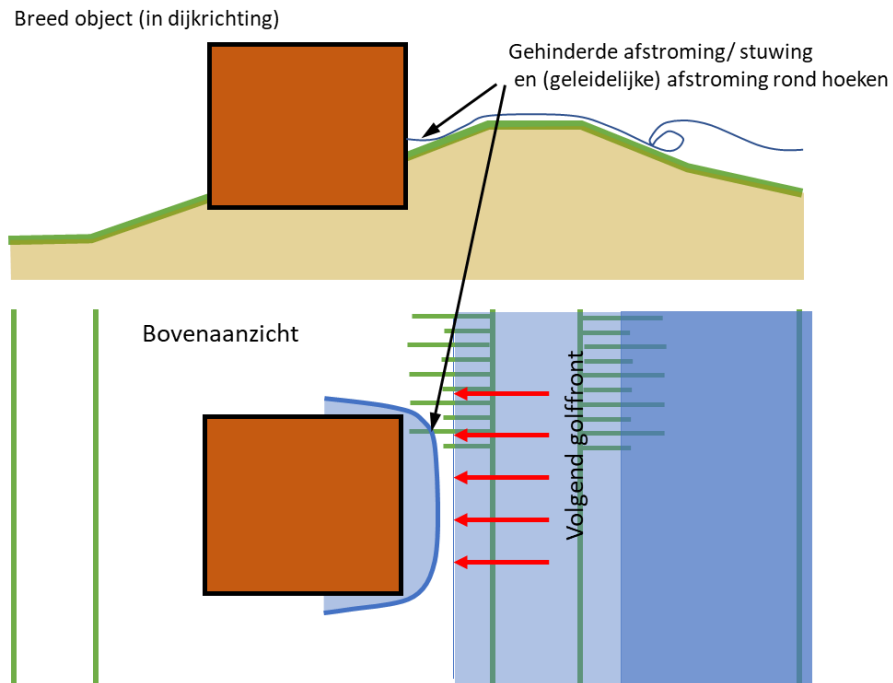
### 2.3.4 $\alpha_M$ type ii obstakels

Bij obstakels wordt er vanuit gegaan dat de obstakels zelf stabiel zijn onder golfoverslagcondities en dat golfoverslag om de obstakels heen stroomt. Indien een obstakel niet stabiel is en uit de bekleding slaat, dan wordt verwacht dat dit een gat in de bekleding achterlaat, waarmee falen van de toplaag een feit is.

Er is een indeling gemaakt naar de grootte van een obstakel in de richting loodrecht op de stroming. Het betreft kleine, middelgrote en grote obstakels, waarbij wordt gekeken naar de afmeting loodrecht op de stroming. De indeling is gemaakt op basis van 1) enkele



waarnemingen bij grootschalige golfoverslagproeven en 2) op basis van verwachte karakteristieken van stroming rondom het obstakel. De grenzen tussen de categorieën zijn naar verwachting niet strikt afhankelijk van de lengtemaat van het object maar ook van het golfoverslagdebiet en de grootte van de golfoverslagvolumes. Hoe die afhankelijkheid precies in elkaar zit is in het kader van deze studie niet uitgewerkt. De indeling op basis van karakteristieken van stroming is gemaakt op basis van expert judgment en de ervaring bij een golfoverslagproef bij Nijmegen [24] waar een 1 m breed object langs de rand van de proefstrook (vanwege symmetrie 2 m) een veranderend stromingspatroon liet zien, zoals schetsmatig weergegeven in Figuur 2.8.



Figuur 2.8 Principeschets golfoverslag bij grote objecten.

Veldwaarnemingen bij recente golfoverslagproeven in de Hedwigepolder voor het project kalk in klei, waarbij eveneens een object in de stroming is geplaatst (1,5 m breed, effectief 3 m vanwege symmetrie) laat eenzelfde beeld zien (nog geen verwijzing beschikbaar; Figuur 2.9).



Figuur 2.9 Golfoverslag met object op verschillende momenten tijdens één golfoverslagvolume (project kalk in klei; Hedwigepolder).

#### **Kleine obstakels <0,15 m in stromingsrichting**

Uit grootschalige golfoverslagproeven op grasbekledingen met relatief kleine objecten blijkt dat deze nauwelijks een significante invloed hebben op falen van de grasbekleding ( $\alpha_M \approx 1$ ). Op basis van grootschalige proefresultaten wordt in het WBI en OI2014 een karakteristieke maat van 0,15 m gehanteerd. Dit kan zowel de diameter van een ronde paal zijn of de zijde van een rechthoekige paal, loodrecht op de stroming.

#### **Middelgrote obstakels $\leq 2$ m in stromingsrichting**

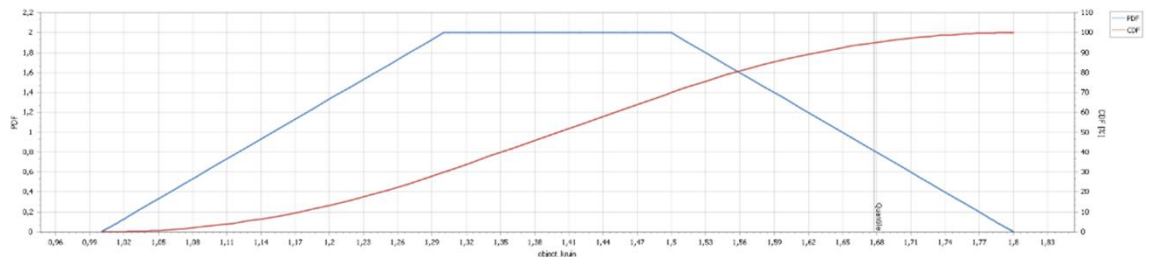
Over de invloed van middelgrote obstakels op erosie van een grasbekleding in termen van  $\alpha_M$  is heel weinig bekend. Er zijn enkele golfoverslagproeven bekend met een boom in de proefstrook en een enkele keer een paal en een voor de proef aangebracht schot loodrecht op de stroming.

Aan de voorzijde van het object treedt een drukpuls op als een overslagvolume tegen het object klappt. De bereikte druk is afhankelijk van hoe het golf front het object raakt en hoeveel lucht er in het water zit. Of dit leidt tot erosie is onder andere afhankelijk van de tijd dat deze druk aanhoudt en de ruimtelijke schaal waarover de druk optreedt. Opstaande randen in de geometrie in een 2D situatie leiden tot hoge piekdrukken [18], echter deze piekdrukken laten zich voornamelijk niet omrekenen in de binnen het erosiemodel gebruikte  $\alpha_M$ . Een schatting van piekdrukken zou in combinatie met het erosiemodel voor grasbekledingen voor golfklappen mogelijk kunnen leiden tot een karakterisering van  $\alpha_M$ . Anders dan bij golfklappen echter treedt de drukpuls telkens op dezelfde plek op, waarbij zich een spleet kan vormen waar water in blijft staan. Het proces van een eerste schade tot falen van de

toplaag zal voor objecten bij golfoverslag waarschijnlijk verschillen van golfklappen op een talud. Modelvorming op dit gebied viel buiten de scope van dit project.

In [5] wordt een grofstoffelijke theoretische onderbouwing gegeven leidend tot een range van 1,3 tot 1,7. Hierbij gaat het om objecten waar de stroming omheen gaat (o.a. bomen) en het golfoverslagvolume wegloopt, voordat een volgend golfoverslagvolume tegen het obstakel botst. Er treedt dus geen opstuwing op tegen het object, zoals weergegeven in de principeschets in Figuur 2.8.

Door de grote onzekerheden past een brede kansverdeling van  $\alpha_M$ . Er wordt uitgegaan van een trapeziumvormige verdeling zoals aangegeven in Figuur 2.8, met karakteristieke punten  $\alpha_M$  is 1 (ondergrens); 1,3; 1,5 en 1,8 (bovengrens). Dit is vergelijkbaar met de overgang type i, echter iets ongunstiger.



Figuur 2.10 Verdeling  $\alpha_M$  overgang type ii obstakels.

De invloed van de hoogte van een object boven de grasbekleding op de invloedsfactor  $\alpha_M$  is in het kader van deze studie niet nader uitgewerkt. Bij een kleine hoogte boven de grasbekleding zal de stroming er meer overheen dan omheen gaan (bv stoepranden), bij een heel hoog object gaat de stroming er volledig omheen. Karakteristiek voor dit proces is waarschijnlijk de hoogte van het object in verhouding tot de waterlaagdikte en in mindere mate de verhouding tussen de hoogte (boven het gras) en breedte (loodrecht op de stroming). De studie van Van Bergijk [18] biedt mogelijkheden om dit aspect voor 2D situaties verder uit te werken, echter dit stuk kennisontwikkeling lag buiten de scope van dit project. Binnen onderhavige studie wordt enkel onderscheid gemaakt tussen type i (overgang bekledingstype met een hoogteverschil van 0,05 à 0,1 m en type ii objecten die hoger zijn.

### Grote obstakels >2 m

Bij grotere obstakels, > 2m loodrecht op de stromingsrichting, wordt verwacht dat opstuwing zal optreden, zoals schematisch weergegeven in Figuur 2.8, en dat dit effect een significante invloed zal hebben op het faalgedrag van de grasbekleding. Een golfoverslagvolume klapt tegen het object, waarna het volume enkel langs de zijanten kan wegstromen, hetgeen enige tijd vergt. Een volgend volume wordt gedempt door het opgestuwde water dat nog niet rondom de hoeken is weggelopen. In het midden van het object zou dit effect positief kunnen werken. Echter langs de hoeken van het obstakel ontstaat een variabele stroming veroorzaakt door enerzijds het zijdelings wegstromen maar daarbij opgeteld de golfoverslag die ter plekke van de hoekpunten optreedt. Het debiet rondom de hoeken is, afhankelijk van de breedte van het object, navenant hoger dan het golfoverslagdebiet dat gemiddeld over de kruin komt.

De belastingen die hierbij optreden zijn complex van aard en er zijn nog geen ervaringen mee bij grootschalige golfoverslagproeven op grasbekledingen. Er is daarom momenteel nog geen schatting van een verdeling van  $\alpha_M$  mogelijk en deze obstakels worden daarom vooralsnog uitgesloten. Hierbij wordt opgemerkt dat objecten groter dan 2 m (loodrecht op de stroming) en omgeven door een nette aansluiting op de grasbekleding relatief zeldzaam zijn. In het algemeen gaat het om panden, waarbij er geen sprake is van een grasbekleding maar kale grond, bestrating, struiken, tuinen en dergelijke, allen vallend onder 'fragmentarische

zode'. Indien er in deze gevallen sprake is van een kleidijk dan kan in een veiligheidsbeoordeling mogelijk gebruik worden gemaakt de modellering die wordt behandeld in Hoofdstuk 4.

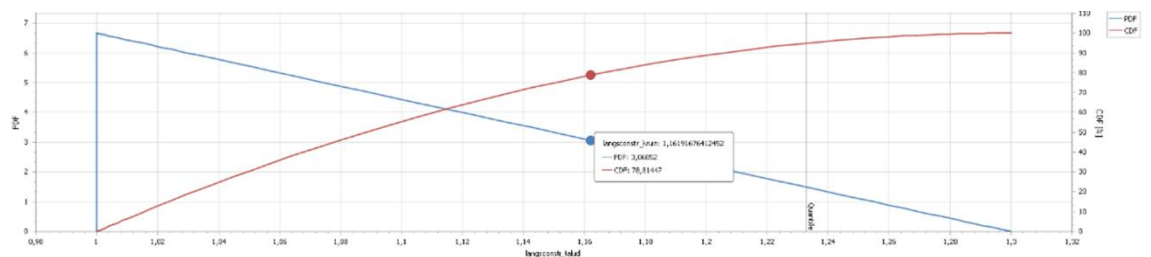
### 2.3.5 $\alpha_M$ type iii objecten parallel aan stroming

Voor objecten zoals taludtrappen en wanden loodrecht op de dijk wordt in [5] een  $\alpha_M$  van 1,0 gehanteerd, waarbij werd opgemerkt dat validatie niet goed mogelijk was op basis van de beschikbare proeven en aanbevolen werd om een nadere validatie uit te voeren. Dit laatste ook vanwege de mogelijkheid van een dwarscomponent in de stroming bij scheve golfinval.

Ook bij een stroming strikt parallel aan het object zal door de weerstand van een taludtrap of wand de stroming enigszins kunnen worden beïnvloed, mogelijk leidend tot extra turbulentie en een belastingverhoging. Hierover is echter weinig bekend. Grootschalige golfoverslagproeven en golfploopprouwen zijn enkele keren uitgevoerd op type iii objecten. Golfoverslagproeven zijn uitgevoerd op een wand van een betonnen vistrapconstructie te Nijmegen, een taludtrap op de Afsluitdijk en een taludtrap op een dijk op Tholen en een golfploopprouf is uitgevoerd op een taludtrap op Noord Beveland. Bij de wand te Nijmegen kan een  $\alpha_M$  van 1,0 verklarend zijn voor het proefresultaat in combinatie met een  $\alpha_S$  van 0,88. Bij de taludtrap op Tholen was de grasbekleding langs de trap afwezig, waardoor hier snel schade ontstond. Bij de taludtrappen op de Afsluitdijk en die op Noord Beveland waren het de trap treden zelf die bezweken, niet de grasbekleding.

Bij alle golfoverslag en golfploopprouwen zijn schotten langs de proefstrook geplaatst. De schotten worden op de grasbekleding gezet, waardoor deze niet wordt onderbroken ( $\alpha_S = 1$ ). Van de inmiddels ruim 30 beproefde grasbekledingen is schade en falen zelden opgetreden door erosie langs deze schotten. Dit gebeurde voor zover bekend een enkele keer te Nijmegen.

Vanwege de onzekerheid over  $\alpha_M$  bij relatief ruwe taludtrappen en de invloed hiervan op de erosieve belasting wordt uitgegaan van een driehoekige verdeling van 1 (minimum) tot 1,3 (maximum) (Figuur 2.11).



Figuur 2.11 Verdeling  $\alpha_M$  overgang type iii overgangen.

Type iii overgangen zijn niet dominant ten opzichte van type i en type ii overgangen. Alleen als er geen type i of ii overgangen en objecten in het dijkvak aanwezig zijn dan is deze overgang van belang. Uit de aangeleverde beelden (Hoofdstuk 3) komt dit echter niet of nauwelijks voor.

### 2.3.6 $\alpha_M$ type iv geometrische overgangen Talud - horizontaal

Een geometrische overgang betreft de overgang tussen een talud en een berm of het achterland. De stroming wordt door de grasbekleding van richting veranderd, hetgeen leidt tot een aanvullende impulsuitwisseling ten opzichte van enkel het gewicht van de waterlaag, hetgeen tot een extra belasting leidt.

In [5] wordt een formule gegeven voor het schatten van de invloed van deze overgang:

$$\alpha_M = 1 + \sin\left(\frac{1}{2}\theta\right).$$

Waarin  $\theta$  de hoek is tussen het talud en de berm of het achterland. Voor een helling van 1:2; 1:3 en 1:4 leidt dit tot een geschatte  $\alpha_M$  van respectievelijk 1,23; 1,16 en 1,12. Validatie met golfverslagproeven leidt in dit rapport tot een waarde van 1,0 tot 1,2 wat de theorie bevestigt. Wel werd aanbevolen meer onderzoek te doen naar deze overgang. De afleiding van de formule staat in Bijlage D van [25].

Door Warmink [14] is eveneens gekeken naar de invloed van een geometrische overgang van het talud naar een berm of het achterland. Er worden zeven proefresultaten met de golfverslagsimulator beschouwd, waarbij volgens verschillende methoden de versnelling op het talud wordt berekend, leidend tot verschillende schattingen van de  $U_c$  van de grasbekleding en ook verschillende schattingen van de  $\alpha_M$  voor deze overgangen. Deze exercitie leidt tot waarden die aanzienlijk hoger zijn dan volgens [5], in de orde van 1,3 à 1,6 voor hellingen van 1:3 en zelfs 1,5 à 1,8 voor hellingen van 1:2,3.

In het kader van deze studie zijn de golfverslagproeven bij Delfzijl, Afsluitdijk, Boonweg, Kattendijke en St. Philipsland nagerekend. Het terugrekenen van de invloedfactor  $\alpha_M$  wordt gecompliceerd door de vaak onzekere  $U_c$  van de grasbekleding. Deze onzekerheid komt voort uit onzekerheid rondom de frontsnelheid, zoals toegelicht in [14] maar ook door niet falen van de grasbekleding binnen de maximale proefduur. De resultaten van de analyse zijn samengevat in Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Samenvatting resultaten analyse teruggerekende  $\alpha_M$  voor overgang type iv.

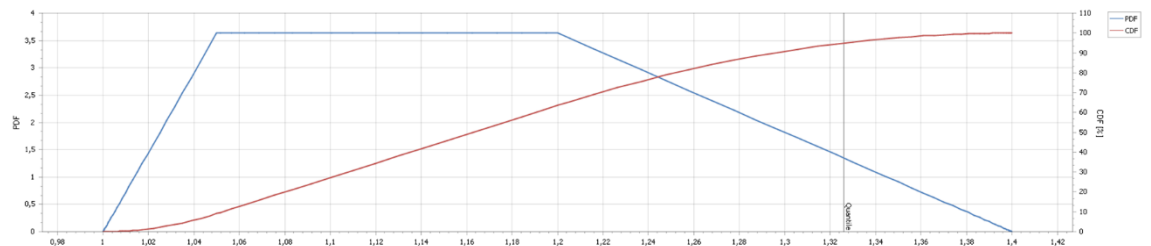
Proef	Criterium	$\alpha_M$ (-)
Delfzijl	Geen falen talud, geen falen teen	1 - 1,15
Boonweg 1	Geen schade talud, falen teen	1 - 1,3
Boonweg 2	Geen schade talud, schade teen	1 - 1,3
Boonweg 3	Falen talud, geen schade teen	1
Boonweg 4	Falen talud, geen schade teen	1
Afsluitdijk 1	Geen falen talud, geen falen teen	1 - 1,15
Afsluitdijk 3 (langs trap)	Geen falen talud, falen teen	1,3
St. Philipsland	Geen falen talud, falen teen	1,15
Kattendijke 1	Geen falen talud, geen falen teen	1
Kattendijke 2	Geen falen talud, falen teen	1,25

In de studie van Warmink [14] leidt de golfverslagproef bij Kattendijk tot het meest ongunstige resultaat van  $\alpha_M$ , terwijl in het kader van deze studie 1 à 1,25 wordt gevonden. Dit wordt verklaard doordat in [14] falen van de halfverharding op de berm is aangenomen als falen van de teen. Het horizontale stukje grasbekleding tussen deze halfverharding en het talud faalt echter niet als gevolg van de stroming op de overgang van talud naar berm maar faalt uiteindelijk omdat het in het gat valt dat is ontstaan door het wegspoelen van de halfverharding.

Ook voor de Afsluitdijk wordt in [14] tot ongunstiger waarden van  $\alpha_M$  gekomen dan aangegeven in Tabel 2.1. Dit heeft enerzijds te maken met onzekerheid over de optredende frontsnelheden maar ook en mogelijk in sterkere mate met het gehanteerde criterium in het erosiemodel. Op de Afsluitdijk was bij strook 1 al vrij snel sprake van een eerste schade aan

de teen, bij 2 uur 10 l/s/m. Na de proef met 30 l/s/m was sprake van meerdere kale plekken bij de teen. Echter aan het einde van de proef bij 75 l/s/m was nog steeds geen sprake van falen van de toplaag. Niet op het talud en niet bij de teen. Indien wordt uitgegaan van het criterium van een eerste schade aan de teen ( $D=1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ), bij een  $U_c$  op basis van niet falen van de bekleding na de hele proefduur, dan volgt een  $\alpha_M$  van ruim 2. Indien wordt uitgegaan van het criterium meerdere kale plekken ( $D=4000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ) en niet falen van het talud, dan volgt een  $\alpha_M$  van circa 1,5. Indien wordt uitgegaan van niet falen van talud en niet falen van de teen na de volle proefduur, dan is een waarde van 1 à 1,15 verklarend voor het proefresultaat. Omdat het erosiemodel voor zover mogelijk gekalibreerd is op falen wordt in deze studie de voorkeur gegeven aan dat criterium (zie ook Paragraaf 2.1).

De waarde van 1 à 1,2 uit [5] lijkt gezien de aanvullende nagerekende proefresultaten soms aan de optimistische kant, terwijl de waarden uit [14] juist aan de pessimistische kant zitten. In een enkele gevallen is dit ook verklaarbaar. Voor de verdere analyse is gekozen voor een trapeziumverdeling met de karakteristieke punten 1 (ondergrens), 1,05, 1,2 en 1,4 (bovengrens) (Figuur 2.12).



Figuur 2.12 Verdeling  $\alpha_M$  overgang type iv overgangen.

Deze overgang type iv zal is niet dominant ten opzichte van obstakels in de stroming (type ii) en overgangen in bekledingtypes (type i) indien deze op het talud aanwezig zijn. Daarbij komt dat de sterktereductiefactor  $\alpha_S$  voor deze overgangen 1 is in plaats van 0,9 bij type i en ii overgangen en objecten. De overgang kan alleen dominant zijn bij groene dijken zonder overgangen of objecten, of waar alleen op de kruin overgangen en objecten aanwezig zijn.

### Kruin - talud

Bij steile taluds en een relatief scherpe overgang van de kruin naar het talud kan de stroming loslaten en lager op het talud neerplonzen. Dit leidt op die plek tot een extra hoge erosieve belasting. Dit mechanisme is waargenomen bij een golfoverslagproef in België bij een gemiddelde taludhelling van ongeveer 1:1,8 met een extra steil taluddeel bovenaan het talud tot bijna 1:1 [16]. De eerste schade en falen trad hier ook op bovenaan het talud, niet onderaan bij de teen.



Figuur 2.13 Golfoverslagproef op steil talud en schade bovenaan bij de kruin [16].

Ook bij numerieke simulaties van golfoverslag is dit fenomeen waargenomen bij zeer grote golven en relatief steile taluds. Bij golfoverslagproeven op minder steile taluds (circa 1:2,3 en flauwer) is het loslaten van de stroming en neerplonzen op het talud niet waargenomen. Wel zijn enkele keren, vooral bij grote volumes, een soort golfbewegingen in de stroming waargenomen. De stroming liet in die gevallen niet daadwerkelijk los maar neigde er mogelijk wel naar.

Gevoelig voor het loslaten en neerplonzen van de stroming zijn combinaties van grote golfoverslagvolumes (bij hoge golven) en steile taluds met een scherpe overgang. Omdat hoge golven met name optreden bij zee- en meerdijken en relatief steile taluds vooral langs rivierdijken voorkomen wordt verondersteld dat deze combinatie zeldzaam is en daarom is deze niet meegenomen in de analyse. Impliciet wordt ervan uitgegaan dat de overgang van talud naar berm of achterland in het algemeen maatgevend zal zijn boven de overgang van kruin naar talud. Mogelijk dat dit niet voor alle dijken in Nederland geldt, echter binnen de mogelijkheden van onderhavig project kon dit niet in detail worden uitgewerkt. Meer informatie over dit fenomeen is te vinden in het afstudeerwerk van Ponsioen [15].

## 2.4 Samenvatting en discussie

De hoeveelheid en verscheidenheid aan overgangen en objecten op dijken is enorm. Een veiligheidsbeoordeling per individuele overgang of object is momenteel ondoenlijk, waardoor binnen dit project is gekozen voor een (vergaande) categorisering van typen overgangen en objecten en categorieën dijken (zie volgende Hoofdstuk 3). In de vorige studie naar de invloed van overgangen en objecten [17] is de enorme hoeveelheid en verscheidenheid aan overgangen en objecten vereenvoudigd tot één combinatie van invloedsfactoren waarvan verondersteld is dat deze gelden als 'worst case'. Gekozen werd voor  $\alpha_M=1,8$ ;  $\alpha_S=0,9$ . Voor de versnellingsfactor werd gekozen voor  $\alpha_a=1,4$  voor taluds en  $\alpha_a=1,0$  voor de kruin.

In deze vervolgstudie is gekozen voor meer differentiatie in de waarde van  $\alpha_M$ . Op basis van theorie met betrekking tot stroming over en om overgangen en obstakels en ervaringen bij grootschalige golfoverslag- en golfploopproeven zijn kansverdelingen geschat van  $\alpha_M$  voor vier karakteristieke typen overgangen. Daarbij is ook de onzekerheid in  $\alpha_M$  ingeschat, wat een verbetering is ten opzichte van de voorgaande studie waarbij enkel werd uitgegaan van een 'worst case' waarde van 1,8. Hierbij moet worden opgemerkt dat onzekerheden omtrent de factor heeft geleid tot brede kansverdelingen van  $\alpha_M$ . Ook wordt in tegenstelling tot de

vorige studie rekening gehouden met de hoeveelheid van de verschillende types overgangen en objecten die in een dijkvak aanwezig zijn (Hoofdstuk 3).

Hoewel een verfijning is uitgevoerd ten opzichte van de vorige studie, blijft de gemaakte vereenvoudiging groot. Verschillende dijken die waarschijnlijk een verschillend risico op erosie hebben krijgen hierdoor toch te maken met dezelfde (verdeling van) invloedsfactoren. Er wordt bijvoorbeeld geen onderscheid gemaakt tussen een kort en flauw talud en een lang en steil talud, beide worden beoordeeld met een versnellingsfactor van 1,4. Een boom met een diameter van 0,2 m bovenaan het talud wordt beschreven met dezelfde verdeling van  $\alpha_M$  en  $\alpha_a$  als een betonnen bak van 1,5 m onderaan het talud, terwijl de verwachting is dat die laatste erosiegevoeliger zal zijn. Hoewel het niet met zekerheid is te zeggen is de kans groot dat de boom aan de lage kant van de range van  $\alpha_M \cdot \alpha_a^2$  zal zitten en de betonnen bak meer aan de bovenkant van deze range. Om de beoordeling behapbaar te houden is binnen deze studie echter gekozen voor een beperkte mate van differentiatie, waarbij de beoordeling nog relatief eenvoudig is. Verdere differentiatie en verfijning is uiteraard mogelijk voor specifieke gevallen. De complexiteit van de beoordeling neemt echter snel toe naarmate er meer gedifferentieerd wordt naar vorm, afmeting, plek op het talud of kruin, verdeling van gulfvolumes en aanvangssnelheden op de buitenkruinlijn et cetera.

Een belangrijke onzekerheid in de beoordeling van grasbekledingen met overgangen en objecten zit waarschijnlijk ook in de toepassingsvoorwaarden. Twee belangrijke zijn 1) dat de grasbekleding netjes aansluit op de overgang of het object en 2) dat de overgang of het object zelf stabiel is onder golfoverslagcondities. Beide zijn in de huidige praktijk vaak niet op orde of niet aantoonbaar. Wegbermen worden kapotgereden, grasbekledingen rondom bankjes en langs taludtrappen zijn regelmatig beschadigd, waardoor geen sprake is van een grasbekleding die tot aan de overgang of het object op volle sterkte is. Het tweede aspect speelt vooral bij dijken die worden aangevallen door hoge golven die met veel geweld over de dijk spoelen. Twee van de drie taludtrappen bezweken bijvoorbeeld eerder dan de grasbekleding die er langs lag. Het object zelf vormt dan de zwakke plek, niet de grasbekleding hier omheen. Of en bij welke belasting een object bezwijkt door golfoverslag wordt nog niet beoordeeld en voor zover bekend ook niet op ontworpen. Inzicht in het belang van een nette overgang en/of een stabiel object kan worden benaderd door een berekening te maken met de aanbevolen factoren uit dit rapport en een deterministisch golfoverslagdebiet waarbij geen eisen worden gesteld aan de bekleding, zoals bijvoorbeeld 0,1 l/s per m uit het OI2014. Voor kleidijken kan deze benadering worden aangescherpt met de modellering zoals wordt behandeld in Hoofdstuk 4.



## 3 Categorisering dijkvakken en invloedsfactoren per categorie

### 3.1 Inleiding

In hoofdstuk 2 werd ingegaan op het erosiemodel voor grasbekledingen bij golfoverslag en de hierbij behorende invloedsfactoren voor overgangen en objecten. Er is een grofstoffelijke indeling gemaakt in typen overgangen en objecten en voor elk type is een kwantificering gegeven, als determinist ( $\alpha_a$  en  $\alpha_s$ ) of als kansverdeling ( $\alpha_M$ ). Deze invloedsfactoren horen bij een beoordeling van één overgang of object.

In dit hoofdstuk wordt de stap gemaakt van een  $\alpha_M$  voor één overgang of object naar een karakteristieke  $\alpha_M$  voor een heel dijkvak met meerdere overgangen en objecten op kruin en/of talud. De verschillende  $\alpha_M$  per object of overgang in een dijkvak worden naar gelang de aanwezigheid hiervan in het dijkvak, gecombineerd tot een kansverdeling van  $\alpha_M$  die representatief is voor de beoordeling van het hele dijkvak. Deze stap wordt gedaan vanwege de grote verscheidenheid en hoeveelheid overgangen en objecten op dijken, waardoor het ondoenlijk is om deze individueel te beoordelen [1].

### 3.2 Aanpak

Voor het maken van een categorisering van dijken op basis van de aanwezigheid van overgangen en objecten zijn de volgende criteria van belang:

- De categorieën zijn onderscheidend in de verwachte erosiebestendigheid. De representatieve kansverdelingen van de invloedsfactoren moeten voldoende van elkaar verschillen, anders kunnen de categorieën worden samengevoegd.
- De categorieën moeten praktisch toepasbaar zijn. Dijkbeheerders moeten met voldoende zekerheid een dijkvak kunnen indelen in een categorie op basis van de kenmerken hiervan.

Om te komen tot een categorisering is de hulp ingeschakeld van de expertgroep grasbekledingen. De expertgroep bestaat uit dijkbeheerders vanuit waterschappen aangevuld met twee vertegenwoordigers vanuit Rijkswaterstaat. Op 8 april 2021 is bij de expertgroep grasbekledingen een presentatie gegeven over dit project. De groep is gevraagd beeldmateriaal aan te leveren wat karakteristiek is voor de dijken in hun beheergebied, inclusief alle overgangen en objecten die hier bij horen. Dit heeft geresulteerd in de aanlevering van 210 foto's door Waterschap Rivierenland, Waterschap Aa en Maas, Waterschap Vallei en Veluwe en van Rijkswaterstaat. Op de 210 foto's van 68 dijkvakken, soms met details van de aanwezige overgangen en objecten, soms alleen het beeld van de dijk.

Van de 68 dijkvakken is op basis van het beeld op de foto's, aangevuld met informatie vanuit Google Maps een schatting gemaakt van een karakteristieke dijkvaklengte en is een schatting gemaakt van de aanwezige hoeveelheid overgangen en objecten in het dijkvak. Hierbij is onderscheid gemaakt naar de vier typen overgangen en objecten (Paragraaf 2.2) en naar de locatie in het profiel (kruin of talud). Het buitentalud is buiten beschouwing gelaten.

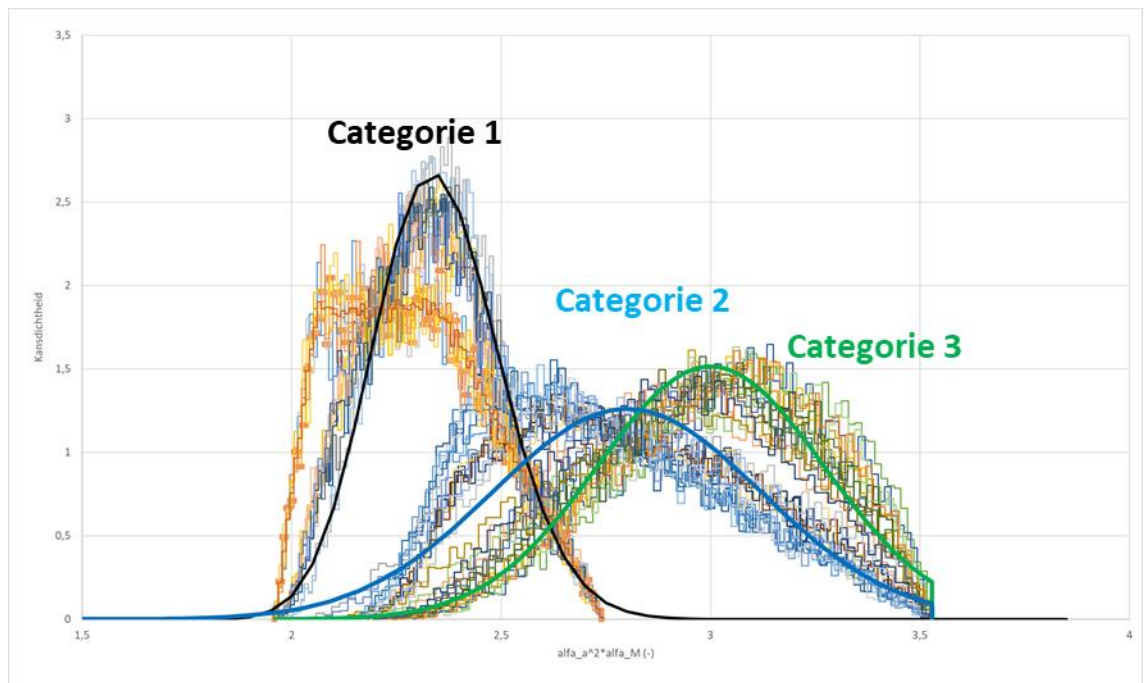
De invloedsfactoren voor overgangen en objecten bestaan uit  $\alpha_a$ ,  $\alpha_M$  en  $\alpha_s$  (Paragraaf 2.1). Hierbij werkt de combinatie van  $\alpha_M * \alpha_a^2$  op de belasting en  $\alpha_s$  op de sterkte. Voor de leesbaarheid wordt  $\alpha_M * \alpha_a^2$  ook wel geschreven als  $f_0$ . Omdat  $\alpha_s$  relatief laag is en een geringe spreiding heeft ten opzichte van  $\alpha_M$  (Paragraaf 2.3) is  $\alpha_s$  niet als stochast meegenomen in de verdere analyse.

Voor elk van de 68 dijkvakken is een lijst opgesteld met aantal, type (i, ii, iii, iv) en locatie (kruin/ talud) van de in het dijkvak aanwezige overgangen en objecten. Met behulp van de Probabilistic Toolkit versie 2.2.5.21-50 is middels een Monte Carlo simulatie voor elk van de 68 dijkvakken gekeken naar de verdeling van de meest ongunstige waarde van de factor  $\alpha_a \cdot \alpha_M^2$  binnen het dijkvak. Hiertoe is 10.000 keer een trekking gedaan uit de kansverdeling van elk van de in het dijkvak aanwezige overgangen en/of objecten en is de hoogste waarde van  $f_0$  opgeslagen. Deze hoogste, meest ongunstige, waarden van  $\alpha_a \cdot \alpha_M^2$  zijn uitgezet in een histogram (Figuur 3.1). Voor obstakels en overgangen die op elkaar lijken, bijvoorbeeld een rij lantaarnpalen of een rij gelijke bomen wordt vanwege de gelijkvormigheid en belasting een gecorreleerde faalkans verwacht. Daarom is voor rijen van gelijke objecten binnen een dijkvak een correlatiefactor ingevoerd van 0,8. Deze waarde betreft expert judgment en is niet onderzocht. Verder is uitgegaan van niet gecorreleerde invloedsfactoren.

De aangehouden 10.000 trekkingen bleken voldoende, het verhogen van het aantal trekkingen naar 100.000 gaf geen wezenlijk ander resultaat.

### 3.3 Resultaat

De 10.000 resultaten van de maximale waarde van  $f_0$  per dijk zijn in histogrammen gezet en weergegeven in Figuur 3.1.



Figuur 3.1 Histogrammen maximale waarden  $\alpha_M \cdot \alpha_a^2 (=f_0)$  per dijkvak (68x) en hierop gefitte kansverdelingen per categorie dijk.

De histogrammen vallen grofweg uiteen in drie groepen. Twee groepen hebben een maximale waarde van  $\alpha_M \cdot \alpha_a^2$  van circa 3,5, wat gelijk is aan  $1,8 \cdot 1,4^2$ , afkomstig van overgangen en objecten type i en/of type ii met een maximale  $\alpha_M$  gelijk aan 1,8 op het talud ( $\alpha_a=1,4$ ). Er kunnen in deze dijkvakken andere overgangen en objecten type iii en iv aanwezig zijn op het talud en/of op de kruin, echter deze zijn niet dominant voor de maximale waarde binnen het dijkvak. De tweedeling, gekarakteriseerd door de hierdoorheen gefitte groene en blauwe lijnen in Figuur 3.1, komt voort uit het al dan niet aanwezig zijn van objecten in het talud. De histogrammen gekarakteriseerd door de blauwe verdeling bevatten wel (weg)overgangen op het binnentalud (type i) maar geen objecten (type ii).

De histogrammen gekarakteriseerd door de groene verdeling bevatten in elk geval objecten (type ii) op het binnentalud, al dan niet gecombineerd met (weg)overgangen.

Opgemerkt moet worden dat de fit voor de blauwe verdeling (categorie 2) nogal verschilt van de gepresenteerde data. Dit komt omdat de data eerst heel steil loopt en daarna erg flauw. Dit zou goed kunnen worden beschreven met een Gumbel verdeling. Met Hydra-Ring zijn echter alleen normale, getrunceerd normale, lognormale of Rayleigh verdelingen beschikbaar voor het beschrijven van variabelen in het sterkte model. Omdat  $\alpha_M \cdot \alpha_a^2$  van invloed is op de belasting van de grasmatt, ligt de focus vooral op de rechterstaart van de verdeling. Deze rechterstaart kan worden beschreven met een normale of lognormale verdeling. Omdat categorie 2 een maximale waarde heeft, is ervoor gekozen om de fit te maken met een getrunceerde normale verdeling (getrunceerde lognormale verdeling is niet mogelijk). Indien bij toepassing in de praktijk blijkt dat de waarde in het ontwerp punt dicht bij de 50% overschreden waarde ligt (waar de fit voor categorie 2 het slechts is), dan kan worden overwogen om een passender kansverdeling (bijvoorbeeld Gumbel) te implementeren in Hydra-Ring.

Voor dijken met enkel overgangen en objecten op de kruin van de dijk gelden de histogrammen die eindigen bij een waarde van  $\alpha_a^2 \cdot \alpha_M$  van circa 2,7 (-). Hierin is de altijd aanwezige geometrische overgang van talud naar achterland dominant ( $\alpha_M$  is maximaal 1,4). De overgangen en objecten op de kruin van de dijk zijn niet verantwoordelijk voor de rechter staart van het histogram. De oranje/gele histogrammen links in Figuur 3.1 zijn die voor een groene dijk, zonder overgangen en objecten. De hogere histogrammen, waardoor een lognormale verdeling is gefit (zwarte lijn in Figuur 3.1) bevatten naast de altijd aanwezige geometrische overgang van talud naar achterland ook overgangen en objecten op de kruin maar dus niet op het talud.

De beschrijving van de drie categorieën dijken en de gefitte kansverdelingen van  $\alpha_M \cdot \alpha_a^2$  staan in Tabel 3.1. Naast de drie categorieën dijken met een grasbekleding wordt een vierde categorie geïntroduceerd waarop kale grond aanwezig is. Voor de beschrijving van het faalgedrag wordt hiervoor verwezen naar hoofdstuk 4.

Tabel 3.1 Kansverdelingen  $\alpha_M \cdot \alpha_a^2$  voor verschillende categorieën dijken met overgangen en objecten.

Categorie	Omschrijving	Verdeling $\alpha_a^2 \cdot \alpha_M$	Parameters
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geen objecten &gt; 0,15 m dan wel wegovertgangen op het binnentalud. Alleen taludtrappen zijn toegestaan.</li> <li>Overgangen en objecten op de kruin zijn toegestaan.</li> <li>Geen kale grond/ fragmentarische zode.</li> </ul>	Lognormaal (zwarte lijn Figuur 3.1)	mu 2,35 sigma 0,15
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geen objecten &gt; 0,15 m op het binnentalud. Alleen taludtrappen en wegovertgangen zijn toegestaan.</li> <li>Overgangen en objecten op de kruin zijn toegestaan.</li> <li>Geen kale grond/ fragmentarische zode.</li> </ul>	Normaal, truncated maximum 3,528 (blauwe lijn Figuur 3.1)	mu 2,8 sigma 0,32
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Objecten en overgangen op de kruin en het binnentalud zijn toegestaan.</li> <li>Geen kale grond/ fragmentarische zode.</li> </ul>	Normaal truncated maximum 3,528 (groene lijn Figuur 3.1)	mu 3,0 sigma 0,27
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kale grond/ fragmentarische zode aanwezig.</li> <li>Kleidijk.</li> </ul>	Kansverdeling $q_c$ Lognormaal	Zie Hoofdstuk 4

De gegeven kansverdelingen per categorie dijk kunnen worden gebruikt bij een veiligheidsbeoordeling of een dijkontwerp bij directe toepassing van de cumulatieve overbelastingmethode. Hiervoor is via het Adviesteam Dijkontwerp een tool beschikbaar. De kansverdelingen zijn tevens gebruikt bij de bepaling van de lengte-effectfactoren voor grasbekledingen met overgangen en objecten (zie Hoofdstuk 5).

## 4 Sterkte kleikern

### 4.1 Inleiding

Een aparte categorie dijken (4 in Tabel 3.1) is die zonder noemenswaardige grasbekleding. De bekleding kan, al dan niet gedeeltelijk, bestaan uit tuintjes, struiken en ruigtebegroeiing. Deze begroeiing valt onder de categorie fragmentarische zode. Op een groot aantal van de aangeleverde foto's vanuit de expertgroep grasbekledingen is lintbebouwing langs rivierdijken te zien, waarbij rondom de panden dergelijke tuinen aanwezig zijn. Bekend is dat een grasbekleding aanzienlijk beter bestand is tegen erosie dan kale grond. Het is echter niet zo dat bij heel kleine golfoverslaggebieden over kale grond direct sprake is van een overstroming.

In dit hoofdstuk wordt bestaande kennis over het erosieproces van kale grond bij overloop en golfoverslag samengevat en wordt op basis hiervan een kansverdeling van het kritisch golfoverslaggebied voorgesteld. De onzekerheden die er zijn over het proces van erosie van kale grond wordt in rekening gebracht door grote bandbreedtes en enkele conservatieve aannames.

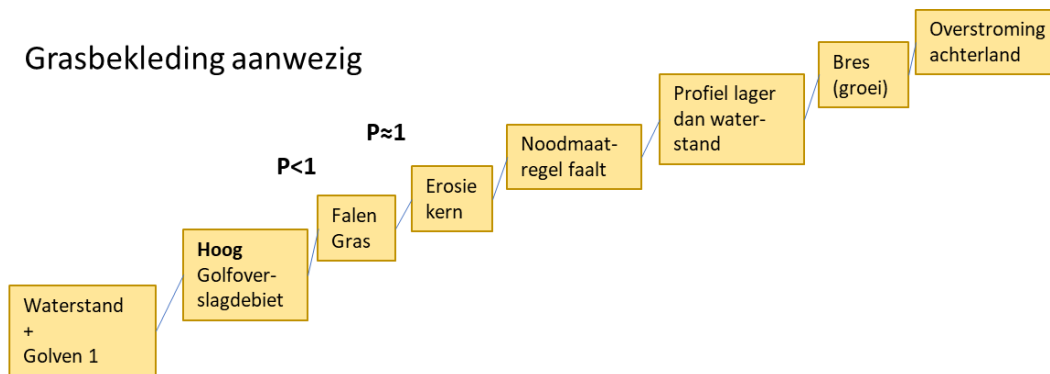
Er wordt enkel gekeken naar kleidijken. De gebruikte grofstoffelijke erosiemodellering is niet geschikt voor zanddijken en zanddijken met een kleibekleding. Overigens wordt niet verwacht dat dijken met een zandkern veel weerstand bieden tegen erosie door golfoverslag bij een gefaalde of afwezige grasbekleding.

Er is tevens geen rekening gehouden met panden of grote objecten die op de kruin of het binnentalud staan, waarbij rondom de hoeken, net naast het object, een hogere belasting en daardoor een snellere ontgronding kan optreden. Voor panden in de binnenteen of op een aanaarding aan de dijk is de modellering waarschijnlijk wel passend, echter dit zal van geval tot geval moeten worden bekeken. Voor panden op het talud zou schattenderwijs kunnen worden gekeken naar de belastingverhoging. Hiervoor is in het kader van deze studie echter nog geen methode ontwikkeld.

### 4.2 Faalbeschrijving

Erosie van dijken waar geen grasbekleding van betekenis aanwezig is gaat naar verwachting veel sneller dan bij dijken met een grasbekleding. Aangenomen wordt dat falen van een dijk met een grasbekleding, ook al zijn er wel overgangen en objecten aanwezig, alleen kan optreden indien er een relatief hoog golfoverslaggebied over de dijk slaat. Verwacht wordt dat indien de grasbekleding faalt als gevolg van overbelasting van het gras, het golfoverslaggebied zodanig hoog is dat erosie van de onderliggende dijk kern relatief snel zal gaan. Vooral nog wordt er binnen het kader van deze studie vanuit gegaan dat de kans 1 is. Dit is geïllustreerd door het faalpad in Figuur 4.1.

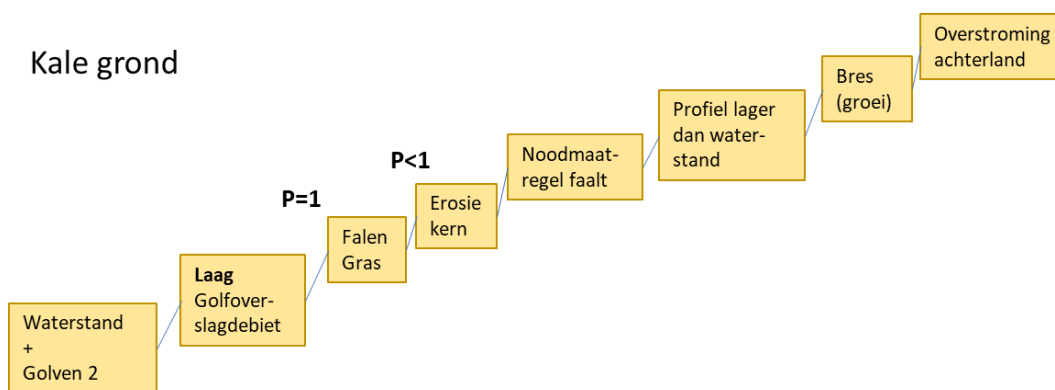
## Grasbekleding aanwezig



Figuur 4.1 Faalpad bij initieel mechanisme falen van de grasbekleding door golfoverslag.

Een andere situatie treedt op als er geen grasbekleding aanwezig is. In dat geval vereenvoudigt het faalpad zoals aangegeven in Figuur 4.2, waarbij de faalkans van de grasbekleding op 1 is gezet (deze is al afwezig). Bij lagere golfoverslagdebieten kan de kleikern van de dijk echter alsnog voorkomen dat de reeks aan gebeurtenissen leidt tot een overstroming.

## Kale grond



Figuur 4.2 Faalpad bij dijk zonder grasbekleding ( $P_{\text{falen gras}} = 1$ ).

In het kader van deze studie werd er vanuit gegaan dat de gezamenlijke kans op het falen van de grasbekleding, indien deze aanwezig is en de kans op erosie van de dijk kern, gedomineerd wordt door de faalkans van de grasbekleding. Alleen in het geval waarin de grasbekleding afwezig is, dan wordt deze kans gedomineerd door de kans op erosie van de kern. In het laatste geval zal dit optreden bij veel lagere golfoverslagdebieten dan in het eerste geval<sup>1</sup>.

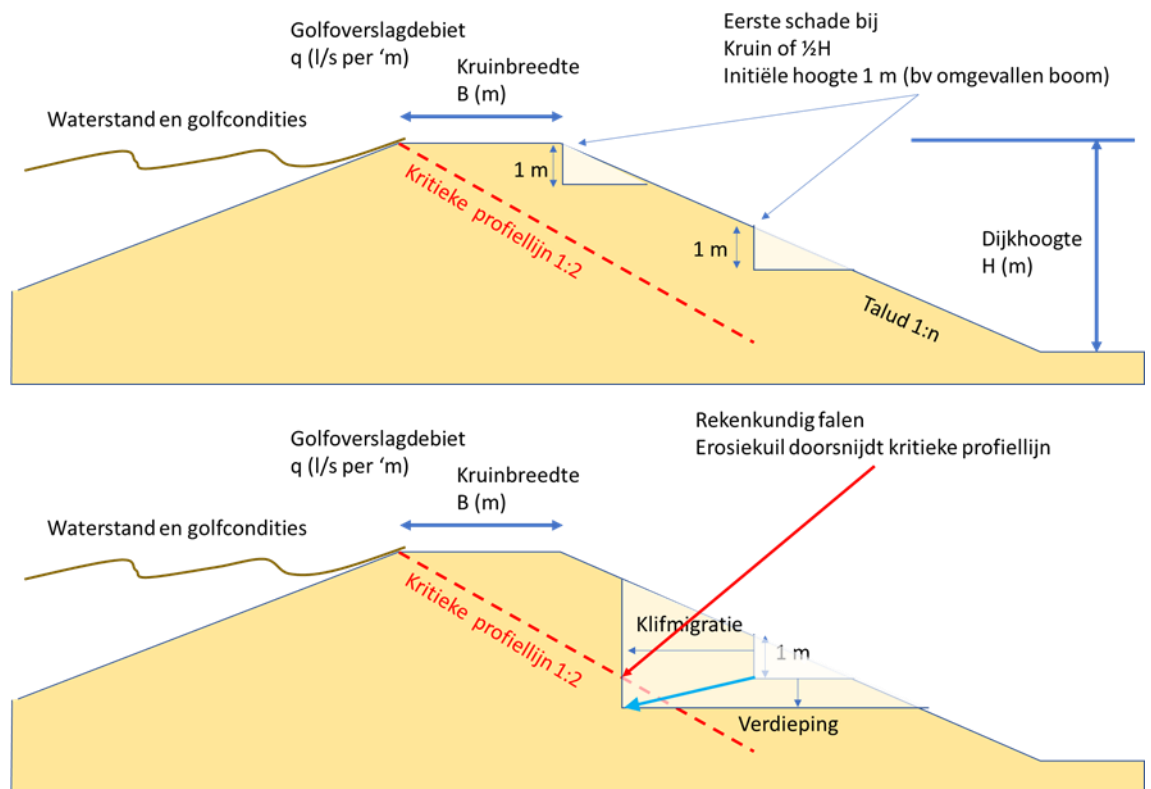
### 4.3 Modelling en uitgangspunten

Voor het modelleren van erosie van de kleikern is gebruik gemaakt van [19]. Ergens op het talud kan een erosiekuil ontstaan. Door de kuil wordt de stroming plaatselijk geconcentreerd leidend tot een hogere schuifspanning en verdieping van de kuil. Aan de bovenstroomse zijde van de kuil ontstaat een steile klif, welke stroomopwaarts kan migreren. De grond die vanaf het klif in de kuil stort wordt met de stroming afgevoerd richting de teen van de dijk en het achterland. Dit proces tast het dijkprofiel aan en kan leiden tot een bres.

<sup>1</sup> Deze aanname bij aanvang van het project bleek niet juist. Bij dijken met een kleikern blijkt de berekende sterkte van de kleikern achteraf niet klein ten opzichte van die van een grasbekleding met overgangen en objecten, maar van gelijke orde van grote of groter. Dit heeft ook gevolgen voor de bepaling van de lengte-effectfactor (zie Hoofdstuk 5).

Binnen het kader van deze studie wordt ervan uitgegaan dat er ergens op het talud aan het begin van een stormconditie met golfoverslag een kuil aanwezig is of ontstaat met een insteek van 1 m diep (Figuur 4.3). Dit kan door het uit de grond slaan van hekwerk, palen, bomen (al dan niet door windworp), taludtrappen, bebouwing of het snel eroderen van de bovenste grondlaag die vanwege bodemstructuur vormende processen gescheurd en relatief los is. Uitgegaan is van twee scenario's, een eerste kuil ter plaatse van de binnenkruinlijn en halverwege het talud. Verwacht wordt dat dit uitgangspunt aan de conservatieve kant is.

Voordat het verticale klif in stroomopwaartse richting migreert en het buitenwater bereikt treedt de situatie op waarbij het dijkprofiel met verticaal klif aan de binnenzijde heel smal wordt. Het is niet ondenkbeeldig dat dit laatste stukje dijkprofiel afschuift of omver wordt geduwd door het verval dat hier over staat. Daarom is in deze studie een faaldefinitie gehanteerd waarbij rekenkundig falen optreedt op het moment dat de bodem van de erosiekuil een denkbeeldige lijn van 1:2 vanaf de buitenkruinlijn doorsnijdt (Figuur 4.3).



Figuur 4.3 Schematische weergave van een dwarsprofiel van de dijk, met kenmerkende afmetingen en definities.

Voor het modelleren van het erosieproces wordt gebruik gemaakt van het kliferosiemodel, zoals beschreven in [19] en toegepast bij golfoverslagcondities in [20]. De verdieping van de erosiekuil per tijdseenheid  $d\varepsilon/dt$  (m/s) wordt berekend met de formule:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = k_d(\tau_e - \tau_c)$$

waarin  $k_d$  ( $\text{ms}^{-1}\text{Pa}^{-1}$ ) de erosiesnelheid beschrijft,  $\tau_e$  (Pa) de effectieve schuifspanning en  $\tau_c$  (Pa) de grenswaarde van de schuifspanning. De parameters  $k_d$  en de  $\tau_c$  zijn eigenschappen van de grond en  $\tau_e$  is de hydraulische belasting door golfoverslag.

Migratie van de insteek van de erosiekuil (klif)  $dX / dt$  (m/s) wordt berekend met:

$$\frac{dX}{dt} = C(A - A_0) \text{ met } A = (qH)^{1/3}$$

Waarin C ( $s^{-2/3}$ ) de erosiesnelheid beschrijft, A ( $ms^{-1/3}$ ) de belasting parameter met daarin q het debiet ( $m^3/s$ ) en H de hoogte van het klif.  $A_0$  ( $ms^{-1/3}$ ) is de drempelwaarde van de belasting waaronder er geen migratie van het klif optreedt.

De formules bevatten een drempelwaardeparameter en een erosiesnelheidsparameter. In het kader van onderzoek naar reststerkte van de dijk na macro-instabiliteit bij golfoverslag is gekeken naar de waarden van deze parameter voor klei [20]. Hierbij is gebruik gemaakt van de relaties tussen grondeigenschappen en erosieparameters die worden gegeven in [19] en is een golfoverslagproef 'Delfzijl' en een overloopproof op klei 'Bergambacht' nagerekend. De correlaties uit [19] zijn bedoeld voor de berekening van erosie bij overloopsituaties van aarden overlopen en niet toegespitst op golfoverslag van dijken. Het narekenen van de twee proeven op Nederlandse kleidijken gaf dan ook parameters die buiten de range lagen volgens [19] (Tabel 4.1). Bij het terugrekenen van de proeven is telkens ook het scenario beschouwd waarbij de drempelwaardeparameter gelijk is gehouden aan 0. Voor de achtergrond hiervan wordt verwezen naar [20].

Tabel 4.1 Parameters uit overslagproef Delfzijl en overloopproof Bergambacht.

Test	Parameter	Teruggerekend	NRCS [19] Best guess	NRCS [19] Range for clay
Delfzijl verdieping	$\tau_c$ (Pa) $k_d$ (m/s/Pa)	40 $3.5 \times 10^{-5}$	0.12 $3 \times 10^{-7}$	verwaarloosbaar $3 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-7}$
Delfzijl verdieping; indien $\tau_c=0$	$\tau_c$ (Pa) $k_d$ (m/s/Pa)	0 $1.5 \times 10^{-5}$	nvt	nvt
Delfzijl migratie	$A_0$ ( $ms^{-1/3}$ ) C ( $s^{-2/3}$ )	0.37 $3 \times 10^{-2}$	0.2 $1.7 \times 10^{-3}$	0-0.5 $1.5 \times 10^{-3} - 2 \times 10^{-3}$
Delfzijl migratie; indien $A_0=0$	$A_0$ ( $ms^{-1/3}$ ) C ( $s^{-2/3}$ )	0 $1.5 \times 10^{-2}$	nvt	nvt
Bergambacht migratie	$A_0$ ( $ms^{-1/3}$ ) C ( $s^{-2/3}$ )	0.2 $3 \times 10^{-4}$	0.3 $1.6 \times 10^{-3}$	0-0.5 $1.5 \times 10^{-3} - 2 \times 10^{-3}$
Bergambacht migratie; indien $A_0=0$	$A_0$ ( $ms^{-1/3}$ ) C ( $s^{-2/3}$ )	0 $2 \times 10^{-4}$	nvt	nvt

Vanwege de grote onzekerheden met betrekking tot de parameters voor de situatie van kleidijken in combinatie met golfoverslag is voor de parameters een ruime bandbreedte aangehouden.

- $\tau_c$  (Pa) Uniforme verdeling tussen 0 en 60.
- $k_d$  (m/s/Pa) Uniforme verdeling van  $\log(k_d)$  tussen  $10^{-5}$  en  $10^{-7}$ .
- $A_0$  ( $ms^{-1/3}$ ) Lognormaal, mu 0,37 ; sigma  $0,2 \cdot 0,37 = 0,074$ .
- C ( $s^{-2/3}$ ) Lognormaal, mu  $0,8 \times 10^{-3}$ ; sigma  $0,2 \cdot 0,8 \times 10^{-3}$ .

Verder zijn voor de berekeningen de uitgangspunten gehanteerd zoals samengevat in Tabel 4.2).



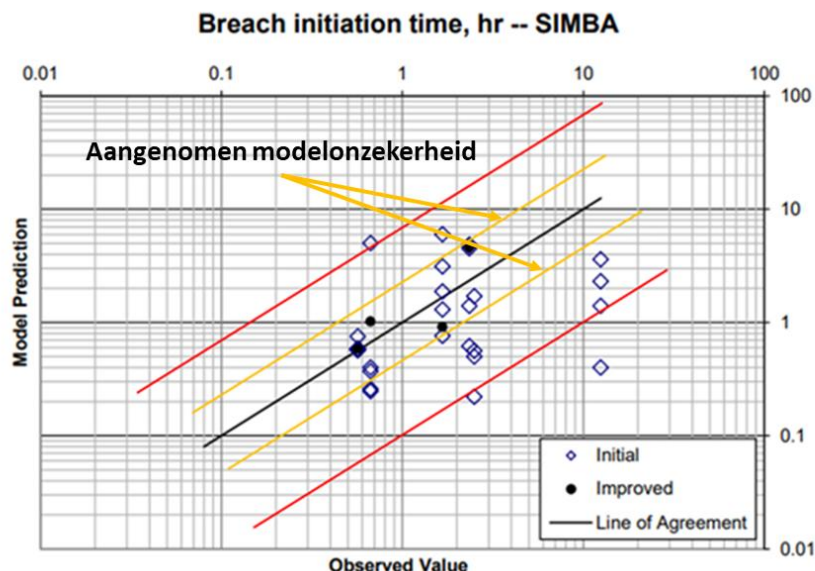
Tabel 4.2 Factoren die bepalend zijn voor de berekende kans op falen door erosie van het dijksmateriaal.

Parameter	Opmerkingen
Kruinbreedte B (m)	Hoe breder het dijkprofiel hoe langer het duurt voordat erosie leidt tot een bres. Scenario's : <ul style="list-style-type: none"> <li>• B= 3 m en</li> <li>• B = 6 m</li> </ul>
Dijkhoogte H (m)	H = 6 m
Taludhelling (1:..)	1:3
Startpunt erosie	Uitgaan van een startschade van 1 m diepte. Bijvoorbeeld een omgewaaide boom, of een (door golfoverslag) uitgetrokken paal of hekwerk. Scenario's: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Insteek bij de binnenkruinlijn.</li> <li>• Insteek halverwege talud.</li> </ul>
H <sub>s</sub> (m)	Verschillende golfhoogtes geven per overslagdebiet een verschillende verdeling van golfoverslagvolumes, frontsnelheden en waterlaagdiktes. De volgende scenario's worden bekeken: <ul style="list-style-type: none"> <li>• H<sub>s</sub>=0,5 m</li> <li>• H<sub>s</sub>=1 m</li> <li>• H<sub>s</sub>=2 m</li> <li>• H<sub>s</sub>=3 m</li> </ul>
Golfsteilheid s <sub>op</sub> (-)	0,05
Geometrie buitentalud	Helling 1:3, ruwheidsfactor 1,0; geen berm.
Golfrichting	Loodrecht invallend
Belastingduur	Er wordt uitgegaan van een belasting van 6 uur het maximale golfoverslagdebiet. Verwacht wordt dat dit een enigszins conservatieve benadering is ten opzichte van het verwachte verloop met een piek van enkele uren en de flanken waarbij het golfoverslagdebiet toe- en afneemt.

### Modelonzekerheid

Bekend is dat bresgroeimodellen een behoorlijke onzekerheid in zich hebben die niet direct te koppelen is aan onzekerheden in de erosieparameters. Er is onvoldoende informatie beschikbaar uit proeven of werkelijke doorbraken om voor het kliferosiemodel direct een modelonzekerheid af te leiden. Daarom is grofstoffelijk gekeken naar modelonzekerheid bij een ander maar vergelijkbaar breserosiemodel SIMBA [21], om op deze manier indirect toch een schatting van de modelonzekerheid in rekening te brengen.

Bij bresgroei is het erosieproces tot aan een waterstand hoger dan de kruin de bres initiatiefase. Voor een aantal bresgroeimodellen is op basis van grootschalige bresproeven gekeken naar de modelonzekerheid, in dit geval gedefinieerd als het verschil tussen de voorspelde bresinitiatietijd en de geobserveerde bresinitiatietijd. De resultaten voor het model SIMBA wordt gegeven in Figuur 4.4. De voorspellingen zijn aanvankelijk gemaakt met een eerste inschatting van de parameters. Daarna zijn de parameters op basis van de proeven verbeterd. Aangenomen wordt dat de modelonzekerheid de resterende marge is tussen voorspelling en observatie, gekarakteriseerd door de oranje lijnen in Figuur 4.4.



Figuur 4.4 Schatting modelonzekerheid klif erosiemodel op basis van resultaten uit [21].

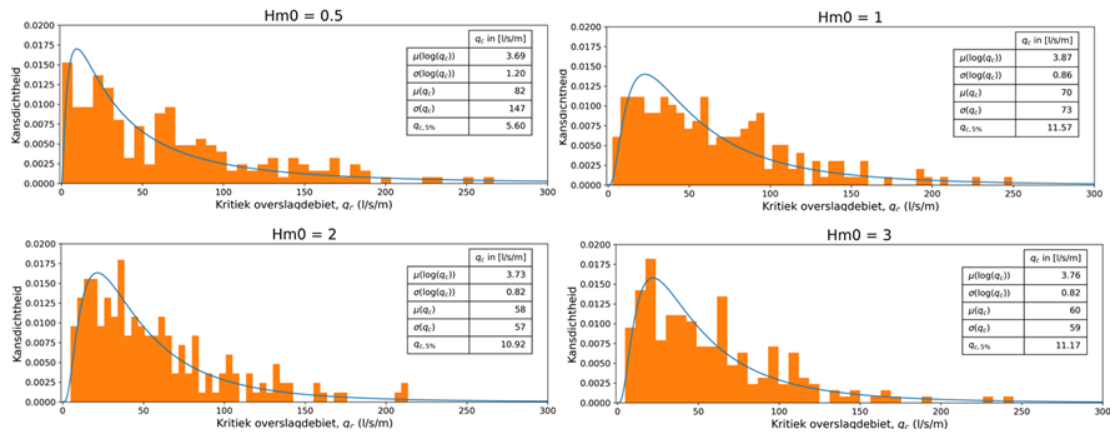
Bij het SIMBA model kan de modeluitkomst van de initiatietijd grofweg circa 2 keer groter of 2 keer kleiner zijn dan in werkelijkheid wordt waargenomen. Voor het kliferosiemodel wordt aangenomen dat de modelonzekerheid vergelijkbaar is maar dan op de snelheid waarmee de insteek van de erosiekuil de kritische lijn van 1:2 vanaf de buitenkruinlijn nadert (blauwe pijl in Figuur 4.3). Er is rekening gehouden met een modelfactor met een driehoekige verdeling tussen 1/2 en 2 met de mediaan op 1.

Het erosiemodel is geïmplementeerd in Python. Voor de verdere uitwerking van de formules voor de belasting wordt verwezen naar [20] en [22].

#### 4.4 Resultaten

Met het erosiemodel zijn per scenario 200 simulaties uitgevoerd. Hierbij zijn trekkingen gedaan uit de kansverdelingen van de erosieparameters en de modelfactor. Bij deze set parameters en de verdere uitgangspunten in Tabel 4.2 is berekend wat de kritische waarde van het golfoverslagdebiet is om net te voldoen aan de faaldefinitie (Figuur 4.3). De op deze wijze verkregen kritische waarden van het golfoverslagdebiet zijn uitgezet in histogrammen, waardoor lognormale kansverdelingen zijn gefit. De keuze voor een lognormale verdeling komt voort uit de projectmatige overweging dat alleen deze verdeling kan worden ingevoerd in Riskeer in het spoor GEKB.

Voor het scenario met een 3 meter brede kruin en de aanvangskuil ter plaatse van de binnenkruinlijn staat de uitwerking in Figuur 4.5.

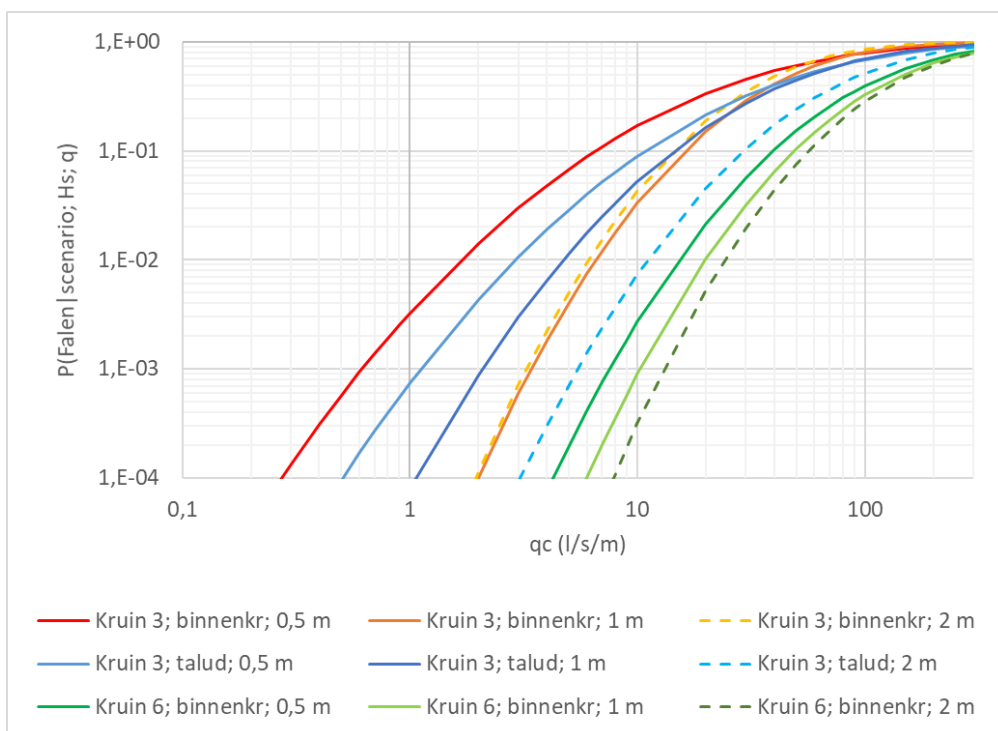


Figuur 4.5 Voorbeeld uitwerking berekende waarden van het kritisch golfoverslagdebiet naar lognormale kansverdelingen voor scenario met kruinbreedte van 3 m en aanvangskuil bij de binnenkruin.

De resultaten voor de verschillende scenario's staan in Tabel 4.3 en Figuur 4.6. In de figuur zijn voor verbetering van de leesbaarheid de resultaten voor een golfhoogte van 3 m weggelaten. Omdat de meeste dijken met een kleikern en zonder grasbekleding in het rivierengebied voorkomen zijn de resultaten bij de lagere golven ook relevanter.

Tabel 4.3 Lognormale kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet ( $l/s/m$ ) voor verschillende scenario's.

Scenario	Hs (m)	mu ( $l/s/m$ )	Sigma ( $l/s/m$ )	5% ondergrens
Kruin 3 m Aanvangskuil binnenkruin	0.5	82	147	5,6
	1	70	73	12
	2	58	57	11
	3	60	59	11
Kruin 3 m Aanvangskuil halverwege talud	0.5	119	233	7
	1	102	150	10
	2	148	173	21
	3	149	160	24
Kruin 6 m Aanvangskuil binnenkruin	0.5	194	222	30
	1	215	226	35
	2	222	214	40
	3	250	239	50



Figuur 4.6 Kansverdelingen van  $q_c$  (l/s/m) voor een kleikern voor verschillende scenario's van kruinbreedte (3 en 6 m), golfhoogtes  $H_s$  (0,5 tot 2 m) en de plek van de initiële kuil (binnenkruin of talud).

De grote onzekerheden rondom het erosiemodel, de erosieparameters en de toepassing hiervan voor de situatie van erosie van een kleikern door golfoverslag, leiden tot een grote spreiding in het berekende kritische golfoverslagdebiet. De spreiding is in de meeste gevallen groter dan de verwachtingswaarde.

Bij een golfoverslagdebiet in de orde van 30 tot 150 l/s/m is de berekende kans op het bereiken van de faalkansdefinitie 50% voor de scenario's uit Figuur 4.6. De 5% ondergrenswaarde van het kritisch golfoverslagdebiet varieert van circa 5 l/s/m tot 50 l/s/m (Tabel 4.3). Dit is grofweg van gelijke orde van grootte als de 5% ondergrenswaarde van de faalkans van een grasbekleding, zonder overgangen en objecten. De aanname bij aanvang van het project (Paragraaf 4.2) is niet juist. Bij dijken met een kleikern is de berekende sterkte van de kleikern niet klein ten opzichte van die van een grasbekleding met overgangen en objecten maar mogelijk van gelijke orde van grote of groter. Dit heeft ook gevolgen voor de bepaling van de lengte-effectfactor (zie Hoofdstuk 5).

Lagere golven leiden in het algemeen tot een hogere berekende faalkans dan de hogere golven. Veel kleine golven geven kennelijk in potentie meer erosie dan enkele grote golven, bij een gelijk golfoverslagdebiet. Dit kan worden verklaard door de relatief lage drempelwaarden voor erosie van kale grond, ten opzichte van bijvoorbeeld gras. Bij klei zullen ook kleine golven leiden tot enige erosie, terwijl dat bij gras niet zo is. De optelsom van erosie door veel kleine golven is voor kale grond doorslaggevend ten opzichte van enkele hele grote golven. Te zien is dat voor een kruin van 3 m breed en de initiële kuil bij de binnenkruinlijn de kansverdelingen voor een significante golfhoogte van 1 en 2 m bijna op elkaar liggen, die voor 2 m er zelfs iets boven. Het verschil is in elk geval klein. Het is mogelijk dat hier de onnauwkeurigheid van het fitproces van de verdeling er net voor zorgt dat de lijn voor 2 m boven die van 1 m ligt.

De resultaten laten zien dat een smalle kruin (3 m) logischerwijs een hogere faalkans heeft dan een brede kruin (6 m), uitgaande van een initiële kuil op dezelfde plek. Bij een golfoverslagdebiet van 10 l/s/m scheelt dit een factor 10 à 100 op de berekende faalkans.

Of de initiële kuil op de kruin of in het talud zit maakt gezien over de diverse golfhoogtes niet veel uit. Bij een initiële kuil op de binnenkruinlijn hoeft de golfoverslag minder grondvolume te verwijderen om te komen tot de faaldefinitie. Daar tegenover staat dat op het talud wordt gerekend met een hogere stroomsnelheid en daarmee een hogere schuifspanning en erosieve werking van de stroming. De potentiële energie van de stroming op de kruin wordt op het talud omgezet in kinetische energie. Onder de diverse aannames heffen de twee effecten elkaar grofweg op.

## 5 Invloed gewijzigde sterktemodellering op lengte-effect factoren voor GEKB

### 5.1 Inleiding

Bij de beoordeling van waterkeringen wordt de kans op een overstroming door falen van een dijktraject vergeleken met de wettelijk vastgestelde eis. Voor de bepaling van de overstromingskans van een dijktraject wordt gekeken naar individuele mechanismen, waaronder Gras Erosie Kruin en Binnentalud (GEKB). Voor het gehele dijktraject moet dan de kans bepaald worden dat op een doorsnede falen optreedt met een overstroming tot gevolg. Daarbij dient rekening te worden gehouden met de correlaties tussen de verschillende doorsnedes: (i) correlatie in de sterkte van de grasmat/onderlaag en (ii) correlaties in de belasting. Dit kan gedaan worden middels een volledig probabilistische analyse waarmee de correlaties tussen doorsnedes in rekening kunnen worden gebracht.

Bij het opstellen van het WBI2017 is ervoor gekozen om nog niet te werken met een volledig probabilistische analyse maar om hier een benadering te hanteren. Voor het mechanisme GEKB wordt binnen WBI2017 een faalkans op doorsnedeniveau bepaald met behulp van Riskeer (Hydra-Ring) waarbij een representatieve doorsnede binnen een vak gekozen dient te worden. Vervolgens wordt de kans per doorsnede opgeschaald naar een trajectkans. Dit gebeurt door middel van een lengte-effectfactor  $N$  die per traject 1, 2 of 3 is, afhankelijk van het aantal verschillende dijkoriëntaties. De trajectkans wordt verkregen door de faalkans van de zwakste doorsnede te vermenigvuldigen met  $N$ .

De bepaling van de waarde voor  $N$  per dijktraject is uitgevoerd op basis van de in WBI2017/OI2014 gehanteerde beschrijving van het mechanisme GEKB dat gebruik maakt van (kansverdelingen van) een kritiek overslagdebiet. Hierbij werd aangenomen dat de hydraulische belastingen bepalend zijn voor de faalkans. De vraag is of deze aanname stand houdt als overgestapt wordt op het gebruik van de Cumulatieve Overbelastings Methode (COM) en als objecten, overgangen en/of fragmentarische zode aanwezig zijn op het binnentalud zoals beschreven in Hoofdstuk 3 en 4. Anders gezegd: moet bij het toepassen van de in Hoofdstuk 3 en 4 beschreven kansverdelingen van invloedsfactoren en kritieke overslagdebieten in een semi-probabilistische analyse een aangepaste lengte-effect factor gehanteerd worden (ofwel: is de bijdrage van de hydraulische belastingen aan de faalkans kleiner dan aangenomen bij de afleiding van de huidige lengte-effectfactoren)?

In dit hoofdstuk wordt deze analyse beschreven. Hiervoor is gebruikgemaakt van de Hydra-Ring plugin zoals beschreven in [26], waarbij zowel de COM als het kritieke overslagdebiet gebruikt kunnen worden om de faalkans van een dijkvak en een heel dijktraject, volledig probabilistisch te berekenen. Op basis van deze faalkansen kan de lengte-effectfactor worden berekend en vergeleken met de huidige waarden. De analyse is uitgevoerd op twee dijktrajecten (Paragraaf 5.3.1), waarvan er één wordt gebruikt voor een gevoeligheidsanalyse (Paragraaf 5.3.2). De gevoeligheidsanalyse heeft als doel om een breed inzicht te verschaffen in de mogelijke situaties die in de praktijk zouden kunnen worden aangetroffen. Tot slot is ook het effect van fragmentarische zode op de lengte-effectfactor van GEKB geanalyseerd, gebruikmakend van een benadering in de vorm van een kansverdeling van het kritieke overslagdebiet (Paragraaf 5.3.3).

In dit hoofdstuk is een onderscheid gemaakt tussen de invloedsfactoren en invloedscoëfficiënten. De invloedsfactoren ( $\alpha_m$ ,  $\alpha_a$  en  $\alpha_s$ ) zijn correctiefactoren van de COM:

- $\alpha_m$  Is de correctiefactor voor de belasting door de invloed van objecten of overgangen.
- $\alpha_a$  Is de correctiefactor voor stroomversnelling, afhankelijk van de locatie van het golffront op het binnentalud.
- $\alpha_s$  Is de correctiefactor om de sterkte aan te passen ter plaatse van aanwezige objecten.

De invloedscoëfficiënten ( $\alpha$ -waarden) hebben betrekking op de resultaten van de First Order Reliability Method (FORM) en zijn gegeven per stochastische variabele. Deze waarden geven een indicatie van de onzekerheidsbijdrage van een stochastische variabele aan de faalkans: de som van de kwadraten van de invloedscoëfficiënten is altijd gelijk aan 1 (100%).

## 5.2 Aanpak

### 5.2.1 Bepaling van het lengte-effect

In het WBI2017/OI2014 worden gestandaardiseerde lengte-effectfactoren gebruikt om de faalkans van een doorsnede op te schalen naar de faalkans van een dijktraject. Deze factoren brengen de te verwachten invloed van correlatie tussen doorsnedes in rekening. Voor GEKB worden waarden 1, 2 of 3 toegepast, afhankelijk van de dijkrichting. Een lengte-effect van 1 geeft aan dat alle vakken volledig gecorreleerd zijn.

De keuze van een lengte-effectfactor kan worden gebaseerd op de effectieve lengte-effectfactor welke bepaald kan worden door een probabilistische berekening. De lengte-effectfactor ( $N$ ) is dan gedefinieerd als de verhouding tussen de gecombineerde faalkans van het gehele traject ( $P_{f,traject}$ ) gedeeld door de maximaal berekende faalkans van de representatieve doorsnedes ( $P_{f,dsn,max}$ ), zie Vergelijking 1.

$$N = \frac{P_{f,traject}}{P_{f,dsn,max}}$$

Vergelijking 1

In deze studie worden de faalkansen van dijkvakken en het dijktraject in Hydra-Ring probabilistisch berekend met de First Order Reliability Method (FORM), waarmee invloedscoëfficiënten ( $\alpha$ -waarden) per variabele kunnen worden bepaald. Als alle doorsnedes op het traject voldoen aan de eis  $P_{f,traject}/N$  voldoet het hele traject aan de eis.

Om de trajectfaalkans te bepalen, berekent Hydra-Ring de faalkans van de representatieve doorsnedes en gebruikt dan de vaklengtes waar deze doorsnedes voor gelden en correlaties tussen parameters, om deze op te schalen naar een faalkans voor het dijkvak. Vervolgens worden deze faalkansen van individuele dijkvakken opgeschaald naar een faalkans voor een dijktraject. Voor beide stappen wordt rekening gehouden met de ruimtelijke variatie in sterkte- en belastingeigenschappen door middel van de autocorrelatiefunctie. Deze functie beschrijft de ruimtelijk variërende onzekerheid van een bepaalde stochast. In andere woorden, deze functie beschrijft hoe de correlatie van een bepaalde stochast tussen twee punten afneemt als functie van de afstand.

Twee parameters zijn hiervoor van belang: de correlatielengte ( $D_x$ ) en de niet-ergodische (basis) correlatie ( $\rho_x$ ). De basiscorrelatie ( $\rho_x$ ) beschrijft de correlatie tussen twee doorsnedes, of vakken, onafhankelijk van de onderlinge afstand. Bijvoorbeeld: als dezelfde grassoort wordt gebruikt en beheerd op een dijk met dezelfde oriëntatie, dan is er een correlatie tussen de doorsnedes, ook als ze verder uit elkaar liggen. Uiteraard is de correlatie van twee doorsnedes heel dicht bij elkaar gelijk aan 1 maar neemt deze met een bepaalde snelheid af naar de basiscorrelatie bij de verst gelegen doorsnede. De snelheid waarmee deze afneemt wordt

beschreven met de correlatielengte ( $D_x$ ). Meer informatie over hoe in Hydra-Ring de faalkans opgeschaald wordt is terug te vinden in [28].

In het WBI2017 wordt voor het mechanisme GEKB aangenomen dat de sterkte van de grasmat binnen het vak een basiscorrelatie heeft van 0. De correlatielengte is vastgesteld op 300 meter. Deze waarden zijn als startpunt gehanteerd voor deze studie.

### 5.2.2 Schematisering van objecten

In Paragraaf 3.3 zijn categorieën van dijkvakken gedefinieerd afhankelijk van het type object en type overgang aanwezig op het respectievelijke binnentalud. Per categorie is een specifieke kansverdeling voor de correctiefactor  $\alpha_m \alpha_a^2$  van de belasting bepaald. In totaal zijn er drie verschillende kansverdelingen beschreven, behorende bij drie categorieën/typeringen. Het belangrijkste verschil tussen de drie categorieën is het type objecten dat aanwezig is op het binnentalud. De categorieën zijn als volgt gedefinieerd:

- Categorie 1: Op het binnentalud mogen taludtrappen en objecten kleiner dan 0,15 m aanwezig zijn (geen wegovertgangen en geen objecten groter dan 0,15 m). De kansverdeling van  $\alpha_m \alpha_a^2$  is hier lognormaal met een gemiddelde van 2,35 en een standaardafwijking van 0,15.
- Categorie 2: Op het binnentalud mogen taludtrappen, wegovertgangen en objecten kleiner dan 0,15 m aanwezig zijn (geen objecten groter dan 0,15 m). De kansverdeling van  $\alpha_m \alpha_a^2$  is hier een afgeknotte normale verdeling met een gemiddelde van 2,8, een standaardafwijking van 0,32, een maximum van 3,528.
- Categorie 3: Op het binnentalud mogen taludtrappen, wegovertgangen en objecten aanwezig zijn. De kansverdeling van  $\alpha_m \alpha_a^2$  is hier een afgeknotte normale verdeling met een gemiddelde van 3, een standaardafwijking van 0,27, een minimum van 1,96 en een maximum van 3,528.

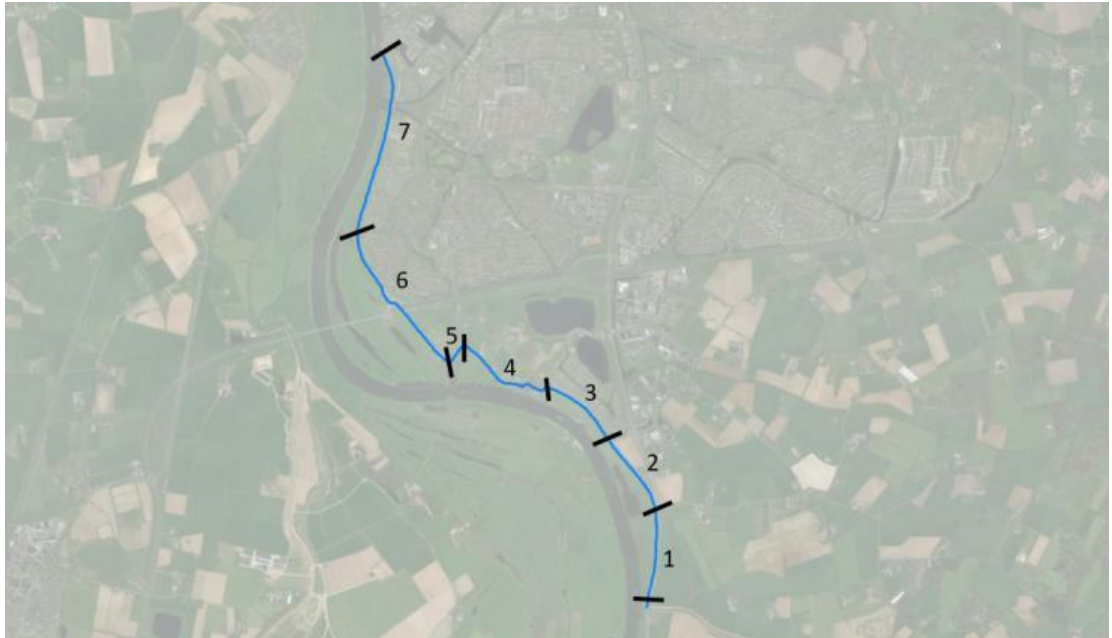
Met de Hydra-Ring plugin (Deltares, 2021) is het mogelijk om kansverdelingen toe te kennen aan de individuele invloedsfactoren. Echter, de hierboven beschreven kansverdelingen zijn afgeleid voor een combinatie van invloedsfactoren. Om toch gebruik te kunnen maken van deze kansverdelingen binnen de Hydra-Ring plugin wordt de kansverdeling voor  $\alpha_m \alpha_a^2$  toegepast voor  $\alpha_m$ . De invloedsfactor  $\alpha_a$  wordt gemodelleerd als een deterministische variabele met een waarde van 1. Deze combinatie maakt dat effectief gerekend wordt met een kansverdeling voor  $\alpha_m \alpha_a^2$ .

### 5.2.3 Schematisatie dijktrajecten

De analyse is uitgevoerd voor twee dijktrajecten: dijktraject 50-1, gelegen langs de IJssel bij Zutphen en dijktraject 8-4, gelegen langs het Ketelmeer, ten noorden van Flevoland. Dijktraject 50-1 is gekozen vanwege de heterogeniteit van objecten op het binnentalud en omdat dit een dijktraject in het bovenrivierengebied is waar falen door overloop dominant is. Het doel van deze analyse is om vast te stellen of overloop bepalend blijft. Er is gekozen voor dijktraject 8-4 omdat het een groene dijk is met juist weinig objecten op het binnentalud en slechts enkele wegovertgangen. Deze case maakt deel uit van een gebied waar overslag bepalend is, het doel is om na te gaan of de bijdrage van de belasting verandert. Voor beide trajecten is een berekening gemaakt voor een situatie met een gesloten en een open zode.

De indeling in vakken van traject 50-1 is terug te vinden in Figuur 5.1. Per dijkvak is met behulp van Google Maps en het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) een passende categorie voor de objecten gekozen en een representatieve dijkdoorsnede bepaald. In Tabel 5.1 zijn de geselecteerde categorieën samen met de karakteristiek van elke dijkvak terug te vinden.



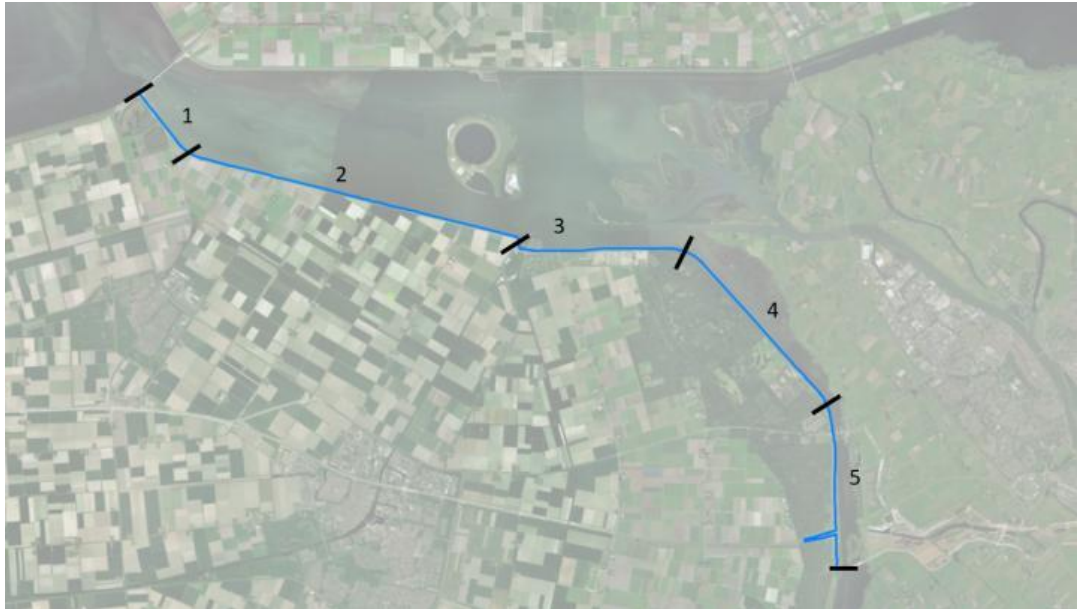


Figuur 5.1 Vakindeling van traject 50-1.

Tabel 5.1 Karakteristiek van elk dijkvak van dijktraject 50-1.

Dijkvak	Lengte (m)	Categorie	Representatieve doorsnede	Kruin hoogte (m)	Dijknormaal (°)	Buitenwaartse helling (-)
1	700	2	050-01_0004_1_IJ_km0922	10,55	92,5	0,365
2	600	3	050-01_0011_1_IJ_km0922	9,98	55	0,343
3	620	2	050-01_0015_1_IJ_km0923	10,17	55	0,378
4	725	3	050-01_0022_1_IJ_km0923	10,05	10	0,395
5	150	1	050-01_0026_1_IJ_km0924	11,85	125	0,475
6	1.200	2	050-01_0032_1_IJ_km0924	9,54	50	0,390
7	1.300	2	050-01_0048_1_IJ_km0926	10,19	105	0,364

De indeling in vakken van traject 8-4 is terug te vinden in Figuur 5.2. Per dijkvak is met behulp van Google Maps en het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) een passende categorie voor objecten gekozen en een representatieve doorsnede bepaald. In Tabel 5.2 zijn deze categorieën samen met de karakteristieken van elk dijkvak terug te vinden.



Figuur 5.2 Vak indeling van traject 8-4.

Tabel 5.2 Karakteristiek van elk dijkvak van dijktraject 8-4.

Dijkvak	Lengte (m)	Categorie	Representatieve doorsnede	Kruin hoogte (m)	Dijknormaal (°)	Buitenwaartse helling berm tot kruin (-)	Buitenwaartse helling teen tot berm (-)
1	1.300	2	KM_2_8-4_dk_00009	4,68	13,5	0,337	0,235
2	7.000	2	KM_2_8-4_dk_00054	5,00	13,5	0,386	0,221
3	3.600	2	KM_2_8-4_dk_00077	4,66	14,3	0,320	0,267
4	4.100	2	KM_2_8-4_dk_00097	5,46	13,7	0,322	0,256
5	3.300	3	KM_2_8-4_dk_00118	4,46	13,6	0,282	0,222

## 5.3 Resultaten

### 5.3.1 Basiscases

De berekeningen voor de basiscases zijn uitgevoerd conform WBI2017, met als enige verschil dat  $\alpha_m$  als stochastische variabele is ingevoerd en  $\alpha_a$  als deterministische variabele met een waarde van 1 (wat inhoudelijk identiek is aan het toekennen van een kansverdeling op  $\alpha_m \alpha_a^2$ ). In de volgende paragrafen wordt  $\alpha_m \alpha_a^2$  voor meer leesbaarheid geschreven als  $f_o$ . Een overzicht van de parameters gebruikt voor beide cases is terug te vinden in Tabel 5.3. De belasting wordt geschematiseerd met een reekstype, basisduur en piekduur. Voor een toelichting op reekstype en de geassocieerde basisduur en piekduur wordt verwezen naar [26].

Tabel 5.3 COM parameters gebruikt voor alle berekeningen.

Variabel	Distributie	Parameters
Reekstype (-)	N.v.t.	Voor dijktraject 50-1: 1 Voor dijktraject 8-7: 3
Basisduur (uren)	Deterministisch	48
Piekduur (uren)	Deterministisch	4
Kritieke stroomsnelheid - $u_c$ (m/s)	Afgeknotte normaal	Gesloten zode: $\mu = 8$ ; $\sigma = 1$ ; $min = 0$ ; $max = 12$ Open zode: $\mu = 6$ ; $\sigma = 0,75$ ; $min = 0$ ; $max = 12$
Kritieke cumulatieve overbelasting - $D_{crit}$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	Afgeknotte normaal	$\mu = 7.000$ ; $\sigma = 700$ ; $min = 0$ ; $max = 10.000$
Ruwheidsfactor - $\gamma_f$ (-)	Deterministisch	1
Invloedsfactor op sterkte - $\alpha_s$ (-)	Deterministisch	1
Correlatielengte voor alle sterkteparameters- $D_x$ (m)	Deterministisch	300
Niet-ergodische correlatie voor de invloedsfactoren $\alpha_m$ , $\alpha_a$ en $\alpha_s$ - $\rho_x$ (-)	Deterministisch	0
Niet-ergodische correlatie voor $u_c$ en $D_{crit}$ - $\rho_x$ (-)	Deterministisch	1

De invloedsfactor voor de sterkte  $\alpha_s$  is afhankelijk van het type overgang. Voor de altijd aanwezige geometrische overgang van talud naar berm of achterland is de factor 1, zonder spreiding. Er is hier geen sprake van een verzwakking, omdat de grasbekleding niet wordt doorsneden. Voor overgangen en objecten waarbij de grasbekleding wel wordt doorsneden is de factor 0,9 met een geringe spreiding (zie paragraaf 2.3.1). Verwacht wordt dat de waarde en geringe spreiding van deze factor weinig invloed heeft op de bepaling van de lengte-effectfactor en daarom is uitgegaan van een deterministische waarde van 1,0.

### 5.3.1.1 Dijktraject 50-1

De Hydra-Ring resultaten voor gesloten en open zode voor dijktraject 50-1 zijn te vinden in Tabel 5.4 en Tabel 5.5. Hier worden de betrouwbaarheidsindices ( $\beta$ ), de faalkansen en de gekwadrateerde invloedscoëfficiënt van parameter  $f_o$  gegeven per dijkvak en voor het hele dijktraject.

Tabel 5.4 Resultaten base case dijktraject 50-1 met gesloten zode. Hier is faalkans van een dijkvak de faalkans van de representatieve doorsnede opgeschaald met de vaklengte.

	$\beta$ (-)	Faalkans (-)	Gekwadrateerde invloedscoëfficiënt $\alpha_{f_o}^2$ (-)
Dijkvak – 1	3,580	$1,72 \cdot 10^{-4}$	0,00471
Dijkvak – 2	3,467	$2,63 \cdot 10^{-4}$	0,00552
Dijkvak – 3	3,654	$1,29 \cdot 10^{-4}$	0,00796
Dijkvak – 4	3,510	$2,24 \cdot 10^{-4}$	0,00559
Dijkvak – 5	5,542	$1,50 \cdot 10^{-8}$	$9,21 \cdot 10^{-5}$
Dijkvak – 6	4,345	$6,97 \cdot 10^{-6}$	0,00199
Dijkvak – 7	4,355	$6,65 \cdot 10^{-6}$	$7,32 \cdot 10^{-5}$
Combinatie - Dijktraject	3,315	$4,58 \cdot 10^{-4}$	0,00409

Uit Tabel 5.4 volgt dat dijktraject 50-1 met gesloten zode een maximale faalkans per dijkvak heeft van  $2,63 \cdot 10^{-4}$ . De op volledig probabilistische wijze gecombineerde faalkans bedraagt  $4,58 \cdot 10^{-4}$ . Op basis van deze resultaten wordt dan een lengte-effectfactor van 1,7 gevonden.

Tabel 5.5 Resultaten base case dijktraject 50-1 met open zode. Hier is faalkans van een dijkvak de faalkans van de representatieve doorsnede opgeschaald met de vaklengte.

Dijkvak	$\beta$ (-)	Faalkans (-)	Gekwadrateerde invloedscoëfficiënt $\alpha_{f_o}^2$ (-)
Dijkvak – 1	3,299	$4,86 \cdot 10^{-4}$	0,00774
Dijkvak – 2	3,132	$8,67 \cdot 10^{-4}$	0,00501
Dijkvak – 3	3,338	$4,22 \cdot 10^{-4}$	0,00852
Dijkvak – 4	3,177	$7,44 \cdot 10^{-4}$	0,00487
Dijkvak – 5	5,444	$2,60 \cdot 10^{-8}$	0,00114
Dijkvak – 6	4,132	$1,80 \cdot 10^{-5}$	0,00576
Dijkvak – 7	4,284	$9,17 \cdot 10^{-6}$	0,00166
<b>Combinatie - Dijktraject</b>	2,963	$1,52 \cdot 10^{-3}$	0,00387

Tabel 5.5 geeft aan dat hetzelfde dijktraject met open zode een maximale faalkans heeft van  $8,67 \cdot 10^{-4}$ . De op volledig probabilistische wijze gecombineerde faalkans bedraagt  $1,52 \cdot 10^{-3}$ . Op basis van de resultaten wordt dan een lengte-effectfactor van 1,8 gevonden.

Uit de analyse van de resultaten voor gesloten en open zode blijkt dat, zoals verwacht, voor dijktraject 50-1 overloop dominant is voor alle dijkvakken, behalve voor dijkvak 1. Verder is de grootste gekwadrateerde waarde van de invloedscoëfficiënt van parameter  $f_o$  kleiner dan ongeveer 0,009. Dit betekent dat de faalkans grotendeels wordt bepaald door onzekerheid in andere stochasten. Analyse van de resultaten laat zien dat dit vooral de belastingen zijn. Dus ook wanneer de invloedsfactoren ( $f_o$ ) als stochast worden meegenomen blijft de faalkans gedomineerd door de belasting of andere sterkteparameters. Op grond hiervan kan worden geconcludeerd dat het toekennen van een kansverdeling op  $f_o$ , op dit dijktraject, de te hanteren lengte-effectfactor niet zal beïnvloeden.

### 5.3.1.2 Dijktraject 8-4

De Hydra-Ring resultaten voor gesloten en open zode voor dijktraject 8-4 zijn te vinden in Tabel 5.6 en Tabel 5.7. Hier worden de betrouwbaarheidsindices ( $\beta$ ), de faalkansen en de gekwadraterde invloedscoëfficiënt van  $f_o$  gegeven per dijkvak en voor het hele dijktraject.

Tabel 5.6 Resultaten base case dijktraject 8-4 met gesloten zode. Hier is faalkans van een dijkvak de faalkans van de representatieve doorsnede opgeschaald met de vaklengte.

Dijkvak	$\beta$ (-)	Faalkans (-)	Gekwadraterde invloedscoëfficiënt $\alpha_{f_o}^2$ (-)
Dijkvak - 1	4,377	$6,03 \cdot 10^{-6}$	0,00690
Dijkvak - 2	3,766	$8,28 \cdot 10^{-5}$	0,00666
Dijkvak - 3	4,163	$1,57 \cdot 10^{-5}$	0,00598
Dijkvak - 4	4,626	$1,86 \cdot 10^{-6}$	0,00552
Dijkvak - 5	4,022	$2,89 \cdot 10^{-5}$	0,00453
Combinatie - Dijktraject	3,714	$1,02 \cdot 10^{-4}$	0,00570

Uit Tabel 5.6 volgt dat dijktraject 8-4 met gesloten zode een maximale faalkans heeft van  $8,28 \cdot 10^{-5}$ . In combinatie met de op volledig probabilistische wijze bepaalde faalkans op trajectniveau leidt dit tot een lengte-effectfactor van 1,2.

Tabel 5.7 Resultaten base case traject 8-4 met open zode. Hier is faalkans van een dijkvak de faalkans van de representatieve doorsnede opgeschaald met de vaklengte.

Dijkvak	$\beta$ (-)	Faalkans (-)	Gekwadraterde invloedscoëfficiënt $\alpha_{f_o}^2$ (-)
Dijkvak - 1	4,156	$1,62 \cdot 10^{-5}$	0,00383
Dijkvak - 2	3,573	$1,76 \cdot 10^{-4}$	0,00345
Dijkvak - 3	3,948	$3,95 \cdot 10^{-5}$	0,00314
Dijkvak - 4	4,415	$5,04 \cdot 10^{-6}$	0,00300
Dijkvak - 5	3,770	$8,16 \cdot 10^{-5}$	0,00216
Combinatie - Dijktraject	3,506	$2,27 \cdot 10^{-4}$	0,00278

Tabel 5.7 geeft aan dat dezelfde dijktraject met open zode een maximale faalkans heeft van  $1,76 \cdot 10^{-4}$ . In combinatie met de op volledig probabilistisch bepaalde faalkans op trajectniveau leidt dit tot een lengte-effectfactor van 1,3. Dit komt door het relatief (zeer) zwakke dijkvak 2.

Uit de resultaten van beide tabellen is duidelijk te zien dat de vakken verschillende betrouwbaarheidsindices hebben. Hierdoor is de faalkans van het dijktraject sterk afhankelijk van de zwakste schakel (dijkvak 2) welke een relatief belangrijk effect heeft op het systeem. Hierdoor hebben de ruimtelijke variaties een veel kleiner effect op het systeemfaalkans.

Verder is, voor gesloten en open zode, de grootste gekwadraterde invloedscoëfficiënt  $\alpha_{f_o}^2$  nog steeds klein, met een maximale waarde van ongeveer 0,007 voor gesloten zode en 0,004 voor open zode. Ook hier geldt dat de faalkans gedomineerd blijft door de belastingen of andere sterkteparameters en dat de lengte-effectfactor dus ook op grond van de belasting bepaald dient te worden, zoals dat ook al gedaan is.

### 5.3.2 Gevoeligheidsanalyse

De gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd met dijktraject 8-4 omdat de analyse voor 50-1 heeft laten zien dat falen daar veelal door overloop optreedt (waarbij de invloed van de invloedsfactoren per definitie klein is). Het doel van de gevoeligheidsanalyse is om hoekpunten

te vinden waar de invloedsfactoren mogelijk een grotere rol zullen spelen, bijvoorbeeld cases met andere correlatielengtes of met een gelijke faalkans per vak, om hiermee zoveel mogelijke situaties af te hechten.

### 5.3.2.1 Variatie in correlatie tussen objecten

Hier wordt een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op de correlatielengte ( $D_x$ ) van  $f_o$ . Deze variabele wordt aangepast naar 10 m, 300 m, 600 m en 100 km. Het doel hiervan is om het effect van de correlatie van objecten tussen doorsnedes/vakken te onderzoeken. Verwacht wordt dat een verhoging in  $D_x$  tot hogere waarden van  $\alpha_{f_o}$  zal leiden en omgekeerd. Ook wordt weinig effect verwacht op de waarde van  $N$  omdat het dijktraject 8-4 gedomineerd is door één zwakke schakel waardoor ruimtelijke variaties weinig effect hebben op het systeem faalkans.

Tabel 5.8 geeft de resultaten van deze analyse. De lengte-effectfactor en de gekwadraterde invloedscoëfficiënt  $\alpha_{f_o}^2$  over het hele traject worden gegeven voor open en gesloten zode en voor de verschillende correlatielengtes. De resultaten laten zien dat, zoals verwacht, sterkere correlatie tussen objecten (dus hogere  $D_x$ ), leidt tot meer invloed van de onzekerheid in  $f_o$ . Deze invloed is echter (zeer) beperkt, met  $\alpha_{f_o}$  kleiner dan -0,09 en de lengte-effectfactor verandert nauwelijks.

Er kan worden geconcludeerd dat de correlatielengte van  $f_o$  geen effect heeft op  $N$ .

Tabel 5.8 Resultaten dijktraject 8-4 voor gevallen met min of meer correlatie tussen objecten.

Zode	Parameters	10	300	600	100.000
<b>Gesloten</b>	$\beta$ van dijktraject (-)	3,01	3,31	3,32	3,23
	Faalkans van dijktraject (-)	$1,31 \cdot 10^{-3}$	$4,71 \cdot 10^{-4}$	$4,52 \cdot 10^{-4}$	$4,46 \cdot 10^{-4}$
	$N$ (-)	1,1	1,0	1,0	1,0
	Gekwadraterde invloedscoëfficiënt $\alpha_{f_o}^2$ (-)	$1,85 \cdot 10^{-8}$	0,00016	0,00193	0,00757
<b>Open</b>	$\beta$ van dijktraject (-)	2,86	3,14	3,15	3,15
	Faalkans van dijktraject (-)	$2,10 \cdot 10^{-3}$	$8,45 \cdot 10^{-4}$	$8,23 \cdot 10^{-4}$	$8,20 \cdot 10^{-4}$
	$N$ (-)	1,2	1,0	1,0	1,0
	Gekwadraterde invloedscoëfficiënt $\alpha_{f_o}^2$ (-)	$4,26 \cdot 10^{-9}$	0,00002	0,00047	0,00392

### 5.3.2.2 Variatie in categorieën

De volgende analyse is uitgevoerd op de invloed van de verdeling van  $f_o$  voor gesloten en open zode. De verdeling van  $f_o$  is allereerst voor alle doorsnedes gezet op categorie 1 en daarna op categorie 3. Verwacht wordt dat dit ook niet veel invloed zal hebben omdat het systeem erg gedomineerd is door één doorsnede; en een verandering van categorie van alle doorsnedes zal daardoor niet tot veel verandering leiden.

Tabel 5.9 geeft de betrouwbaarheidsindices, faalkansen, lengte-effectfactoren en gekwadraterde invloedscoëfficiënt van parameter  $f_o$  over het hele traject van deze analyse. De lengte-effectfactor verschilt niet en de gekwadraterde invloedscoëfficiënt van parameter  $f_o$  zijn kleiner dan 0,0001. Hierdoor is duidelijk te zien dat de keuze van verdeling van  $f_o$  geen effect heeft op de lengte-effectfactor.

Tabel 5.9 Resultaten dijktraject 8-4 voor andere verdelingen van  $f_o$ .

Zode	Parameters	Base	Alle vakken categorie 1	Alle vakken categorie 3
Gesloten	$\beta$ van dijktraject (-)	3,31	3,45	3,28
	Faalkans van dijktraject (-)	$4,71 \cdot 10^{-4}$	$2,80 \cdot 10^{-4}$	$5,22 \cdot 10^{-4}$
	$N$ (-)	1,0	1,0	1,0
	Gekwadrateerde invloedscoëfficiënt $\alpha_{f_o}^2$ (-)	0,00016	0,00008	0,00007
Open	$\beta$ van dijktraject (-)	3,14	3,22	3,12
	Faalkans van dijktraject (-)	$8,45 \cdot 10^{-4}$	$6,32 \cdot 10^{-4}$	$9,04 \cdot 10^{-4}$
	$N$ (-)	1,0	1,0	1,0
	Gekwadrateerde invloedscoëfficiënt $\alpha_{f_o}^2$ (-)	0,00002	0,00002	0,00001

### 5.3.2.3 Variatie in correlatielengte van alle sterkteparameters

Het effect van meer correlatie tussen alle sterkteparameters is ook onderzocht. Hiervoor is de correlatielengte van alle sterkteparameters op 100 km gezet, hierdoor is de sterkte van de doorsneden volledig gecorreleerd. Verwacht wordt dat dit tot een hogere invloedscoëfficiënt van  $f_o$  zal leiden.

Tabel 5.10 geeft de betrouwbaarheidsindices, faalkansen, lengte-effectfactoren en gekwadrateerde invloedscoëfficiënten van  $f_o$  voor het hele traject. De invloedscoëfficiënt neemt inderdaad toe met een factor van circa 7 en 15 voor respectievelijk gesloten en open zode. De absolute waarden van deze gekwadrateerde invloedscoëfficiënten zijn echter nog steeds verwaarloosbaar klein: minder dan 0,008. De benodigde lengte-effectfactor om de volledig probabilistische som te benaderen verandert niet.

Tabel 5.10 Resultaten dijktraject 8-4 met een correlatielengte van 300 m (base) en 100 km voor alle sterkteparameters.

Zode	Parameters	Base	$D_x$ 100 km voor alle sterkteparameters
Gesloten	$\beta$ van dijktraject (-)	3,31	3,32
	Faalkans van dijktraject (-)	$4,71 \cdot 10^{-4}$	$4,46 \cdot 10^{-4}$
	$N$ (-)	1,0	1,0
	Gekwadrateerde invloedscoëfficiënt $\alpha_{f_o}^2$ (-)	0,00016	0,00757
Open	$\beta$ van dijktraject (-)	3,14	3,15
	Faalkans van dijktraject (-)	$8,45 \cdot 10^{-4}$	$8,20 \cdot 10^{-4}$
	$N$ (-)	1,0	1,0
	Gekwadrateerde invloedscoëfficiënt $\alpha_{f_o}^2$ (-)	0,00002	0,00392

### 5.3.2.4 Variatie in betrouwbaarheid per dijkvak

Tenslotte is een situatie geanalyseerd waarbij alle dijkvakken dezelfde betrouwbaarheid hebben. In de eerder geanalyseerde situaties is vaak één vak zeer dominant voor het lengte-effect. Dat verlaagt de lengte-effectfactor op trajectniveau [27]. Daarom is in deze gevoeligheidsanalyse de kruinhoogte zo aangepast dat alle dijkvakken een faalkans hebben gelijk aan de faalkans van de doorsnede-eis berekend met een lengte-effectfactor van 1 ( $\beta = 4,6$ ). Hierdoor zal de ruimtelijke variatie een grotere rol spelen omdat alle dijkvakken ongeveer dezelfde betrouwbaarheidsindex hebben. Dit is vergelijkbaar met een situatie kort na een dijkversterking.

Dezelfde analyse als in Paragraaf 5.3.2.3 is vervolgens uitgevoerd voor een geval waarin alle sterkteparameters een correlatielengte hebben van 300 m en vervolgens 100 km voor gesloten en open zode. Het is de verwachting dat de lengte-effectfactor hoger wordt wanneer alle dijkvakken dezelfde betrouwbaarheidsindex hebben.

Tabel 5.11 geeft de betrouwbaarheidsindices, faalkansen, lengte-effectfactoren en gekwadeerde invloedscoëfficiënten van parameter  $f_o$  over het hele traject van deze analyse. De lengte-effectfactor is, zoals verwacht, groter bij een situatie waar vakken gelijke betrouwbaarheid hebben. Deze waarde is gelijk voor een correlatielengte van 300 m of 100 km. Ook hier kan worden geconcludeerd dat het toekennen van een kansverdeling op  $f_o$  niet zal leiden tot een verandering in de lengte-effectfactor.

Tabel 5.11 Resultaten voor ontwerpsituatie met  $D_x$  is 300 m en 100 km.

Zode	Parameters	Ontwerpsituatie met $D_x$ is 300 m	Ontwerpsituatie met $D_x$ is 100 km
<b>Gesloten</b>	$\beta$ van dijktraject (-)	4,40	4,42
	Faalkans van dijktraject (-)	$5,43 \cdot 10^{-6}$	$5,02 \cdot 10^{-6}$
	$N$ (-)	3,3	3,3
	Gekwadeerde invloedscoëfficiënt $\alpha_{f_o}^2$ (-)	0,00245	0,00420
<b>Open</b>	$\beta$ van dijktraject (-)	4,21	4,22
	Faalkans van dijktraject (-)	$1,29 \cdot 10^{-5}$	$1,23 \cdot 10^{-5}$
	$N$ (-)	2,7	2,8
	Gekwadeerde invloedscoëfficiënt $\alpha_{f_o}^2$ (-)	0,00126	0,00238

### 5.3.3 Fragmentarische zode

Als laatste analyse is gekeken naar het effect op de lengte-effectfactor van GEKB als fragmentarische zode aanwezig is in combinatie met een volledige kleidijk op één of meerdere dijkvakken van dijktraject 50-1 en vervolgens van dijktraject 8-4. Dit is gedaan door drie berekeningen uit te voeren per dijktraject en waarbij fragmentarische zode toegepast wordt op één, twee of alle vakken.

De sterkte van een volledige kleidijk met een fragmentarische zode wordt beschreven met een kansverdeling van het kritieke overslagdebiet, zie de toelichting in Hoofdstuk 4. De parameters van de kansverdeling van het kritieke debiet ( $q_c$ ) zijn afhankelijk van de aanwezige golfhoogte Tabel 4.3.

Voor dijkvakken zonder fragmentarische zode is de cumulatieve overbelastingmethode gebruikt met open zode zoals eerder is uitgevoerd (zie Sectie 5.2.3). Door vakken zonder fragmentarische zode met de COM en vakken met fragmentarische zode en kleidijk op basis van een kansverdeling van het kritieke overslagdebiet te berekenen, wordt verondersteld dat de sterkteparameters in beide sterktebeschrijvingen niet gecorreleerd zijn. Rekenkundig is niet gecorreleerd het makkelijkst mee te nemen en om die reden is dit als startpunt gekozen. Indien de bijdrage van de sterkteparameters aan de faalkans relevant worden, dient dit verder uitgewerkt te worden.

Bij de berekeningen voor dijktraject 50-1 is dijkvak 2 eerst aangepast naar een kleidijk met een fragmentarische zode. Door de aanwezige bebouwing/objecten valt te verwachten dat het ontstaan van fragmentarische zode hier de meeste invloed heeft. Vervolgens is een analyse gemaakt met vakken 2 en 5, de keuze voor het tweede vak is arbitrair en wordt gezien als een gevoeligheidsanalyse. Tot slot is een analyse uitgevoerd waar alle vakken fragmentarische



zode hebben (waarbij er volledige correlatie tussen de sterkteparameters van de fragmentarische zode wordt verondersteld, wat een bovengrens benadering is). Voor dit dijktraject is één golfhoogteklasse van toepassing: 0 - 0,5 m. De lognormale kansverdeling van het kritische overslagdebiet voor fragmentarische zode heeft een gemiddelde waarde van 82 l/s/m en een standaard afwijking van 147 l/s/m.

Voor dijktraject 8-4 is dijkvak 5 eerst aangepast naar fragmentarische zode, daarna dijkvakken 4 en 5 en als laatste zijn alle vakken aangepast. De keuze van de eerste twee vakken met fragmentarische zode is op dezelfde wijze uitgevoerd als bij dijktraject 50-1.

Dijkvakken 1 tot en met 3 van dijktraject 8-4 hebben een golfhoogteklasse van 2 – 3 m en dijkvakken 4 en 5 hebben een golfhoogteklasse van 1 - 2 m. Het kritische golfoverslagdebiet met fragmentarische zode voor dijkvakken 1 tot en met 3 heeft een lognormale kansverdeling met een gemiddelde waarde van 60 l/s/m met een standaard afwijking van 59 l/s/m. Het kritische golfoverslagdebiet met fragmentarische zode voor dijkvakken 4 en 5 heeft een lognormale verdeling met een gemiddelde waarde van 58 l/s/m en een standaard afwijking van 47 l/s/m.

Tabel 5.12 geeft de betrouwbaarheidsindices, faalkansen, lengte-effectfactor, gekwadrateerde invloedscoëfficiënt van parameter  $f_o$  en gekwadrateerde invloedscoëfficiënt van  $q_c$  over het hele traject weer voor dijktrajecten 50-1 en 8-4. Uit de tabel valt een aantal zaken op te maken: (i) de betrouwbaarheidsindices nemen toe met toevoeging van een volledige kleidijk met een fragmentarische zode, (ii) de invloedscoëfficiënt  $\alpha_{q_c}$  is groter dan  $\alpha_{f_o}$  indien alle vakken bestaan uit een volledige kleidijk met een fragmentarische zode en (iii) de lengte-effect factoren nemen toe als alle vakken bestaan uit een volledige kleidijk met een fragmentarische zode.

De toename van de betrouwbaarheid is het gevolg van het feit dat aan een volledige kleidijk, ondanks een fragmentarische zode, (via de kansverdeling van kritieke overslagdebieten) een grotere sterkte wordt toegekend dan aan de (laagste) categorie van grasbekleding met objecten. Hierbij wordt opgemerkt dat in geval van grasbekleding enkel de toplaag sterkte wordt beschouwd en in geval van fragmentarische zode de gehele kleidijk (als een soort reststerkte) wordt beschouwd. Bij aanvang van deze studie was ingeschat dat de sterkte van een volledige kleidijk met een fragmentarische zode veel minder zou zijn dan de slechtste categorie grasmat met objecten: voor de grasmat zou de sterkte gedomineerd moeten zijn door de sterkte van het gras en niet de onderlagen waardoor het negeren van de sterkte van de onderlaag een goede benadering zou zijn. Dit blijkt nu (na toepassing van beide benaderingen) niet het geval: de sterkte van de onderlaag draagt significant bij aan de sterkte van grasmat plus onderlaag. Als gevolg hiervan neemt (uiteraard) de faalkans af (betrouwbaarheidsindex neemt toe) als ook deze sterkte in rekening wordt gebracht. Uit Tabel 5.12 valt op te maken dat de faalkans op trajectniveau pas toeneemt indien alle dijkvakken met een volledige kleidijk met fragmentarische zode worden geschematiseerd: klaarblijkelijk zijn de eerste twee vakken niet bepalend voor de faalkans op trajectniveau en is daarom geen effect op de faalkans/betrouwbaarheidsindex te zien. Door één of twee vakken aan te passen naar vakken met een kleidijk met fragmentarische zode neemt hun sterkte toe (betrouwbaarheidsindex wordt hoger), waardoor ze minder invloed hebben op de faalkans van het systeem.

In het geval dat de betrouwbaarheidsindex van het traject bepaald wordt door de kleidijk met fragmentarische zode, dan wordt een hogere bijdrage van de sterkte aan de faalkans gevonden:  $\alpha_{q_c}$  is groter dan  $\alpha_{f_o}$ . Deze grotere bijdrage is het gevolg van het verschil in formulering van de (onzekerheid van de) sterkte door gebruik van twee verschillende fysische niet op elkaar gekalibreerde modellen.

Tot slot wordt een groter lengte-effect gevonden indien de kleidijk met fragmentarische zode bepalend is voor de faalkans op trajectniveau. Gegeven de grotere relatieve bijdrage van de sterkte aan de faalkans is dit niet verrassend: niet alleen variatie van de belastingen maar ook variatie van de sterkte is bepalend voor de faalkans op trajectniveau. Op grond van de hier uitgevoerde analyse is het niet mogelijk om tot een generieke conclusie te komen aangaande de lengte-effect-factor in geval van situaties waarbij de kleidijk met fragmentarische zode (deels) bepalend is. Aanbevolen wordt om vooralsnog in dergelijke situaties geen gebruik te maken van de lengte-effectfactor maar om de faalkansen op vakniveau volledig probabilistisch te combineren tot een faalkans op trajectniveau.

Tabel 5.12 Resultaten van de analyse met kleidijk en fragmentarische zode voor dijktrajecten 50-1 en 8-4.

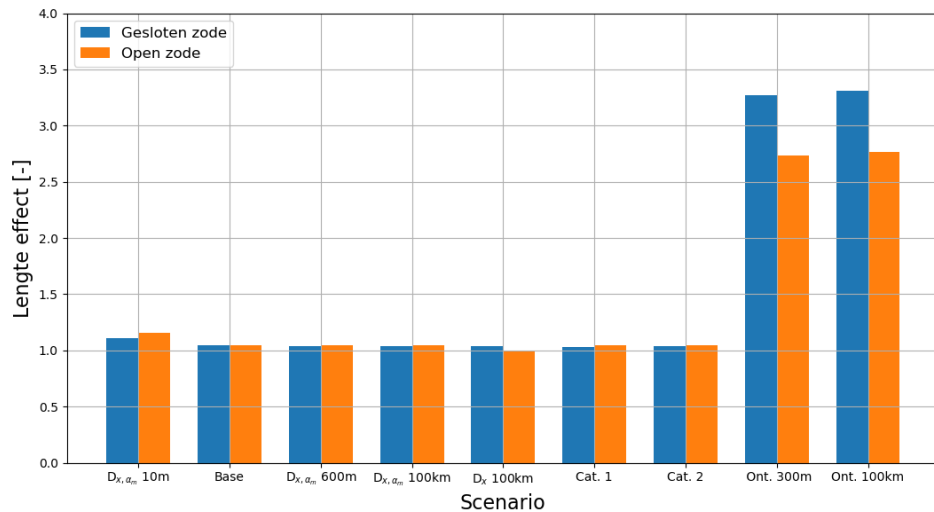
Dijktraject	Parameters	Base	Één vak met kleidijk en fragmentarische zode	Twee vakken met kleidijk en fragmentarische zode	Alle vakken met kleidijk en fragmentarische zode
50-1	$\beta$ van dijktraject (-)	3,31	3,01	3,01	3,32
	Faalkans van dijktraject (-)	$4,71 \cdot 10^{-4}$	$1,29 \cdot 10^{-3}$	$1,29 \cdot 10^{-3}$	$4,57 \cdot 10^{-4}$
	$N$ (-)	1,0	1,7	1,7	1,5
	Gekwadrateerde invloedscoëfficiënt $\alpha_{fo}^2$ (-)	0,00016	-0,062	-0,062	n.v.t.
	Gekwadrateerde invloedscoëfficiënt $\alpha_{ac}^2$ (-)	n.v.t.	0,057	0,057	0,296
8-4	$\beta$ van dijktraject (-)	3,14	3,1	3,1	3,9
	Faalkans van dijktraject (-)	$8,45 \cdot 10^{-4}$	$9,81 \cdot 10^{-4}$	$9,44 \cdot 10^{-4}$	$4,45 \cdot 10^{-5}$
	$N$ (-)	1,0	1,1	1,0	1,5
	Gekwadrateerde invloedscoëfficiënt $\alpha_{fo}^2$ (-)	0,00002	0,003	-0,003	n.v.t.
	Gekwadrateerde invloedscoëfficiënt $\alpha_{ac}^2$ (-)	n.v.t.	0,0009	0,0009	0,200

## 5.4 Conclusies

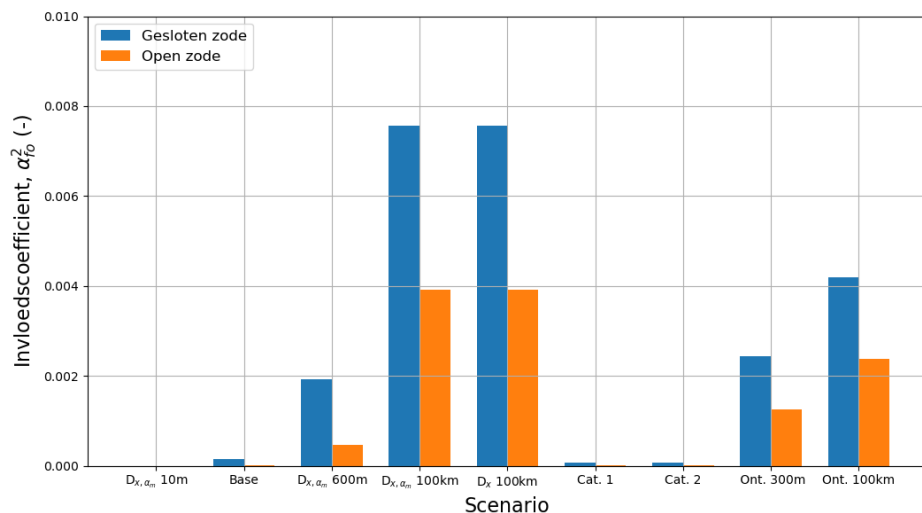
In dit hoofdstuk is het effect van het meenemen van verschillende objecten, overgangen en aanwezigheid van een kleidijk met een fragmentarische zode op de lengte-effectfactor van GEKB geanalyseerd. Dit is gedaan door gebruik te maken van de cumulatieve overbelastingmethode en het toekennen van een kansverdeling aan de invloedsfactor  $\alpha_m \alpha_a^2$  (in dit hoofdstuk geschreven als  $f_o$ ). Dijktrajecten 50-1 en 8-4 zijn hiervoor gebruikt.

Voor de aanwezigheid van objecten en overgangen is met traject 8-4 ook een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om zoveel mogelijke situaties af te hechten. Figuur 5.3 en Figuur 5.4 geven een samenvatting weer van de gevoeligheidsanalyse voor respectievelijk de lengte-effectfactor en de gekwadrateerde invloedscoëfficiënt  $\alpha_{fo}^2$  voor open en gesloten zode. De lengte-effectfactor verandert weinig en blijft in de orde van grootte van 1. Alleen bij een situatie waar alle dijkvakken ongeveer dezelfde betrouwbaarheidsindices hebben is de lengte-effectfactor drie keer hoger. Bij het beoordelen van dijken is het echter zeer ongebruikelijk om dijkvakken te hebben met dezelfde betrouwbaarheidsindices, dit speelt enkel bij ontwerp en wanneer een dijk recent versterkt is. Verder blijven de bijbehorende gekwadrateerde invloedscoëfficiënten altijd onder ongeveer 0,008. Deze maximale waarde van de invloedscoëfficiënt is gevonden bij gesloten zode en wanneer de sterkteparameters volledig gecorreleerd zijn, d.w.z. een correlatielengte van 100 km.

De gekwadrateerde invloedscoëfficiënt blijft klein omdat voor het mechanisme GEKB geldt dat om schade te krijgen allereerst een hydraulische belasting moet optreden die leidt tot overslag. Een dergelijke situatie is al zo “zeldzaam” dat de faalkans hier in sterke mate door gedomineerd is. Een variatie van de sterkte van de grasmat (of ondergrond) verandert hier niet veel aan: er is nog steeds overslag nodig die veroorzaakt wordt door een “zeldzame” hydraulische belasting. Dit effect wordt kleiner als de dijk lager is, maar dan wordt de faalkans gedomineerd door het optreden van overloop (en dus niet meer de sterkte van de grasmat). Het toekennen van een verdeling op  $f_o$  heeft dus weinig invloed op de benodigde lengte-effectfactor om de volledige probabilistische som te benaderen voor GEKB.



Figuur 5.3 Samenvatting gevoeligheidsanalyse voor de lengte-effect factor van dijktraject 8-4.

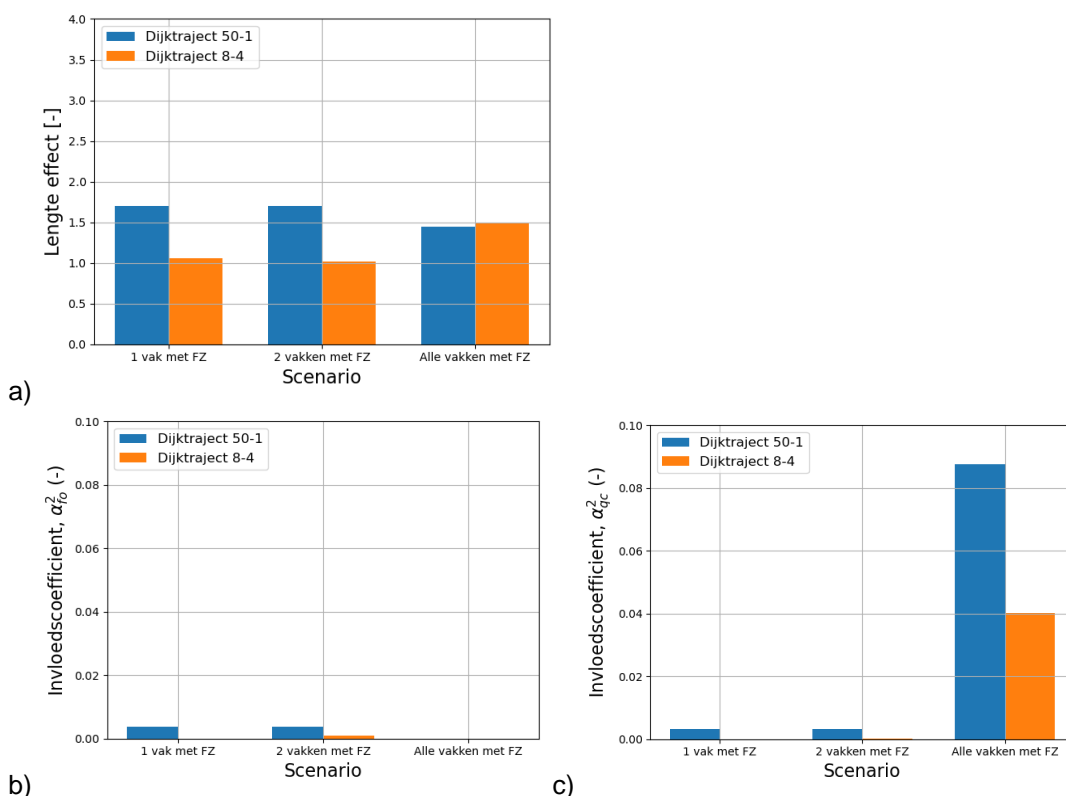


Figuur 5.4 Samenvatting gevoeligheidsanalyse voor het kwadraat van de invloedscoëfficiënt ( $\alpha_{fo}^2$ ) van dijktraject 8-4.

Verder is ook gekeken naar de invloed van een kleidijk met een fragmentarische zode op de lengte-effectfactor van GEKB. In tegenstelling tot de analyses met een open of een gesloten zode wordt in dit geval de sterkte van een kleidijk meegenomen. Dit is gedaan door één, twee en alle vakken aan te passen naar een vak (of vakken) met een kleidijk met een fragmentarische zode voor beide dijktrajecten. De faalkans van dijkvakken met een kleidijk met een fragmentarische zode is berekend door de kansverdeling van het kritische overslagdebiet aan te passen.

Figuur 5.5 geeft een samenvatting van de resultaten. Hieruit volgen drie conclusies:

- Bij een kleidijk met een fragmentarische zode nemen de betrouwbaarheidsindices toe in vergelijking tot de betrouwbaarheidsindices gevonden met COM (inclusief objecten). Dit is te verklaren omdat de kansverdeling van kritieke overslaggebieten een grotere sterkte kent dan COM. In dit kritieke overslaggebied wordt zowel de sterkte van de toplaag als van de onderlagen meegenomen in de berekening terwijl in de COM alleen de grasbekleding en de toplaag worden beschouwd. Als gevolg hiervan neemt bij een kleidijk met een fragmentarische zode de faalkans af als ook de sterkte van onderlagen in rekening wordt gebracht.
- De invloedscoefficiënt  $\alpha_{q_c}$  is groter dan  $\alpha_{f_o}$  indien alle vakken bestaan uit een kleidijk met een fragmentarische zode. Deze grotere bijdrage is het gevolg van het verschil in formulering van de (onzekerheid van de) sterkte.
- De lengte-effect factoren nemen toe als alle vakken geschematiseerd worden als een kleidijk met een fragmentarische zode. Dit is te verklaren door de grotere relatieve bijdrage van de sterkte aan de faalkans.



Figuur 5.5 Samenvatting gevoeligheidsanalyse voor de aanwezigheid van Fragmentarische Zode (FZ) voor beide dijktrajecten voor a) lengte-effect, b) gekwadrateerde invloedscoëfficiënt  $\alpha_{f_o}^2$  en c) gekwadrateerde invloedscoëfficiënt  $\alpha_{q_c}^2$

In een vergelijkbare studie voor gras op zand [27] is ook gekeken naar het effect van een verandering in de onzekere sterkte van de grasmat op de effectieve lengte-effectfactor voor GEKB. In de studie werd de verdeling van de kritische stroomsnelheid aangepast om rekening te houden met het effect van gras op zand. Hiervoor zijn in Deltares [27] simulaties van een vereenvoudigd dijksysteem gebruikt in plaats van een werkelijk traject zoals in dit onderzoek is gedaan. De gekwadrateerde invloedscoëfficiënt van de sterkteparameters werden gevarieerd tussen 0,01 en 0,1. De conclusies van beide onderzoeken zijn hetzelfde. In het algemeen wordt verwacht dat een iets grotere bijdrage van de ruimtelijke onzekerheid van de sterktevariabelen een beperkte invloed zal hebben op de effectieve lengte-effectfactor.

Uit het onderzoek van [27] bleek dat het aantal onafhankelijke windrichtingen de grootste bijdrage levert aan de lengte-effectfactor.

Hierdoor blijven de huidige lengte-effectfactoren van toepassing voor GEKB bij het meenemen van objecten en overgangen in beoordelingen. Bij aanwezigheid van fragmentarische zode op een volledige kleidijk is het echter niet mogelijk om tot een generieke conclusie te komen voor de lengte-effect-factor. Aanbevolen wordt om vooralsnog in dergelijke situaties geen gebruik te maken van de lengte-effectfactor maar om de faalkansen op vakniveau volledig probabilistisch te combineren tot een faalkans op trajectniveau.

## 6 Conclusies en aanbevelingen

### 6.1 Conclusies

In het WBI2017 werd geen rekening gehouden met de negatieve invloed van overgangen en objecten in grasbekledingen bij golfoverslag. In 2019 is in het kader van het beoordelings- en ontwerpinstrumentarium expliciet gekeken naar deze invloed, waarbij is uitgegaan van 'worst case' invloedsfactoren voor alle dijken met om het even welke overgangen en objecten ( $\alpha_a=1,4$ ;  $\alpha_M=1,8$  en  $\alpha_S=0,9$ ) [17]. In het kader van deze studie is een verfijning uitgevoerd, waarbij onderscheid is gemaakt naar verschillende typen overgangen en objecten, verschillende categorieën dijken en naar de invloed van overgangen en objecten op de te hanteren lengte-effectfactor. Bij de verschillende categorieën dijken is niet meer gebruik gemaakt van 'worst case' invloedsfactoren maar zijn onzekerheden over de invloed van diverse overgangen en objecten in rekening gebracht. Voor het bepalen van de categorisering is gebruik gemaakt van beelden van dijken vanuit de expertgroep grasbekledingen. Alle categorieën houden tenminste rekening met objecten kleiner dan 0,15 m en/ of taludtrappen en overgangen en objecten op de kruin.

Een vierde categorie dijken is geïntroduceerd waarop geen bekleding of een 'fragmentarische zode' aanwezig is maar die wel volledig uit klei bestaat en daardoor ook weerstand biedt tegen erosie door golfoverslag. Dit is een type dijk dat volgens de beelden van de expertgroep veelvuldig voorkomt, met name langs rivieren. Rondom panden bij deze dijken is geen grasbekleding aanwezig maar tuinen, bestrating, struiken en dergelijke, vallend in de categorie 'fragmentarische zode' uit [23]. Zanddijken en zanddijken met een kleibekleding met een 'fragmentarische zode' zijn buiten beschouwing gebleven. De grote onzekerheden rondom zowel het model als de erosieparameters leiden tot zeer brede kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet.

De vier categorieën dijken met overgangen en objecten staan in Tabel 6.1.

Tabel 6.1 Categorieën dijken.

Categorie	Omschrijving	Verdeling $\alpha_a^{2*} \alpha_M$ (-)	$\alpha_S$ (-)
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geen objecten &gt; 0,15 m dan wel wegovergangen op het binnentalud. Alleen taludtrappen zijn toegestaan.</li> <li>Overgangen en objecten op de kruin zijn toegestaan.</li> <li>Geen kale grond/ fragmentarische zode.</li> </ul>	Lognormaal (zwarte lijn Figuur 3.1) mu 2,35 sigma 0,15	Deterministisch 0,9
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geen objecten &gt; 0,15 m op het binnentalud. Alleen taludtrappen en wegovergangen zijn toegestaan.</li> <li>Overgangen en objecten op de kruin zijn toegestaan.</li> <li>Geen kale grond/ fragmentarische zode.</li> </ul>	Normaal, truncated maximum 3,528 (blauwe lijn Figuur 3.1) mu 2,8 sigma 0,32	Deterministisch 0,9
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Objecten en overgangen op de kruin en het binnentalud zijn toegestaan.</li> <li>Geen kale grond/ fragmentarische zode.</li> </ul>	Normaal truncated maximum 3,528 (groene lijn Figuur 3.1) mu 3,0 sigma 0,27	Deterministisch 0,9
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kale grond/ fragmentarische zode aanwezig.</li> <li>Kleidijk.</li> </ul>	Nvt Kansverdeling $q_c$ : Lognormaal zie Hoofdstuk 4	

Voor grasbekledingen met overgangen en objecten, dijkcategorie 1, 2 en 3 kan gebruik worden gemaakt van de in Tabel 6.1 gegeven kansverdelingen van  $\alpha_M^* \alpha_a^2$  (-) en  $\alpha_S$  (-) bij direct gebruik van de cumulatieve overbelasting methode. Hierbij passen dezelfde lengte-effectfactoren als momenteel worden gebruikt voor grasbekledingen bij golfoverslag [23]. De dijken kunnen bestaan uit zand met een kleibekleding, of volledig uit klei. In het geval dat het kleidijken betreft, is waarschijnlijk een nog een aanzienlijke aanvullende sterkte aanwezig.

Bij aanwezigheid van fragmentarische zode op een volledige kleidijk (categorie 4) is het niet mogelijk om tot een generieke conclusie te komen voor de lengte-effect-factor. In dergelijke situaties kan nog geen gebruik gemaakt worden van een lengte-effectfactor maar wordt aanbevolen om de faalkansen op vakniveau volledig probabilistisch te combineren tot een faalkans op trajectniveau.

Een beperkte impactstudie laat zien dat de in dit rapport aangebrachte differentiatie tussen verschillende categorieën dijken een geringe winst geeft ten opzichte van het hanteren van worst case factoren (zie Bijlage B).

## 6.2 Aanbevelingen

### **Bandbreedte en maximum $\alpha_M$**

Ten opzichte van de in een eerdere studie gebruikte 'worst case' invloedsfactoren [17] is getracht om per type overgang een beste schatting te geven van de bandbreedte. Op het gebied van de erosieve werking van golfoverslag onder invloed van overgangen en objecten bestaan echter nog kennishiaten en het aantal experimenten waarin overgangen en objecten aanwezig waren, met name type ii en iii zijn beperkt. Type ii, obstakels die uit de grasbekleding steken, blijkt naar de huidige inzichten dominant. Voor de beschrijving van de erosieve belasting lijkt enkel de frontsnelheid hier tekort te schieten, zoals blijkt uit [18]. Drukgradiënten door de impact van een golfvront op een object en verhoogde drukgradiënten over de zode rondom de hoeken van objecten spelen waarschijnlijk een grote rol bij het falen van de grasbekleding bij type ii objecten. Berekeningen volgens de volume of fluid methode idealiter gecombineerd met (schaal)proeven kunnen het benodigde inzicht geven in drukgradiënten die werken op de grasbekleding en die uiteindelijk verantwoordelijk zijn voor het falen hiervan. Piekdrukken zouden kunnen worden vergeleken met piekdrukken bij golfklappen en het erosiemodel voor golfklappen. Dit kan leiden tot een betere inschatting van de bandbreedte van  $\alpha_M$ , eventueel verdere differentiatie naar omvang en vorm van objecten en een inschatting of 1,8 inderdaad een goede inschatting van de bovengrens is. Deze bovengrenswaarde blijkt bij de analyses in dit rapport dominant voor de faalkans.

### **Differentiatie $\alpha_a$**

De versnellingsfactor  $\alpha_a$  heeft een grote invloed op (de inschatting van) de erosieve werking van golfoverslag. Deze is op het talud zelfs groter dan de invloedsfactor van de belasting  $\alpha_M$ . In de EurOtop Manual [12] worden rekenregels gegeven om deze factor nader te differentiëren op de kruin (vertraging) en het talud. Met deze rekenregels zou voor de 68 door de expertgroep grasbekledingen aangeleverde beelden van dijken kunnen worden gedifferentieerd naar locatie van de overgang of het object in het dijkprofiel, hetgeen zou leiden tot aangepaste histogrammen en gefitte verdelingen voor de factor  $\alpha_M^* \alpha_a^2$ .

### **Erosie kleikern**

De validatie van het kliferosiemodel is momenteel zeer mager, met name voor golfoverslagbelastingen (1 proef beschikbaar). Vanwege het weinige vergelijkingsmateriaal voor de Nederlandse omstandigheden bij dijken en de bandbreedte van parameters uit [19] was het niet goed mogelijk om te differentiëren naar kleisoorten, bijvoorbeeld naar zandgehalte, plasticiteitsparameters of de (hiervan mede afhankelijke) erosiebestendigheidscategorie. Ondanks de grote bandbreedte die aan de parameters is

toegekend en de modelonzekerheid, volgt toch een aanzienlijke potentiële sterkte van een kleikern. Momenteel lopen er golfoverslagproeven naar erosie van klei in de Hedwige- en Prosperpolder en deze zouden voor validatie kunnen worden gebruikt. Daarnaast zijn er na de stormvloed van 1953 schadeopnamen gedaan langs in elk geval de Lek en Hollandse IJsseldijk. Hier is zeker golfoverslag en in sommige gevallen mogelijk ook overloop in combinatie met golven opgetreden. Door deze omstandigheden na te rekenen kan een bandbreedte van de hydraulische belasting worden gegenereerd en kan deze dienen als validatie voor het erosiemodel. De relevante gegevens voor het narekenen zijn tot op zekere hoogte nog te achterhalen; het waterstandsverloop bij Gouda, historische windgegevens van de KNMI en de dijkhoogte en dwarsprofielen uit metingen voor en na de stormvloed.

### **Verbinding beheer, onderhoud en ontwerp met betrekking tot overgangen en objecten (multifunctioneel gebruik dijken)**

Aanbevolen wordt voor het beoordelen en ontwerpen van dijken een visie te ontwikkelen met betrekking tot overgangen en objecten in de (gras)bekleding. Hierbij moet expertise vanuit de veiligheidsbeoordeling en de dagelijkse praktijk van het beheer en onderhoud worden betrokken. Overgangen en objecten vormen een bewezen zwakke schakel in de grasbekleding en een bekleding is maar zo sterk als de zwakste schakel. De veiligheidswinst van het realiseren van hectaren aan erosiebestendige grasbekleding kunnen worden te niet gedaan door een enkel object, wegovergang, boom et cetera. Anderzijds is het onvermijdelijk dat meervoudig ruimtegebruik leidt tot een keur aan objecten op de dijk.

Hierbij gaat het niet alleen om overgangen en objecten die netjes aansluiten op de grasbekledingen en daarom mee kunnen worden genomen in de veiligheidsbeoordeling (met alle bijbehorende kanttekeningen) maar vooral ook om die overgangen waarbij de overgang niet 'netjes' is. In de huidige praktijk komt dit vaak voor, zoals ook te zien op het aangeleverde beeldmateriaal van de expertgroep grasbekledingen. Voor een redelijke garantie op nette aansluitingen op overgangen en objecten zal waarschijnlijk een flinke extra inspanning in beheer en onderhoud nodig zijn, beperkt gebruik van de dijk, of een robuuster/andersoortig ontwerp, waarbij overgangen en objecten worden versterkt, zodanig ze geen zwakke plek meer vormen. Op dit moment lijken de werelden van dagelijkse praktijk en rekenregels nog niet goed op elkaar aangesloten.



## 7 Referenties

- [1] Plan van aanpak overgangen en objecten GEKB, memo Deltares projectnummer 11205263, d.d. 16 oktober 2020.
- [2] Evaluation and Model Development, Grass Erosion Test at the Rhine dike, Deltares projectnummer 1207811-002, versie 2, December 2013
- [3] Vloeistofmechanica b70 collegehandleiding, J.A. Battjes, TU Delft Faculteit der Civiele Techniek, januari 1989
- [4] Handreiking Toetsen Grasbekledingen op Dijken t.b.v. het opstellen van het beheerdersoordeel (BO) in de verlengde derde toetsronde, Rijkswaterstaat ministerie van Infrastructuur en Milieu, 25-10-2012
- [5] WTI 2017 Onderzoek en ontwikkeling landelijk toetsinstrumentarium Product 5.8 Validatie erosiebestendigheid, Versie 2 definitief, Deltares kenmerk 1209437-003, juni 2015
- [6] STRENGTH OF THE GRASS SOD ON DIKES DURING WAVE OVERTOPPING, MASTER THESIS, R.W. Bijlard, May 21, 2015
- [7] FACTUAL REPORT PRAKTIJKPROEVEN GRAS OP ZAND, Infram Hydren, projectnummer 19i824, d.d. 8 juni 2021
- [8] Analyse en duiding golfverslagproeven IJsseldijk, Infram-Hydren, 19i814, Versie: 4.0, 5 oktober 2020
- [9] Overgang harde bekleding naar gras in de golfploopzone, Deltares nummer 11203720-016, versie 1 definitief, december 2019.
- [10] WTI Onderzoek en ontwikkeling landelijk toetsinstrumentarium, Product 5.12 Analyses grass erosion in wave run-up and wave overtopping conditions, Deltares projectnummer 1209437-005, versie 3 definitief maart 2015
- [11] Factual Report: Golfploopproeven Noord-Beveland, Infram projectnummer 13i084, definitief versie 1.3, 23-5-2014.
- [12] EurOtop, 2018. Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B., [www.overtopping-manual.com](http://www.overtopping-manual.com).
- [13] Onderbouwing kansverdelingen kritisch overslagdebiet ten behoeve van het OI2014v4, Rapport 1230090-011-GEO-0006, A. van Hoven, Deltares, J.M. van der Meer; van der Meer Consulting, februari 2017
- [14] MODELLING TRANSITIONS IN GRASS COVERS TO QUANTIFY WAVE OVERTOPPING EROSION, Jord J. Warmink, Vera M. Van Bergeijk, Marc Frankena, Paul van Steeg, Suzanne J.M.H. Hulscher, ICCE 2020 proceedings
- [15] Overflow and wave overtopping induced failure processes on the land-side slope of a dike, Ponsioen, L.A., Master thesis
- [16] FACTUAL REPORT OVERSLAGPROEF WIJMEERS 2, Infram, 15i058, versie 1.0 definitief, 1-12-2015
- [17] BOI Omgaan met overgangen bij faalmechanisme gras erosie kruin en binnentalud Korte studie naar kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet inclusief overgangen, Deltares projectnummer 11203720-025, versie 1.0 november 2019
- [18] Over the Dike top: Modelling the Hydraulic Load of Overtopping Waves including Transitions for Dike Cover Erosion, Van Bergeijk, V.M., ISBN: 978-90-365-5341-4, 2022
- [19] NRCS 1997 National Engineering Handbook part 628 Dams. chapter 51 Earth Spillway Erosion Model and Chapter 52 Field Procedures Guide for the Headcut

Erodability Index. Natural Resources Conservation Service. 210-vi-NEH. August 1997

- [20] Residual dike strength after macro-instability, WTI 2017, Deltares projectnummer 1207811-013, versie 2 april 2014
- [21] Evaluation of Numerical Models for Simulating Embankment Dam Erosion and Breach Processes, Dam Safety Technology Development Program, Report number DSO-2017-02, Department of the Interior, Bureau of Reclamation, august 2017
- [22] Het kwantificeren van binnenwaartse stabiliteit inclusief vervolgemechanismen. Een faalpadenstudie voor dijkversterking Streefkerk - Ameide - Fort Everdingen, Deltares projectnummer 11205740, versie 2.0, 27 juli 2021
- [23] Schematiseringshandleiding grasbekleding, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, versie 5.0 definitief 28 mei 2021 ([www.helpdeskwater.nl](http://www.helpdeskwater.nl))
- [24] Factual report: overslagproeven rivierenland, Infram projectnummer 12i071, versie 1.0, 4-7-2013
- [25] Evaluation and Model Development, Grass Erosion test at the Rhine dike, Deltares projectnummer 1207811-002, versie 4, maart 2015
- [26] Probabilistisch beoordelen en ontwerpen grasbekleding – samenvoegen GEBU en GEKB. Deltares rapport met kenmerk 11206202-002-HYE-0001, 12 juni 2021.
- [27] Rekenwaarden erosieparameters gras op zand bekledingen – Bijlage H Inschatting lengte-effectfactoren gras op zanddijken (GEBU/GEKB). Deltares rapport met kenmerk 11204369-002-GEO-0019, 16 december 2021.
- [28] Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium (BOI), 2019. Software for the assessment of primary flood defences Hydra-Ring 19.1, Technical Reference Manual.

# A Narekenen $\alpha_M$ overgang weg - gras

Er zijn enkele grootschalige erosieproeven uitgevoerd op de overgang tussen een relatief gladde verharding (beton of asfalt) en een grasbekleding. In deze bijlage worden deze nagerekend met de cumulatieve overbelastingmethode om  $\alpha_M$  terug te rekenen.

## A.1 Vechtdijk proeven winter 2020-2021

### A.1.1 Korte samenvatting proefopzet

Referentie rapportage van de proeven [7].

**Locatie:** Overijsselse Vechtdijk nabij Berkum, traject 53-3 dijkpaal 103,4.

**Overgang:** asfalt fietspad op de kruin. Grasbekleding ligt iets lager dan het oppervlak van de weg (Figuur A.1). Het asfalt was recent aangelegd. Het hoogteverschil was met grond aangevuld om een geleidelijke overgang te maken naar de dijk. Deze losse grond lag er enkele maanden en spoelde bij de eerste paar volumes weg. De onderliggende grasbekleding was verkleurd vanwege deze afdekking maar had nog wel sterkte. Onbekend is of en eventueel in welke mate het gras hierdoor was verzwakt. Bijzonder is dat de grasbekleding op een substraat van zand groeit.

Tijdens de proeven is waargenomen dat de stroming op de rand van het asfalt soms losliet, of in elk geval dat er een luchtinsluiting ontstond langs de rand van het asfalt. Zie de screenshots van een film van een overslagvolume dat over de rand van het asfalt stroomt (Figuur A.1).



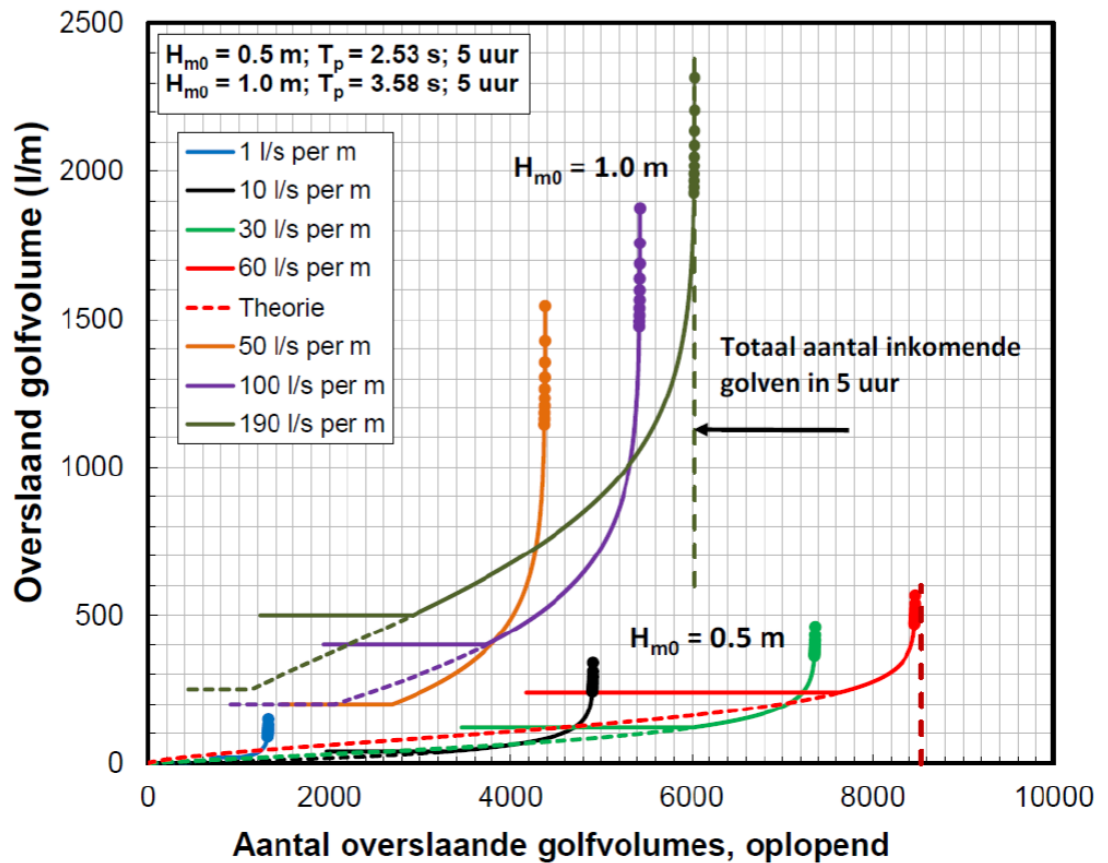
Overgang asfalt – gras  
Screenshot van film  
**1** Voor golf, detail overgang  
**2** Golf iets achter het front.  
Stroming laat los van asfalt  
**3** Staart van golf, stroming ligt  
weer aan

Figuur A.1 Screenshots van film van golfoverslagvolume die over de rand van het asfalt stroomt. Bij grote volumes liet de stroming los (lucht onder de stroming langs de asfaltrand).

**Belasting:** De golfoverslagproeven zijn uitgevoerd met de volgende belasting, tot het einde van de belasting, of tot bezwijken van de grasbekleding (Tabel A.1 en grafisch Figuur ).

Tabel A.1 Karakterisering opgelegde golfoverslagbelasting.

Significante golfhoogte (m)	Overslagdebiet (l/s per m)	Duur (uur)	Aantal overslagvolumes (-)	Schatting grootste volume (l/m)
0,5	1	5	1318	147
0,5	10	5	4909	339
0,5	30	5	7360	462
0,5	60	5	8471	567
1,0	50	5	4376	1546
1,0	100	5	5432	1875
1,0	190	5	6032	2360



Figuur A.2 Discretisatie van overslagvolumes volgens theorie en gesimuleerd.

De belastingstappen worden in de navolgende tekst verkort aangeduid. De proef GO190\_1,0 betekent een golfoverslagproef bij een golfoverslagdebiet van 190 l/s per m bij een gesimuleerde golfhoogte van 1,0 m.

**Strook 1-1A – Golfploopsimulator.** Er is geen falen van de grasbekleding opgetreden, wel schade. Dit was echter niet direct bij de overgang maar een stukje er overheen (Figuur ). Onderaan het talud was een vergelijkbare schade. De schade trad op na 3 uur GO190\_1,0.



Figuur A.3 Schade einde proef locatie 1-1A.

**Strook 1-2 – Golfploopsimulator.** Er is schade en falen van de grasbekleding opgetreden. Dit was niet direct bij de overgang maar net als bij strook 1-1A een stukje er overheen (Figuur ). Eerste schade trad op na 5 uur GO050\_1,0. Falen was na 1,5 uur GO190\_1,0.



Figuur A.4 Schade (1) falen (2) en ontwikkeling van de schade na falen (3) op strook 1-2.

**Strook 1-1B – Golfoverslagsimulator:** Ten opzichte van de golfoploopsimulator, welke werd ingezet als golfoverslagsimulator zijn de gegenereerde frontsnelheden iets lager. Er is een eerste schade opgetreden na 5 uur GO190\_1,0, onderaan het talud (Figuur A.5Schade onderaan het talud strook 1-1b). Bij de overgang is geen schade opgetreden.



Figuur A.5Schade onderaan het talud strook 1-1b.

### A.1.2 Terugrekenen $U_c$ en $\alpha_M$

Met behulp van de cumulatieve overbelastingmethode is de  $U_c$  van de grasbekleding teruggerekend. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de grasbekleding op de kruin nabij de overgang tussen gras en asfalt, inclusief het afgedekte deel van het gras en de grasbekleding op het talud. Voor het terugrekenen is gebruik gemaakt van relaties tussen het losgelaten volume en de frontsnelheid op een bepaalde plek. De relaties zijn afgeleid van metingen van de frontsnelheid over de kruin en het talud.

Gezien de plek waar schade en falen optrad kan worden geconcludeerd dat de combinatie van de hoogste belasting en zwakste plek in de bekleding niet direct tegen het asfalt aan ligt maar enkele decimeters van deze rand af. De  $\alpha_S$  verdisconteert het doorsneden zijn van de zode tegen een object, echter daar is op deze plek geen sprake van. Wel is het mogelijk en aannemelijk dat het gras in zekere mate is verzwakt door de afdekking. Dit wordt echter niet met de  $\alpha_S$  in rekening gebracht maar door een lagere  $U_c$ .

Voor strook 1-1a, geeft het criterium geen falen van het talud dat  $U_c$  groter was dan 6,4 m/s. Schade onderaan het talud ( $D=1000$ ) geeft  $U_c = 6,9$  m/s, waarbij opgemerkt dat het ontstaan van schade als criterium minder nauwkeurig is dan het criterium van falen van de grasbekleding. Uitgaande van een  $U_c$  rondom 6,9 m/s is gekeken met welke combinaties van  $\alpha_S$  en  $\alpha_M$  schade en geen falen bij de overgang zou kunnen worden verklaard. De schade trad op niet strak tegen het asfalt aan, waardoor  $\alpha_S$  gelijk aan 1 zou kunnen worden genomen, echter door de afdekking van het gras is mogelijk toch een verzwakking opgetreden. Omdat dit niet komt door het niet vastzitten van het gras aan één zijde is dit effect bekeken door  $U_c$  wat te variëren. Voor de volledigheid is ook het resultaat met  $\alpha_S=0,9$  toegevoegd (Tabel ).

Tabel A.2 Teruggerekende  $\alpha_M$  voor strook 1-1a.

Strook	Criterium	U <sub>c</sub> (m/s)	$\alpha_s$ (-)	$\alpha_M$ (-)
1-1a Buitentalud Berkum asfalt – gras kruin	Schade (D=1000) geen falen (D>7000)	6,9	1,0 1,0	1,90 <2,1
	Schade (D=1000) geen falen (D>7000)	6,0 (verzwakt door afdekking)	1,0 1,0	1,46 <1,7
	Schade (D=1000) geen falen (D>7000)	5,0 (verzwakt door afdekking)	1,0 1,0	1,25 <1,4
	Schade (D=1000) geen falen (D>7000)	6,9	0,9 0,9	1,72 <1,9

De teruggerekende  $\alpha_M$  is logischerwijs behoorlijk afhankelijk van de U<sub>c</sub> van het gras langs het asfalt. De onzekerheid hierin is erg groot en daarmee ook de onzekerheid in de teruggerekende  $\alpha_M$ . Een waarde tussen 1,2 en 1,9 is mogelijk.

Omdat geen falen van de grasbekleding op het talud heeft plaatsgevonden op strook 1-2 wordt teruggerekend dat U<sub>c</sub> hier groter was dan 7,1 m/s. Bij de overgang is falen opgetreden. Ook hier was dit niet direct op de aansluiting tussen asfalt en gras maar op de rand van waar de aanaarding heeft gelegen. Evenals voor strook 1-1a is voor enkele waarden U<sub>c</sub> de  $\alpha_M$  teruggerekend. De resultaten hiervan staan in Tabel .

Tabel A.3 Teruggerekende  $\alpha_M$  voor strook 1-2.

Strook	Criterium	U <sub>c</sub> (m/s)	$\alpha_s$ (-)	$\alpha_M$ (-)
1-2 Buitentalud Berkum asfalt – gras kruin	Falen (D=7000)	7,1	1,0	1,83
	Falen (D=7000)	6,0 (verzwakt door afdekking)	1,0	1,34
	Falen (D=7000)	5,0 (verzwakt door afdekking)	1,0	<1,0
	Falen (D=7000)	7,1	0,9	1,66

De teruggerekende  $\alpha_M$  is afhankelijk van de eventuele verzwakking van het gras onder de afdekking. Een verzwakking van orde 2 m/s of meer in U<sub>c</sub> is onwaarschijnlijk, omdat de overgang in dat geval een reductie van de belasting zou betekenen ( $\alpha_M < 1$ ). Uit de berekeningen blijkt dat het proefresultaat kan worden verklaard door een grote range van  $\alpha_M$ , tussen circa 1 en 1,9.

Voor strook 1-1b, beproefd met de golfoverslagsimulator bij wat lagere frontsnelheden, is geen falen opgetreden op het talud. De minimale U<sub>c</sub> is volgens het criterium van niet falen 5,2 m/s. Op basis van eerste schade wordt berekend 5,6 m/s, lager dan circa 7 m/s voor stroken 1-1a en 1-2. Op de overgang van asfalt naar gras is geen schade of falen opgetreden. De resultaten van de teruggerekende  $\alpha_M$  staan in Tabel .

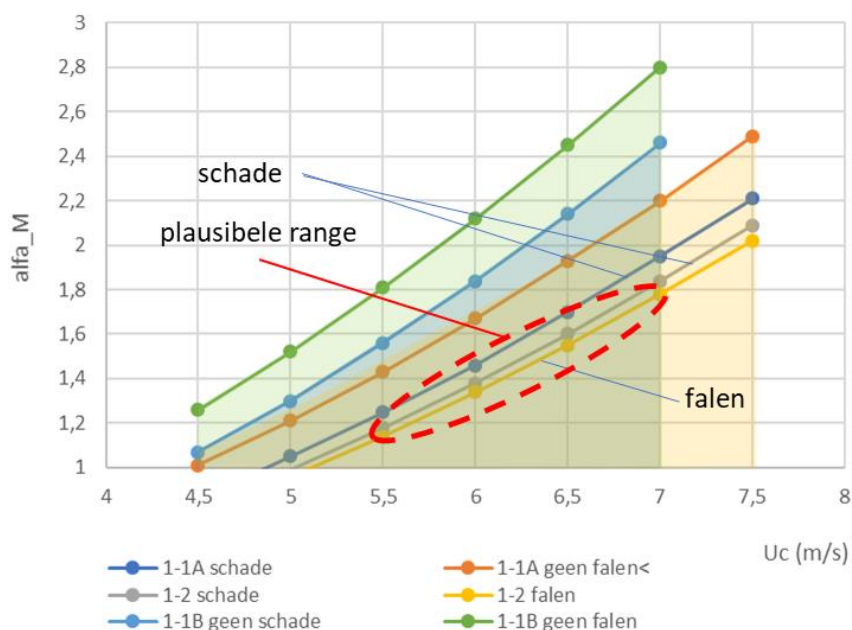
Tabel A.4 Teruggerekende  $\alpha_M$  voor strook 1-1b.

Strook	Criterium	Uc (m/s)	$\alpha_S$ (-)	$\alpha_M$ (-)
1-1b Buitentalud Berkum asfalt – gras kruin	Geen schade (D>1000) Geen falen (D>7000)	5,6	1,0	<1,61 <1,87
	Geen schade (D>1000) Geen falen (D>7000)	7,0 (vergelijkbaar strook 1-1a en 1-2_)	1,0	<2,46 <2,80
	Geen schade (D>1000) Geen falen (D>7000)	5,0 (verzwakt door afdekking)	1,0	<1,30 <1,52
	Geen schade (D>1000) Geen falen (D>7000)	5,6	0,9	<1,46 <1,70

Het niet falen van de overgang op vergelijkbare wijze als bij strook 1-2 (met  $\alpha_S=1,0$ ) is verklaarbaar bij een  $\alpha_M < 1,9$ , zonder verzwakking op de overgang. Een verzwakking tot  $U_c=5,0$  m/s geeft vanwege niet falen  $\alpha_M < 1,5$ . Deze verzwakking lijkt gezien het resultaat van strook 1-2 echter onwaarschijnlijk. Omdat er ook geen schade is opgetreden kan de schatting iets worden aangescherpt, namelijk  $< 1,6$  indien er geen verzwakking was van de overgang. Wederom wordt opgemerkt dat het criterium van schade minder betrouwbaar is dan het criterium van falen van de grasbekleding.

Indien de erosiebestendigheid van strook 1-1b vergelijkbaar zou zijn met 1-1a en 1-2 met een  $U_c$  van 7,0 m/s, dan leidt dit tot een  $\alpha_M$  die kleiner moet zijn geweest dan 2,5. Dit resultaat voegt logischerwijs weinig toe aan de mogelijk waarden van  $\alpha_M$  die gelden voor deze overgang.

De proefresultaten lijken niet eenduidig met betrekking tot de invloedsfactor voor de overgang tussen asfalt en grasbekleding. De resultaten voor de drie proefstroken zijn met aanvullende combinaties van  $U_c$  en  $\alpha_M$  in een grafiek gezet,  $U_c$  op de horizontale as en  $\alpha_M$  op de verticale as. Voor resultaten waarbij geen falen of geen schade is opgetreden is berekend wat de invloedsfactor maximaal is, onder het maximum is een doorschijnend blok getekend in dezelfde kleur als de lijn voor het maximum (Figuur ).



Figuur A.6 Combinaties van  $U_c$  (m/s) en  $\alpha_M$  (-) die verklarend zijn voor de waarnemingen bij golfverslagproeven op de stroken 1-1A, 1-2 en 1-1B op de Vechtdijk.



De lijnen en bijhorende blokken voor 'niet falen' en 'geen schade' onderstrepen de ligging van de lijnen voor 'schade' en 'falen' maar helpen verder nauwelijks met het inkaderen van de waarde van de invloedsfactor  $\alpha_M$ . Het meest waardevol de lijnen voor 'schade' (1-1A en 1-2) en bovenal die voor 'falen' (1-2). Te zien echter dat een vrij grote range van combinaties van  $U_c$  en  $\alpha_M$  verklarend zijn. Vanwege de vergelijkbare belasting liggen de lijnen bijna parallel aan elkaar, waardoor er geen unieke combinatie van  $U_c$  en  $\alpha_M$  is aan te wijzen. Uitgaande van een  $U_c$  van 5,5 à 7 m/s, kan  $\alpha_M$  in de range van 1,15 tot 1,8 liggen.

### A.1.3 Conclusie

De range van  $\alpha_M$  die verklarend kan zijn voor de proefresultaten is ruim en ligt waarschijnlijk tussen 1,15 en 1,8. Omdat de drie proefstroken met een vergelijkbare belasting zijn beproefd is het niet mogelijk om met de resultaten een unieke combinatie van  $U_c$  en  $\alpha_M$  te bepalen. Bijzonder bij deze proef was dat het om een grasbekleding op een substraat van zand ging. De overgang zelf was bijzonder, vanwege de afdekking van het gras om het hoogteverschil tussen fietspad en dijk te overbruggen. Zulke hoogteverschillen zijn in de praktijk niet ongewoon maar wel ongewoon is de afdekking van het gras langs het pad en de verzwakking hierdoor.

## A.2 IJsseldijk project Zwolle – Olst

### A.2.1 Korte samenvatting

In het kader van het dijkverbeteringsproject Zwolle Olst zijn golfoverslagproeven uitgevoerd op vier teststroken. De proeven zijn gerapporteerd in [8]. Voor gedetailleerde informatie wordt verwezen naar dit rapport. Onderstaande figuren en tabellen zijn uit dit rapport overgenomen. De proeflocatie met de vier stroken is weergegeven in Figuur .



Figuur A.7 IJsseldijk locaties teststroken, betonpad op de kruin.

De grasmat betreft een 'gesloten zode' volgens de WBI2017 beoordeling. Het substraat bestaat uit zand, waarbij opgemerkt dat enkele beproefde monsters op de grens tussen zand en klei in zitten, voor wat betreft het lutumgehalte. Het lutumgehalte is hoger dan bij de Vechtdijk.

De golfoverslagbelasting is weergegeven in Tabel , overgenomen uit [8]. De gesimuleerde golfhoogte  $H_{m0}$  was 1,0 m, een piekperiode van 3,58 s en een buitentaludhelling van 1:3. De duur per stormconditie was 5 uur. Er is gebruik gemaakt van de golfoverslagsimulator.

Tabel A.5 Karakterisering van de opgelegde belasting.

Teststrook	Proef	q [l/s per m]	Stormduur	N [-]	ΣN [-]	V [m <sup>3</sup> ]	ΣV [m <sup>3</sup> ]
1	GO1	1	5 uur	293	7.097	72	7.514
	GO10	10	5 uur	1.560		720	
	GO30	30	5 uur	2.239		2.160	
	GO50	50	6 uur 20 minuten	3.005		4.561	
2	GO1	1	5 uur	293	7.520	72	6.913
	GO5	5	5 uur	1.056		360	
	GO10	10	5 uur	1.560		720	
	GO30	30	5 uur	2.239		2.160	
	GO50	50	5 uur	2.372		3.601	
3	GO1	1	5 uur	293	6.444	72	6.553
	GO10	10	5 uur	1.560		720	
	GO30	30	5 uur	2.239		2.160	
	GO50	50	5 uur	2.372		3.601	
4	GO1	1	5 uur	293	5.265	72	3.817
	GO10	10	5 uur	1.560		720	
	GO10*	10	5 uur	1.560		720	
	GO30**	30	2 uur	901		864	
	GO50**	50	2 uur	951		1.441	

\* met aangebrachte schade

\*\* met aangebrachte schaden en wegsteken opstaande grasrand overgang

#### Resultaat strook 1

Aan het einde van de proef is er een kier ontstaan op de overgang tussen het betonpad en de grasbekleding. Dit kan worden gezien als het begin van schade, waarbij de kanttkening dat dit discutabel is, omdat het niet helemaal duidelijk is of de zode al aan het afstropen is, of er alleen sprake is van een kier. Bij andere proeven wordt voor 'begin schade' veelal het moment aangehouden waarop duidelijk sprake is van het begin van het afstropen van de zode.



Figuur A.8 Strook 1, overgang betonpad en grasbekleding eind van de proef.

Op het talud was geen sprake van schade. Tussen de teen van het talud en de sloot is een strook ruigtebegroeiing en bomen aanwezig. Hier trad wel erosie op maar geen falen.

#### Resultaat strook 2

Bij deze teststrook was het gras meer dan bij strook1, een stukje over het betonpad gegroeid. Deze overgroei werd door de stroming gegrepen en vormde de start van het afstropen van de zode stroomafwaarts. Het moment na 4 uur proef G05 kan worden gezien als 'begin schade'. De schade ontwikkelt zich tijdens de proef verder maar leidt op deze overgang niet tot falen (Figuur ).



Figuur A.9 Strook 2, schade overgang betonpad naar gras na 4 uur GO5 (links) en 5 uur GO50 (rechts).

Op het talud was sprake van veel molactiviteiten. Molshopen worden van het talud gespoeld. In vak 7B treedt begin van schade op na 2 uur GO30. Daarna breidt de schade zich verder uit tot falen van de toplaag na 5 uur GO50. De toplaag is op dat moment doorgebroken, zij het dat het gaatje heel klein is (Figuur ).



Figuur A.10 Begin schade na 2 uur GO30 (links) en doorbraak toplaag ter plaatse van de rode cirkel na 5 uur GO50 (rechts).

Tussen de teen van het talud en de sloot is een strook ruigtebegroeiing en bomen aanwezig. Hier trad wel erosie op maar geen falen.

### Resultaten strook 3

Hier is de simulator met de uitstroomopening op de buitenkruin gezet, zodat zowel de overgang van gras naar betonpad als vervolgens van betonpad naar gras is meegenomen.

Het gras was iets over het beton heen gegroeid. Aan de buitenzijde, op de overgang van gras naar beton, drukte de stroming het gras op het beton. Hier trad geen schade op. Op de overgang van beton naar gras werd het gras iets opgelicht van het beton. De stroming trok echter niet hard genoeg aan het gras om het los te trekken of de zode af te stropen. Ook hier was geen sprake van 'begin van schade'.

Op het talud is geen schade opgetreden. Molshopen zijn bij de eerste proef weggespoeld. Daarna werden de gangen zichtbaar en trad enige slijtage op waardoor de gangen beter zichtbaar werden.

Tussen de teen van het talud en de sloot is een strook ruigtebegroeiing en bomen aanwezig. Hier trad wel erosie op maar geen falen.

### Resultaten strook 4

Evenals bij strook 2 was het gras hier over het beton gegroeid. Aan het einde van GO1 had de stroming dit deel van het gras los gespoeld en was de graszode in de richting van het talud gaan afstropen (begin schade). Tot aan het einde van de proef na 2 uur GO50 heeft dit echter niet geleid tot falen van de toplaag.



Figuur A.11 Strook 4, schade overgang betonpad naar gras na 5 uur GO1 (links) en 2 uur GO50 (rechts).

Op het talud is geen schade en geen falen opgetreden. Na de proef GO10 is er een schade aangebracht in de vorm van twee rond gaten met een diameter van 0,3 m en een diepte van 0,3 m. Deze schade is gedurende de rest van de proef iets uitgebreid maar dit heeft niet tot falen van de toplaag geleid.

Tussen de teen van het talud en de sloot is een strook ruigtebegroeiing en bomen aanwezig. Hier trad wel erosie op maar geen falen.

### A.2.2 Terugrekenen $U_c$ en $\alpha_M$

In [8] worden de volgende  $U_c$  berekend:

Strook 1 >5,4 m/s (geen falen).

Strook 2 5,1 à 5,7 m/s falen (afhankelijk van gehanteerde frontsnelheden).

Strook 3 >4,0 m/s (geen falen; lagere snelheden door positie simulator op buitenkruin).

Strook 4 >5,0 m/s (geen falen).

Het effect van de overgang van het betonpad naar het gras is niet apart in rekening gebracht [8]. Beredeneerd wordt dat deze overgang niet doorslaggevend is voor de kans op falen van de grasbekleding ten opzichte van het talud. De mogelijkheid bestaat wel dat de overgang zwakker is ( $\alpha_S < 1$ ) en dat de belasting ten opzichte van de belasting op de kruin hoger is ( $\alpha_M > 1$ ), echter de combinatie van de verzwakking en de verhoging van de belasting op de overgang is ondergeschikt aan de hogere belasting door versnelling van de stroming op het talud.

In het kader van deze studie is expliciet gekeken naar mogelijke waarden van  $\alpha_M$  die in samenhang met mogelijke waarden van  $U_c$  verklarend zijn voor de proefwaarnemingen.

#### Strook 1

Voor strook 1 wordt op basis van de maximale frontsnelheden op het talud een minimale  $U_c$  van 5,4 m/s berekend. Voor enkele waarden van de  $U_c$  boven deze minimale waarde en voor het criterium van 'begin schade' en 'niet falen' zijn verklarende  $\alpha_M$  berekend. Hierbij is uitgegaan van een  $\alpha_S$  van 0,9 (-), omdat het gras niet hecht aan het betonpad. De resultaten staan in Tabel .

Tabel A.6 Teruggerekende  $\alpha_M$  voor strook 1.

Strook	Criterium	$U_c$ (m/s)	$\alpha_S$ (-)	$\alpha_M$ (-)
1	Schade (D=1000) Geen falen (D<7000)	5,4	0,9	1,38 <1,56
	Schade (D=1000) Geen falen (D<7000)	5,8	0,9	1,57 <1,78
	Schade (D=1000) Geen falen (D<7000)	6,2	0,9	1,78 <2,0

Indien wordt uitgegaan van de minimale waarde van de  $U_c$  dan volgt voor het criterium van begin van schade een  $\alpha_M$  van circa 1,4 (-). Omdat er geen falen was is  $\alpha_M$  kleiner dan 1,56 bij deze lage schatting van  $U_c$ . Voor oplopende waarden van  $U_c$  (5,4 m/s is de minimale waarde), neemt de benodigde  $\alpha_M$  om het proefresultaat te verklaren toe tot ruim 1,5 bij de bovengrens van de  $U_c$  gevonden voor strook 2 van 5,7 m/s.

#### Strook 2

Voor strook 2 wordt op basis van falen van de bekleding aan het einde van de proef een  $U_c$  van 5,1 à 5,7 m/s berekend. Afhankelijk van de gehanteerde frontsnelheden. Voor enkele waarden van de  $U_c$  in deze range en voor het criterium van 'begin schade' (na 4 uur GO5) en 'niet falen' zijn verklarende  $\alpha_M$  berekend. Hierbij is uitgegaan van een  $\alpha_S$  van 0,9 (-), omdat het gras niet hecht aan het betonpad. De resultaten staan in Tabel .

Tabel A.7 Teruggerekende  $\alpha_M$  voor strook 2.

Strook	Criterium	U <sub>c</sub> (m/s)	$\alpha_s$ (-)	$\alpha_M$ (-)
2	Schade (D=1000) Geen falen (D<7000)	5,1	0,9	1,76 <1,42
	Schade (D=1000) Geen falen (D<7000)	5,4	0,9	1,94 <1,58
	Schade (D=1000) Geen falen (D<7000)	5,7	0,9	2,13 <1,74

Indien wordt uitgegaan van een U<sub>c</sub> aan de onderkant van de range van 5,1 m/s dan volgt uit het niet falen dat  $\alpha_M$  kleiner was dan circa 1,4 (-). Voor het criterium van eerste schade wordt een  $\alpha_M$  teruggerekend van bijna 1,8. Dit is met elkaar in tegenspraak. Hetzelfde geldt voor de hogere waarden van U<sub>c</sub> binnen de in [8] gegeven range op basis van falen van de grasbekleding op het talud.

Zoals eerder opgemerkt wordt het criterium van eerste schade gezien als minder betrouwbaar dan falen van de toplaag. Het omklappen van de over het beton groeiende gras gaat relatief makkelijk en geeft een aangrijpingspunt om de zode vanaf de overgang los te trekken, leidend tot eerste schade. Dit effect is niet verwerkt in de theoretische achtergrond van de  $\alpha_M$  voor een dergelijke overgang. Uitgaande van het criterium van niet falen kan worden gesteld dat  $\alpha_M$  kleiner was dan 1,7 en waarschijnlijk kleiner dan 1,6.

### Strook 3

Bij strook 3 stond de overslagsimulator op de buitenkruinlijn. De frontsnelheden op de overgang tussen betonpad en gras waren hierdoor later. Vanwege de lage frontsnelheden wordt op het talud een minimale U<sub>c</sub> van slechts 4 m/s berekend op basis van niet falen. Er is tevens geen schade opgetreden. Voor enkele waarden van de U<sub>c</sub> boven deze minimale waarde zijn verklarende  $\alpha_M$  berekend voor het niet optreden van schade en niet falen. Hierbij is uitgegaan van een  $\alpha_s$  van 0,9 (-), omdat het gras niet hecht aan het betonpad. De resultaten staan in Tabel .

Tabel A.8 Teruggerekende  $\alpha_M$  voor strook 3.

Strook	Criterium	U <sub>c</sub> (m/s)	$\alpha_s$ (-)	$\alpha_M$ (-)
3	Geen schade (D<1000) Geen falen (D<7000)	4,0	0,9	<1,0 <1,3
	Schade (D<1000) Geen falen (D<7000)	5,1	0,9	<1,55 <2,0
	Schade (D<1000) Geen falen (D<7000)	5,4	0,9	<1,71 <2,2
	Schade (D<1000) Geen falen (D<7000)	5,7	0,9	<1,89 <2,4

Indien wordt uitgegaan van de minimale waarde van de U<sub>c</sub> dan volgt voor het criterium van geen schade een  $\alpha_M$  van kleiner dan 1,0 (-). Dit is fysisch onwaarschijnlijk. Binnen de bandbreedte van de U<sub>c</sub> gevonden op strook 2 voor falen van de toplaag op het talud, wordt voor hetzelfde criterium gevonden dat  $\alpha_M$  kleiner is dan 1,55 bij U<sub>c</sub>=5,1 m/s en kleiner dan 1,9 voor U<sub>c</sub> = 5,7 m/s.

#### Strook 4

Voor strook 4 wordt op basis van niet falen van de bekleding aan het einde van de proef een minimale  $U_c$  van 5,0 m/s berekend. Voor enkele waarden van de  $U_c$  boven deze minimale waarde zijn voor het criterium van 'begin schade' (na 5 uur GO1) en 'niet falen' aan het einde van de proef zijn verklarende  $\alpha_M$  berekend. Hierbij is uitgegaan van een  $\alpha_s$  van 0,9 (-), omdat het gras niet hecht aan het betonpad. De resultaten staan in Tabel en in Tabel .

Tabel A.9 Teruggerekende  $\alpha_M$  voor strook 4.

Strook	Criterium	$U_c$ (m/s)	$\alpha_s$ (-)	$\alpha_M$ (-)
4	Schade (D=1000) Geen falen (D<7000)	5,0	0,9	2,9 <1,5
	Schade (D=1000) Geen falen (D<7000)	5,1	0,9	3 <1,55
	Schade (D=1000) Geen falen (D<7000)	5,4	0,9	3,2 <1,7
	Schade (D=1000) Geen falen (D<7000)	5,7	0,9	3,4 <1,88

Indien wordt uitgegaan van een  $U_c$  aan de onderkant van de range van 5,0 m/s dan volgt uit het niet falen dat  $\alpha_M$  kleiner was dan circa 1,5 (-). Voor het criterium van eerste schade wordt een  $\alpha_M$  teruggerekend van bijna 2,9. Dit is net als bij strook 2 met elkaar in tegenspraak. Hetzelfde geldt voor de hogere waarden van  $U_c$  binnen de in [8] gegeven range op basis van falen van de grasbekleding op het talud bij strook 2 en ervan uitgaande dat de grasbekleding op strook 4 vergelijkbaar is.

Net als bij strook 2 was hier sprake van het over het beton groeien van het gras. Het omklappen van deze overgroei gaat relatief makkelijk en geeft een aangrijpingspunt om de zode vanaf de overgang los te trekken, leidend tot eerste schade, wat dan al bij een relatief lage belasting optreedt. Uitgaande van het criterium van niet falen kan worden gesteld dat  $\alpha_M$  kleiner was dan 1,9 en waarschijnlijk kleiner dan 1,7.

#### A.2.3

##### Conclusie

Een grote variatie van  $\alpha_M$  kan verklarend zijn voor de proefresultaten voor het project Zwolle Olst. Uitgaande van de bovenkant van de range van  $U_c$  van 5,7 m/s kan op basis van niet falen van de overgang worden gesteld dat  $\alpha_M$  kleiner was dan 1,75 (-). Uitgaande van het midden van de range van  $U_c=5,4$  m/s leidt tot een  $\alpha_M$  die waarschijnlijk kleiner is dan 1,6.

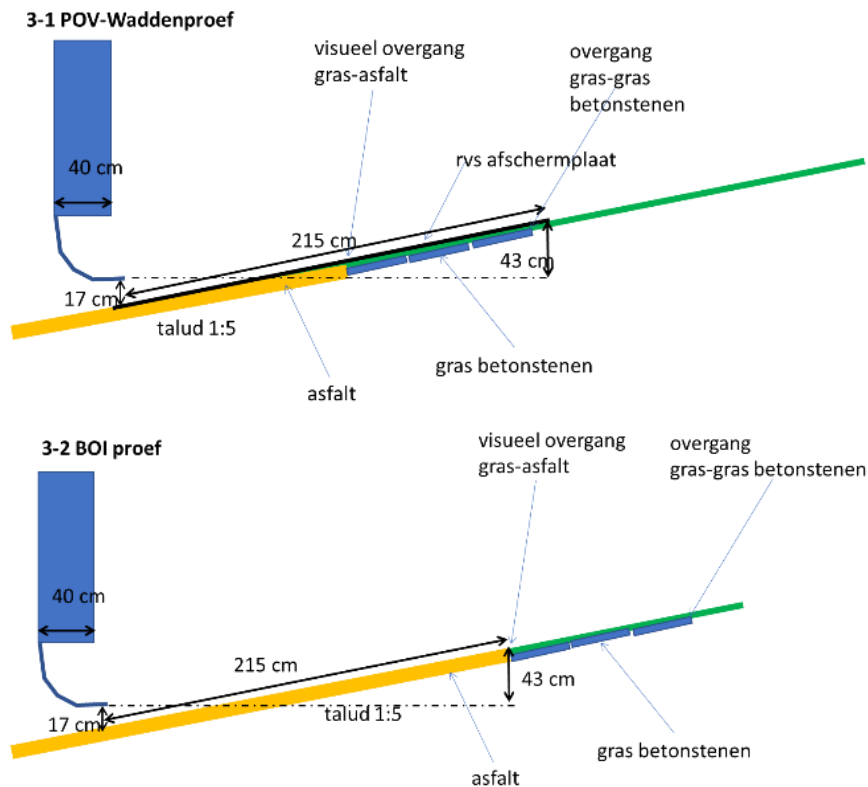
De oorzaak van de grote variatie in verklarende  $\alpha_M$  zit met name in de variabiliteit van mogelijke  $U_c$ , die slechts moeilijk valt vast te stellen omdat op slechts één plek falen op het talud is opgetreden en er wat onzekerheid is over de frontsnelheden die hebben geleid tot falen [8]. Op de overgang zelf is bij geen van de stroken falen opgetreden en was er een grote variabiliteit in het moment van optreden van eerste schade van het begin van de proef tot aan geen schade aan het einde van de proef.

### A.3

#### Golfoploopprouwen Waddenzeedijken

In het kader van het project POV Waddenzeedijken gras en klei zijn golfoploopprouwen uitgevoerd op Waddenzeedijken. Deze proeven waren gericht op het vaststellen van de  $U_c$  van de huidige grasmat. In het kader van het Kennis Primaire Processen programma van Rijkswaterstaat WVL en Deltares is aanvullend hierop een proef uitgevoerd waarbij de overgang tussen de harde asfaltbekleding naar de grasbekleding is meegenomen en is gekeken naar de invloed van deze overgang op het erosieproces. De analyse is gerapporteerd in [9].

Op de Waddenzeedijk nabij Oostbierum, Slachtedyk, in Friesland zijn twee golfploopproeven uitgevoerd. In één proef (3-1) is de overgang tussen gras en de harde bekleding bestaande uit asfalt en aansluitend doorgroeistenen afgedekt met een staalplaat. Bij de andere proef (3-2) is de overgang niet afgedekt. De proefopstelling is schematisch weergegeven in Figuur .



Figuur A.12 Schematische weergave proefopstelling.

De grasbekleding bestaat uit een gesloten zode. Grastrekproeven op deze locatie geven een indicatieve  $U_c$  van 7,8 en 8,3 m/s, wat in lijn is met het gemiddelde voor een gesloten zode in het algemeen (8 m/s) en met resultaten van in 2009 uitgevoerde golfoverslagproeven op de Friese Waddenzeedijk.




De belasting heeft bestaan uit twee delen:




- Deel 1 Simulatie van 6 uur lange hydraulische belasting (stormconditie) met waterstand nabij de uitstroomopening en een significantie golfhoogte gelijk aan 2 m. Dit geeft een verdeling van golfploophoogtes op het talud en daarmee ook een verdeling van frontsnelheden.
- Deel 2 515 oplopen met een vulhoogte van 7 m, achter elkaar losgelaten op het talud.

Voor verdere details over de belasting wordt verwezen naar [9].

De belasting heeft bij geen van de proefstroken geleid tot falen van de grasbekleding. De ontwikkeling van de schade is weergegeven in onderstaande overzichten voor respectievelijk strook 3-1 en 3-2.



Belasting	Schadebeelden 3-1
Einde gesimuleerde stormduur van 6 uur	Begin schade 
Proef met maximale belasting, volle bakken	Uitbreiding schade, beeld 'meerdere kale plekken' 
Einde proef met maximale belasting (515 oplopen met een vulhoogte van 7 m)	Uitbreiding schade, geen falen toplaag 

Belasting	Schadebeelden 3-2
<p>0:10 gesimuleerde stormconditie</p>	<p>Begin schade</p> 
<p>Eerste beeld, afstropen zode van de doorgroeistenen. 1:19 gesimuleerde stormconditie</p> <p>Tweede beeld, schade breidt zich uit boven de doorgroeistenen. 4:47 gesimuleerde stormconditie</p>	<p>Uitbreiding schade, beeld 'meerdere kale plekken'</p>  
<p>Begin en einde proef met maximale belasting (515 oplopen met een vulhoogte van 7 m)</p>	<p>Uitbreiding schade, <u>geen</u> falen toplaag</p>



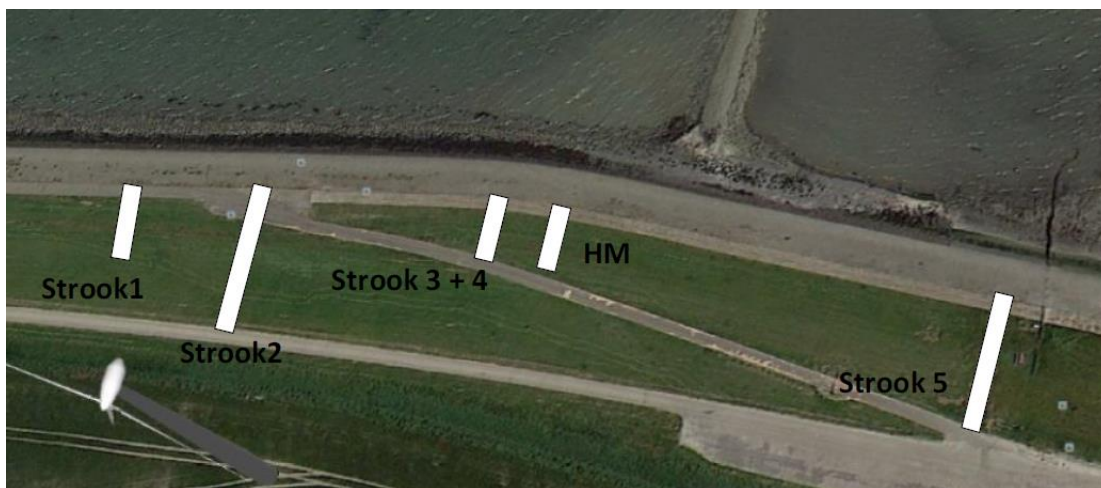
Voor het terugrekenen van de proefresultaten met de cumulatieve overbelastingmethode is gebruik gemaakt van de maximaal op het talud optredende frontsnelheid.

Op basis van de resultaten werd geconcludeerd dat de  $U_c$  van de grasbekleding waarschijnlijk circa 8 m/s is geweest en dat de invloedsfactor  $\alpha_M$  tussen 1 en 1,5 heeft gelegen om het ontstaan van schade maar niet falen, te verklaren.

#### A.4 Golfoploopprouven Noord-Beveland

In 2014 zijn golfoploopprouven uitgevoerd op het buitentalud van een dijk op Noord-Beveland. Hierbij waren overgangen aanwezig van asfalt naar gras en van betonplaten naar gras. De prouven zijn uitgevoerd in het kader van het Wettelijk Toets Instrumentarium (WTI) dat is overgaan in WBI en nu het BOI. De prouven zijn gerapporteerd in [10] en [11]. Hierin is ook de invloed van de overgangen van de harde bekleding naar het gras expliciet aan bod gekomen. In deze paragraaf wordt een samenvatting gegeven van dit onderzoek en de conclusies ten aanzien van de invloedsfactoren.

De situatie van de proufstroken staat in Figuur A.13. in de daaronder gegeven tabellen staat een korte omschrijving van het doel van de prouf, per strook en de opgelegde gesimuleerde belasting in termen van de 2% oploophoogte en de situering van de gesimuleerde waterstand. De gesimuleerde significante golfhoogte was 2 m met een piekperiode van 5,7 s. De 2%-golfoploophoogte geldt voor een talud van 1:4. Zowel de figuur als de tabellen zijn overgenomen uit [11].



Figuur A.13 Situatie van de proeflocatie Noord-Beveland met benaming proefstroken (uit [11]).

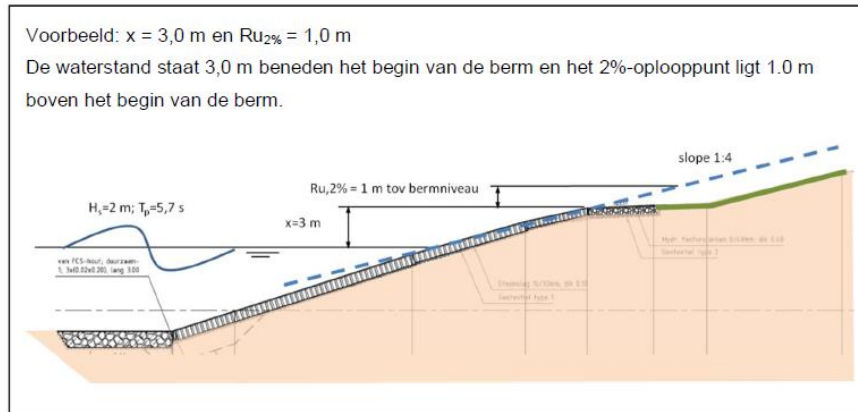
Teststrook	Doel proef
1	Bepalen erosiebestendigheid grasbekleding en invloed: <ul style="list-style-type: none"> <li>- overgang tussen de asfaltberm en de licht hellende grasberm; en</li> <li>- overgang tussen de grasberm en het met gras beklede boventalud</li> </ul>
2	Bepalen erosiebestendigheid grasbekleding en invloed: <ul style="list-style-type: none"> <li>- overgang tussen het asfalt en de het met gras beklede boventalud</li> </ul>
3	Bepalen erosiebestendigheid grasbekleding en invloed: <ul style="list-style-type: none"> <li>- overgang tussen de betonblokkenberm en de licht hellende grasberm; en</li> <li>- overgang tussen de grasberm en het met gras beklede boventalud</li> </ul>
4	Bepalen reststerkte bekleding na initiële schade.
5	Bepalen invloed van niet-waterkerend object: trap.
HM	Bepalen hydraulische parameters (waterdruk, (front)snelheden en laagdikte)

Teststrook	Test	x (m)	$R_{u2\%}$ (m tov bermniveau)	Stormduur
1, 3	3	3,0	1,0	6:00
	2	2,0	2,0	6:00
	1	1,0	3,0	6:00
		1,0	3,0	6:00
	0	0,0	4,0	3:00
		0,0	4,0	3:00
2, 5	3	3,0	1,0	6:00
	2	2,0	2,0	6:00
	1	1,0	3,0	6:00
		1,0	3,0	6:00
	0	0,0	4,0	3:00
		0,0	4,0	3:00
4	0	0,0	4,0	2:15

x = de afstand (verticaal) van de berm tot de stilwaterlijn

$R_{u2\%}$  = de afstand (verticaal) van het 2% olooppunt tot aan de berm

De afstand tussen de berm en de gesimuleerde waterstand wordt toegelicht in onderstaande Figuur A.14.



Figuur A.14 Toelichting gesimuleerde golfcondities.

Bij teststrook 1 bevond zich een overgang van een asfaltverharding op de berm naar de grasbekleding en een overgang van buitenberm naar het bovenste taluddeel. Er is geen falen van de grasbekleding opgetreden. Op de overgang van berm naar talud was aan het einde van de proef sprake van wat kale plekken (Figuur A.15).



Figuur A.15 Strook 1 links voor proefneming, rechts aan het einde van de proef.

Hetzelfde beeld ontstond op strook 2 en strook 3 (Figuur A.16 en Figuur A.17).



Figuur A.16 Strook 2 links voor proefneming, rechts aan het einde van de proef.



*Figuur A.17 Strook 3 links voor proefneming, rechts aan het einde van de proef.*

De analyse van de proeven heeft onder andere bestaan uit het terugrekenen van de kritische frontsnelheid  $U_c$  van de grasbekleding en de invloedsfactoren  $\alpha_M$  en  $\alpha_S$ . De  $U_c$  van de grasbekleding was waarschijnlijk 8 m/s of meer [10]. Indien de erosiebestendigheid van het gras inderdaad kan worden gekarakteriseerd door een  $U_c$  van 8 m/s dan was  $\alpha_M$  1,0 à 1,05. De voor de proefresultaten verklarende  $\alpha_M$  is in dit geval zeer gevoelig voor de  $U_c$ . Als de  $U_c$  9 m/s was dan is een verklarende  $\alpha_M$  maximaal 1,3 à 1,4 geweest. Het is waarschijnlijk dat  $\alpha_M$  in dit geval tussen 1 en 1,3 heeft gelegen.

## B Impactanalyse objecten en overgangen op dijken

## Memo

<b>Datum</b> 7 november 2022	<b>Ons kenmerk</b> 11208057-047-GEO-0001	<b>Aantal pagina's</b> 1 van 9
<b>Contactpersoon</b> Ligaya Wopereis	<b>Doorkiesnummer</b> +31(0)88 335 8156	<b>E-mail</b> ligaya.wopereis@deltares.nl
<b>Onderwerp</b> Object op dijken impact analyse		

## 1 Introductie

Dit memo is een onderdeel van het Kennis voor Keringen programma van Rijkswaterstaat, waarin Deltares onderzoek doet naar het effect van overgangen en objecten in de grasbekleding. Overgangen en objecten zijn een zwakke schakel in de grasbekleding, wat van invloed is op de benodigde kruinhoogte van de dijk (faalmechanisme GEKB – Gras Erosie Kruin en Binnentalud).

Meervoudig gebruik van waterkeringen maakt het vermijden van objecten en overgangen niet realistisch. Omdat objecten en overgangen vanuit beheer en onderhoud en waterveiligheid een belangrijke rol spelen is het van belang om de invloed van overgangen en objecten op de faalkans van de grasbekleding beter te onderbouwen.

In het kader van het BOI (Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium) is een eerste aanzet gedaan, om het effect van overgangen en object mee te nemen in de beoordeling. Toen is uitgegaan van 'worst case' invloedsfactoren bij de aanwezigheid van overgangen en objecten, ongeacht welke overgangen en objecten op de dijk aanwezig waren. Deze aanpak wordt verder in het rapport de "2019 methode" genoemd.

Vorig jaar is een nieuwe aanpak ontwikkeld om overgangen en objecten mee te nemen in de beoordeling. In deze nieuwe aanpak wordt niet meer met het 'worst case' scenario gerekend maar zijn onzekerheden over de invloed van diverse overgangen en objecten expliciet in rekening gebracht. Hiermee wordt een onderscheid gemaakt tussen verschillende typen overgangen en objecten. Het type overgangen en object hebben geleid tot verschillende karakterisering/categorieën van dijkvakken. Elke categorie heeft een stochastische invloedsfactor. Met de karakterisering van de dijkvakken zijn kansverdelingen van invloedsfactoren afgeleid die representatief zijn voor dijkvakken in plaats van doorsnedes. Het gebruik van deze kansverdelingen voor (homogene) dijkvakken dient dan ook vergeleken te worden met het gebruik van deterministische waarden voor invloedsfactoren in combinatie met opschaling van doorsnede naar vak om de ruimtelijke variabiliteit in rekening te brengen. De aanpak met karakterisering van dijkvakken wordt verder in het rapport de "2022 methode" genoemd.

Het doel van deze studie is om de impact van de nieuwe aanpak in kaart te brengen. Dit is gedaan door de betrouwbaarheidsindices volgend uit beide methoden te vergelijken voor verschillende locaties.

## 2 Achtergrond

### 2.1 Cumulatieve overbelasting methode



Met ingang van WBI2017 [1] wordt het faalmechanisme GEKB berekend met de cumulatieve overbelastingsmethode [2]. In deze methode wordt gekeken naar de totale schade gedurende een storm met  $N$  overslaande golven, zie Vergelijking 1. De cumulatieve overbelasting ( $D$  [ $\text{m}^2/\text{s}^2$ ]), ook wel schadefactor genoemd, wordt berekend door te kijken naar de sterkte van de grasbekleding, weergegeven met een kritieke stroomsnelheid ( $u_c$  [ $\text{m/s}$ ]), de frontsnelheid van een overslaande golf  $i$  op de kruin ( $u_i$  [ $\text{m/s}$ ]). De invloed van overgangen en objecten wordt bij de schade berekening meegenomen met zogenaamde invloedsfactoren:

- $\alpha_m$  [-]: Is de correctiefactor voor de invloed van objecten of overgangen op de belasting.
- $\alpha_a$  [-]: Is de correctiefactor voor de locatie van het golffront op het binnentalud wat de versnelling beïnvloed.
- $\alpha_s$  [-]: Is de correctiefactor om de sterkte aan te passen ter plaatse van aanwezige objecten.

$$[1] \quad D = \sum_{i=1}^N (\alpha_m (\alpha_a u_i)^2 - \alpha_s u_c^2)$$

Wanneer de frontsnelheid van een overslaande golf groter is dan de kritieke stroomsnelheid treedt schade op. Bij een andere overslaande golf kan meer of minder schade optreden, dit wordt bepaald door de mate waarin de kritieke frontsnelheid wordt overschreden. De som van de overbelasting van alle golven tijdens een storm geeft  $D$ , wanneer deze waarde groter is dan een kritieke waarde, dan is de grasbekleding rekenkundig gefaald. Deze kritieke waarde  $D_{\text{crit}}$  is in het WBI2017 gedefinieerd met een getrunceerde normale verdeling met een gemiddelde waarde van  $7.000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , een standaardafwijking van  $700 \text{ m}^2/\text{s}^2$  en een minimum en maximum waarde van 0 tot  $10.000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

De kritieke frontsnelheid wordt gekarakteriseerd door een normale verdeling en de parameters daarvan hangen af van de kwaliteit van de bekleding. In dit rapport wordt uitgegaan van gesloten zode, wat correspondeert met een gemiddelde kritieke stroomsnelheid van  $8 \text{ m/s}$ , een standaard deviatie van  $1 \text{ m/s}$  en een min en max van 0 tot  $12 \text{ m/s}$ .

Met de cumulatieve overbelastingsmethode geeft een hogere invloedsfactor  $\alpha_m \alpha_a^2$  bij overgangen en objecten een grotere belasting en daarmee grotere faalkansen en dus een lager betrouwbaarheidsindex.

## 2.2 2019: uitgangspunten voor invloedsfactoren

In het kader van het BOI (Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium) is uitgegaan van de 'worst case' invloedsfactoren om het effect van overgangen en objecten mee te nemen, ongeacht welke overgangen of objecten op de dijk aanwezig waren [3]. Hierdoor zijn de waardes van de invloedsfactoren alleen afhankelijk van de locatie van objecten. Hieruit volgt de volgende invloedsfactoren:

- Talud met overgangen en objecten:  $\alpha_a=1,4$ ;  $\alpha_m=1,8$  en  $\alpha_s=0,9$ .
- Talud zonder overgangen en objecten:  $\alpha_a=1,4$ ;  $\alpha_m=1,1$  en  $\alpha_s=0,9$ .

Wanneer er geen overgangen of objecten op het talud aanwezig zijn, dan is de knik bij de binnenteen maatgevend. Bij een (worst case) object op de kruin is  $\alpha_m$  gelijk aan  $1,8$  (omdat een object aanwezig is) en  $\alpha_a$  is  $1,0$  wat correspondeert met een locatie op de kruin ( $\alpha_m \alpha_a^2 = 1,80$ ). In vergelijking met de knik in de binnenteen wordt een lagere waarde voor  $\alpha_m \alpha_a^2$  gevonden:  $\alpha_m$  is gelijk aan  $1,1$  door de knik en  $\alpha_a$  is  $1,4$  bij de teen ( $\alpha_m \alpha_a^2 = 2,156$ ). In dit voorbeeld wordt de binnenteen dan meer belast, leidend tot een hogere  $\alpha_m \alpha_a^2$  en daarmee een lagere betrouwbaarheidsindex.

## 2.3 2022: uitgangspunten voor invloedsfactoren

In het kader van de studie in 2022 [4], waarvan dit memo een bijlage is, is een nieuwe aanpak ontwikkeld, waarbij onderscheid is gemaakt tussen drie karakterisering/categorieën dijkvakken, afhankelijk van het type object en type overgang aanwezig op kruin en/of binnentalud. Per categorie is een lognormale of getrunceerde normale kansverdeling voor de correctiefactor  $\alpha_m \alpha_a^2$  van de belasting bepaald die als volgt zijn gedefinieerd:

- Categorie 1: Op het binnentalud mogen taludtrappen en objecten kleiner dan 0,15 m aanwezig zijn (geen wegovertgangen en geen objecten groter dan 0,15 m). De kansverdeling van  $\alpha_m \alpha_a^2$  is hier lognormaal met een gemiddelde van 2,35 en een standaardafwijking van 0,15.
- Categorie 2: Op het binnentalud mogen taludtrappen, wegovertgangen en objecten kleiner dan 0,15 m aanwezig zijn (geen objecten groter dan 0,15 m). De kansverdeling van  $\alpha_m \alpha_a^2$  is hier een getrunceerde normale verdeling met een gemiddelde van 2,8, een standaardafwijking van 0,32, een maximum van 3,528.
- Categorie 3: Op het binnentalud mogen taludtrappen, wegovertgangen en objecten aanwezig zijn. De kansverdeling van  $\alpha_m \alpha_a^2$  is hier een getrunceerde normale verdeling met een gemiddelde van 3, een standaardafwijking van 0,27, een minimum van 2,156 en een maximum van 3,528.

## 3 Methode

Om de impact van de nieuwe methode te analyseren zijn Hydra-Ring [5] berekeningen uitgevoerd met beide methoden op verschillende locaties van de Hydra-Ring test bank. Er zijn drie bovenrivierenlocaties gekozen, drie kustlocaties en twee locaties bij een meer. Deze locaties zijn weergegeven in Figuur 3-1 en Tabel 3-1. De locaties en benodigde profielinformatie is overgenomen uit de BOI-testbank.



Figuur 3-1 Meetlocaties.

Tabel 3-1 ID en namen van locaties.

	ID	Naam
Bovenrivierenlocaties	15321052	053-02_0052_1_IJ_km0957
	14811048	048-01_0048_1_BR_km0862
	13811079	038-01_0079_1_WA_km0932
Kustlocaties	1000501	WZ_1_6-3_dk_00079
	900448	WZ_1_6-6_dk_00061
	1500201	WS_1_30-3_dk_00067
Locaties bij een meer	700056	YM_2_7-2_dk_00686
	700111	KM_2_8-4_dk_00054

Alle Hydra-Ring sommen zijn met *Directional Sampling* (DS) gemaakt, het aantal iteraties is locatie specifiek. Voor de belasting zijn stappen van 900 sec gemaakt in Hydra-Ring om robuust resultaten te krijgen [5].

Met de karakterisering van de dijkvakken zijn kansverdelingen van invloedscoëfficiënten afgeleid die representatief zijn voor dijkvakken in plaats van doorsnedes. Het gebruik van deze kansverdelingen voor (homogene) dijkvakken dient dan ook vergeleken te worden met het gebruik van deterministische waarden voor invloedscoëfficiënten in combinatie met opschaling van doorsnede naar vak. Om deze reden is voor de “2019 aanpak” een berekening uitgevoerd met deterministische waarden voor de invloedscoëfficiënten, waarbij, onder de aanname van volledige ruimtelijke correlatie (er is immers sprake van een homogeen vak), de faalkans op vakniveau wordt bepaald. Deze faalkans op vakniveau wordt vergeleken met een berekening met kansverdelingen voor de invloedscoëfficiënten welke representatief zijn voor een homogeen vak en dus niet meer opgeschaald hoeven te worden door Hydra-Ring [5] (vaklengte=0) om vergeleken te worden met de 2019 aanpak.

### 3.1 Bovenrivierenlocaties

Voor de bovenrivierenlocaties is voor beide aanpakken (2019 en 2022) de belasting geschematiseerd met reekstype 1 van Hydra-Ring [5]. Dit reekstype representeert watersystemen waar de waterstand constant is in de tijd maar waarbij het verloop van de golfhogte en de golfperiode op basis van een trapezium is geconstrueerd. De stormduur is 48 uren met een piekduur van 4 uren.

De eigenschappen van de bovenrivierenlocaties zijn in Tabel 3-2. Om de type overgangen en objecten die aanwezig zijn op de binnentalud per locaties te identificeren is gebruik gemaakt van Google Maps (onderzoek uitgevoerd in oktober 2022). Op basis van deze observaties zijn de invloedsfactoren gekozen voor methode 2019 en 2022. De observaties en de keuze van invloedsfactoren zijn in Tabel 3-3 samengevat. Voor locaties waar er alleen objecten op de kruin liggen zijn de invloedsfactoren gekozen horend bij geen objecten en een frontsnelheid bij de teen,  $\alpha_a=1,4$  en  $\alpha_m=1,1$  (zie 2.2). Bij locatie 048-01\_0048\_1\_BR\_km0862 zijn taludtrappen aanwezig, voor methode 2022 geldt dan categorie 1 terwijl voor 2019 de taludtrap gezien wordt als een object op het talud en er wordt uitgegaan van  $\alpha_a=1,4$  en  $\alpha_m=1,8$ .

Tabel 3-2 Eigenschappen van de bovenrivierlocaties.

	038-01_0079_1_WA_km0932	048-01_0048_1_BR_km0862	053-02_0052_1_IJ_km0957
Helling buitentalud (-)	0,182	0,389	0,201
Helling buitenberm (-)	0,441	0,514	0,201
Berm hoogte (m, NAP)	5,920	14,015	5,570
Berm lengte (m)	3,500	6,180	None
Kruin hoogte (m, NAP)	10,110	19,050	6,720
Dikenormal (°)	338,000	200,000	290,000
$\gamma_f$ (-)	1,000	1,000	1,000

Tabel 3-3 Type object en keuze van invloedsfactoren voor bovenriviergebieden.

Locatie	038-01_0079_1_WA_km0932	048-01_0048_1_BR_km0862	053-02_0052_1_IJ_km0957
Objecten op kruin	Hekwerk en fietspad	Fietspad, dijk- en lantaarpalen	Weg, lantaarpalen en bordjes
Objecten op talud	Één wegovertgang	Taludtrap	Geen
Objecten op teen	Hekwerk, bermweg en verder op bomen	Geen	Hekjes langs de teen
Categorie voor methode 2022	2	1	1
Methode 2019	$\alpha_a$	1,4	1,4
	$\alpha_m$	1,8	1,1
	$\alpha_s$	0,9	0,9

## 3.2 Kustlocaties

Voor de kustlocaties is de belasting geschematiseerd met reekstype 2 van Hydra-Ring [5]. Dit reekstype representeert watersystemen met een waterstandsverloop dat bestaat uit een getijdesignaal met hierop gesuperponeerd een trapeziumvormige windopzet. Golfcondities verlopen via een trapeziumverloop [1]. De stormduur is 48 uren met een piekduur van 4 uren.

De eigenschappen van de kustlocaties zijn in Tabel 3-4 weergegeven. Met Google Maps zijn de aanwezige overgangen en objecten op het binnentalud gevonden. Bij de kustlocaties kunnen de vakken op twee manieren worden gedefinieerd. Op basis van categorie 1, dan zijn de wegovertgangen niet meegenomen, wordt de vaklengte iets korter, of op basis van categorie 2 en dan hebben alle vakken 1 wegovertgang. Bij de eerste geldt voor methode 2019 dan  $\alpha_a=1,4$ ;  $\alpha_m=1,1$  en bij de tweede  $\alpha_a=1,4$  en  $\alpha_m=1,8$ . Hierdoor zijn beide mogelijkheden geanalyseerd, zie Tabel 3-5.

Tabel 3-4 Eigenschappen van de kustlocaties.

	WZ_1_6-6_dk_00061	WZ_1_6-3_dk_00079	WS_1_30-3_dk_00067
Helling buitentalud (-)	0,255	0,171	0,259
Helling buitenberm (-)	0,269	0,207	0,343
Berm hoogte (m, NAP)	6,170	4,300	5,330
Berm lengte (m)	4,340	5,700	4,700
Kruin hoogte (m, NAP)	8,640	9,580	7,250
Dikenormal (°)	35,000	295,000	155,000
$\gamma_f$ (-)	1,000	1,000	1,000

Tabel 3-5 Type object en keuze van invloedsfactoren voor kustgebieden, elke kolom hoort bij een vakindeling.

Locatie		WZ_1_6-6_dk_00061		WZ_1_6-3_dk_00079		WS_1_30-3_dk_00067	
<b>Objecten op kruin</b>		Fietspad	Fietspad			Dijkpalen	Dijkpalen
<b>Objecten op talud</b>		2-3 Wegovergangen dwars hekwerk	Geen wegovergang	Wegovergangen, dwars hekwerk en taludtrap	Geen wegovergang en allen parallel hekwerk	Dwars hekwerk (aan begin 1 wegovergang)	Geen wegovergang wel dwars hek
<b>Objecten op teen</b>		Staal drink bakken	Staal drinkbakken	Molgoot	Molgoot	Hekwerk en weg	Hekwerk en weg
<b>Categorie voor methode 2022</b>		2	1	2	1	2	1
<b>Methode 2019</b>	$\alpha_a$	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
	$\alpha_m$	1,8	1,1	1,8	1,1	1,8	1,1
	$\alpha_s$	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9

### 3.3 Merenlocaties

Voor de merengebieden is de belasting geschematiseerd met reekstype 3 van Hydra-Ring [5]. Dit reekstype representeert watersystemen met een waterstandsverloop dat bestaat uit het meerpeil met hierop gesuperponeerd een trapeziumverloop van de windopzet. De golfcondities volgen een trapezium verloop. De stormduur is 48 uren met een piekduur van 2 uren.

De eigenschappen van de merengebieden zijn in Tabel 3-6 weergegeven. Met Google Maps zijn de aanwezige overgangen en objecten op de binnentalud gevonden. De merengebieden kunnen, zoals kustlocaties, op twee manieren hun vaklengte definiëren. Hierdoor zijn voor alle locaties berekeningen gemaakt met categorie 1 of 2, zie Tabel 3-7.

Tabel 3-6 Eigenschappen van de meerlocaties.

	YM_2_7-2_dk_00686	KM_2_8-4_dk_00054
<b>Slope buitentalud (-)</b>	0,200	0,252
<b>Slope buitenberm (-)</b>	0,379	0,350
<b>Berm hoogte (m, NAP)</b>	1,675	2,710
<b>Berm lengte (m)</b>	6,010	5,110
<b>Kruin hoogte (m, NAP)</b>	4,710	5,250
<b>Dikenormal (°)</b>	271,000	14,000
$\gamma_f (-)$	1,000	1,000

Tabel 3-7 Type object en keuze van invloedsfactoren voor merengebieden, elk kolom hoort bij een vakindeling.

Locatie		YM_2_7-2_dk_00686		KM_2_8-4_dk_00054	
<b>Objecten op kruin</b>		2 objecten op de kruin, 1 van ongeveer 1-2m	2 objecten op de kruin, 1 van ongeveer 1-2m		
<b>Objecten op talud</b>		1 wegovergang	Geen wegovergang	Wegovergang + Wegovergangdwars	Geen wegovergang
<b>Objecten op teen</b>					
<b>Categorie voor methode 2022</b>		2	1	2	1
<b>Methode 2019</b>	$\alpha_a$	1,4	1,4	1,4	1,4
	$\alpha_m$	1,8	1,1	1,8	1,1

|  $\alpha_s$  | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9

## 4 Resultaten

### 4.1 Effect op betrouwbaarheid

De betrouwbaarheidsindices voor alle locaties zijn in Hydra-Ring berekend met DS gebruik makend van 400.000 tot 3.000.000 iteraties. Om de rekentijd te beperken zijn alleen de meest dominante windrichtingen berekend. De resultaten zijn in Tabel 4-1 samengevat.

Zoals in paragraaf 2.1 van deze bijlage aangegeven, geeft een lagere  $\alpha_m\alpha_a^2$  met de cumulatieve overbelasting methode altijd kleinere faalkansen en dus een hogere betrouwbaarheidsindex.

Gevallen waar methode 2022 een hoger betrouwbaarheidsindex geeft dan methode 2019 zijn in groen weergegeven. Deze gevallen komen vooral voor wanneer er overgangen aanwezig zijn op het talud, waardoor methode 2019 een waarde van 3,528 heeft voor  $\alpha_m\alpha_a^2$  en methode 2022 bij categorie 2 hoort (normale verdeling met  $\mu=2,8$ ,  $\sigma=0,32$  en een maximum van 3,528). De waarde van  $\alpha_m\alpha_a^2$  bij categorie 2 is dus altijd lager dan 3,528 waardoor methode 2022 altijd hogere betrouwbaarheidsindices berekent.

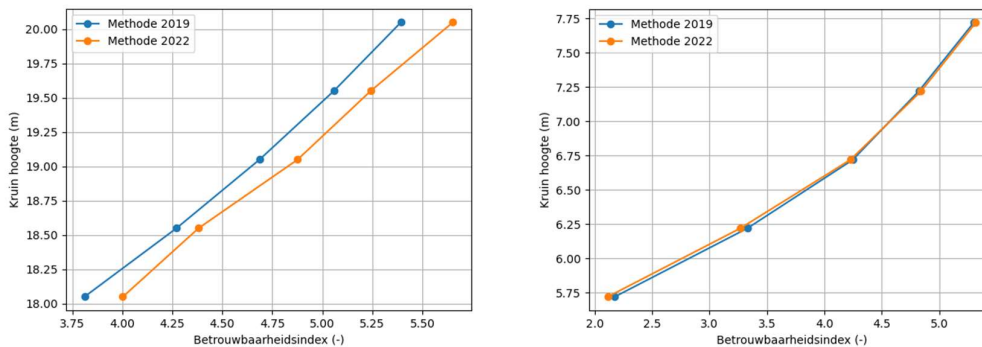
Wanneer er geen objecten aanwezig zijn op het talud, dus geen overgangen of taludtrappen, wordt een waarde van 2,156 voor  $\alpha_m\alpha_a^2$  gebruikt bij methode 2019. Bij methode 2022 wordt Categorie 1 gebruikt wanneer taludtrappen en objecten kleiner dan 0,15 m aanwezig zijn. Categorie 1 heeft een lognormale verdeling met  $\mu=2,35$  en  $\sigma=0,15$ . Hierdoor wordt een  $\alpha_m\alpha_a^2$  van 2,156 ongeveer 90% van de gevallen overschreden met Categorie 1. Dit is ook terug te zien in Tabel 4-1, waar behalve voor locatie YM\_2\_7-2\_dk\_00686 de betrouwbaarheid van 2019 altijd hoger is dan die van 2022.

Tabel 4-1 Overzicht van de resultaten voor betrouwbaarheidsindices. In groen zijn de gevallen weergegeven waar methode 2022 een hoger betrouwbaarheidsindex geeft dan methode 2019.

Traject	$\alpha_m\alpha_a^2$ voor 2019	Methode 2019	Categorie van 2022	Methode 2022
048-01_0048_1_BR_km0862	3,528	4.7	1	4.9
038-01_0079_1_WA_km0932	3,528	4.4	2	4.5
053-02_0052_1_IJ_km0957	2,156	4.3	1	4.2
WZ_1_6-6_dk_00061	2,156	5.1	1	4.9
	3,528	4.7	2	4.8
WZ_1_6-3_dk_00079	2,156	5.6	1	5.5
	3,528	5.3	2	5.4
WS_1_30-3_dk_00067	2,156	4.3	1	4.2
	3,528	4.1	2	4.2
YM_2_7-2_dk_00686	2,156	4.2	1	4.4
	3,528	4.1	2	4.2
KM_2_8-4_dk_00054	2,156	4.3	1	4.2
	3,528	3.9	2	4.1

## 4.2 Effect op kruin hoogte

Om het effect van de methode 2022 op de kruinhoogte beter in kaart te brengen zijn voor twee locaties (053-02\_0052\_1\_IJ\_km0957 en 048-01\_0048\_1\_BR\_km0862) ontwerpsommen gemaakt waar in stappen van 0,5 meter de betrouwbaarheidsindex berekend is voor kruinhoogtes van 1 m lager tot 1 m hoger dan de huidige kruinhoogte. Omdat de rekentijd van deze sommen erg lang is, zijn deze berekeningen alleen uitgevoerd voor de belangrijkste windrichting. Figuur 4-1 presenteert de resultaten voor beide locaties.



Figuur 4-1 Betrouwbaarheidsindex voor kruin hoogtes van 1 m lager tot 1 m hoger dan de huidige kruin hoogte berekend met methode 2019 en methode 2022. Links voor locatie 048-01\_0048\_1\_BR\_km0862 en rechts voor locatie 053-02\_0052\_1\_IJ\_km0957.

In Figuur 4-1 is duidelijk te zien dat de impact van methode 2022 anders is voor de beschouwde locaties. Locatie 048-01\_0048\_1\_BR\_km0862 gebruikt  $\alpha_m \alpha_a^2 = 3,528$  voor methode 2019, doordat taludtrappen aanwezig zijn, en Categorie 1 voor methode 2022. Hierdoor heeft deze locatie met methode 2022 een 0,15-0,20 meter lagere kruinhoogte nodig. Bij 053-02\_0052\_1\_IJ\_km0957 is geen significante verlaging in benodigde kruinhoogte zichtbaar omdat een waarde van 2,156 is gebruikt voor  $\alpha_m \alpha_a^2$  in 2019 en Categorie 1 in 2022.

## 5 Conclusies

Het meenemen van onzekerheid bij aanwezigheid van overgangen en objecten leidt voor dijkvakken met objecten op het talud (categorie 2) tot een verhoging van de betrouwbaarheid en is dus minder conservatief. Dijkvakken in categorie 2 zijn minder conservatief dan de methode uit 2019 omdat de slechtste objecten niet altijd op de binnenteen aanwezig zijn. Dat wordt nu beter meegenomen.

Voor gevallen waar geen objecten op het talud aanwezig zijn, zijn de waarden voor de invloedsfactoren van methode 2019 eigenlijk niet de 'worst case' waarden. Met Categorie 1 van methode 2022 zijn lagere betrouwbaarheidsindices gevonden dan met methode 2019. De reden hiervoor is dat bij Categorie 1 nu ook taludtrappen worden meegenomen, iets wat niet in de methode van 2019 werd gedaan. Wanneer taludtrappen aanwezig zijn kan dit tot een 0,30 m verlaging van de benodigde kruinhoogte leiden met het gebruik van methode 2022, dit is berekend voor 048-01\_0048\_1\_BR\_km0862.

Het grootste verschil tussen de methodes uit 2019 en 2022 is de manier van schematisering. Met de methode van 2019 wordt ervan uitgegaan dat in een vak met overgangen en objecten altijd minimaal één van deze overgangen of objecten de slechts mogelijke invloedsfactor heeft. Deze slechtste doorsnede wordt bepalend voor de vakfaalkans. Terwijl de methode uit 2022 uitgaat van een kansverdeling van de slechtste objecten op doorsnedeniveau waardoor onzekerheden over de invloedsfactoren expliciet meegenomen worden.

## Referenties

[1] Schematiseringshandleiding grasbekleding, WBI 2017 Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 28 mei 2021

[2] Handreiking Dijkbekledingen Deel 5: Grasbekledingen. *Technische rapport*. 2015

[3] BOI Omgaan met overgangen bij faalmechanisme gras erosie kruin en binnentalud Korte studie naar kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet inclusief overgangen, Deltares projectnummer 11203720-025, versie 1.0 november 2019

[4] Kennis voor keringen GEKB Overgangen en objecten, Deltares projectnummer 11208057-047, versie 1.0 februari 2022

[5] Probabilistisch beoordelen en ontwerpen grasbekleding. Deltares rapport 11206202-002-HYE-0001. A.J. Smale en W.J. Klerk, 12 juli 2021.



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

**Deltares**

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