

**Onderbouwing  
kansverdelingen kritisch  
overslagdebiet ten behoeve  
van het OI2014v4**



**Onderbouwing kansverdelingen  
kritisch overslagdebiet ten behoeve  
van het OI2014v4**

ir. A. van Hoven  
prof. dr. ir. J.M. van der Meer (Van der Meer Consulting)

1230090-011

**Titel**

Onderbouwing kansverdelingen kritisch overslagdebiet ten behoeve van het OI2014v4




<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving	1230090-011	1230090-011-GEO-0006- jvm	39

**Trefwoorden**

ontwerpinstrumentarium 2014, OI2014, grasbekledingen, golfoverslag, kansverdeling kritisch overslagdebiet, rekenwaarde kritisch overslagdebiet

**Samenvatting**

In het kader van het OI2014 versie 4 zijn op basis van state of the art kennis over erosie van grasbekledingen bij golfoverslag kansverdelingen bepaald van het kritisch overslagdebiet. Deze kansverdelingen beschrijven de faalkans van de grasbekleding gegeven een bepaald overslagdebiet, bij een combinatie van een graskwaliteit, substraat, taludhelling, golfhoogte en eventueel de aanwezigheid van overgangen en objecten. De kansverdelingen zijn vergeleken met de eerder in het kader van eerdere OI2014 versies bepaalde kansverdelingen. In de meeste gevallen liggen de nieuwe kansverdelingen veel gunstiger dan de oude kansverdelingen. Daarmee is aangetoond dat de eerder afgeleide rekenwaarden van het kritisch overslagdebiet aan de veilige kant zijn als het gaat om erosie van de grasbekleding bij golfoverslag. In enkele gevallen lagen de kansverdelingen ongunstiger en zijn de oude rekenwaarden niet aan de veilige kant. Dit betreft de scenario's van grasbekledingen op zand en die van grasbekledingen met objecten en overgangen. Hierbij is het van belang om op te merken dat de kennisbasis voor de invloed van overgangen en objecten smal is en dat er daarom is uitgegaan van een grote negatieve invloed. Er zijn in het kader van deze studie geen nieuwe rekenwaarden van het kritisch overslagdebiet afgeleid.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
3	feb. 2017	ir. A. van Hoven		ir. M. Klein Breteler		ir. L. Voogt	
		prof. dr. ir. J.M. van der Meer (Van der Meer Consulting)					

**Status**

definitief

## Inhoud

<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 Aanleiding	1
1.2 Doel	2
1.3 Totstandkoming	2
<b>2 Werkwijze</b>	<b>3</b>
<b>3 Uitgangspunten</b>	<b>5</b>
3.1 Erosiemodel	5
3.2 Stroomsnelheid op de kruin	5
3.3 Versnelling op het talud	6
3.4 Kritische stroomsnelheid $U_c$ en kritische cumulatieve overbelasting $D_c$	7
<b>4 Resultaten faalkansberekeningen</b>	<b>12</b>
4.1 Stormgedreven watersystemen (kust, meren, estuaria en benedenrivierengebied)	12
4.1.1 Resultaten gesloten zode op klei taludhelling 1:2,3 – 1:4,5	12
4.1.2 Resultaten open zode op klei taludhelling 1:2,3 – 1:4,5	14
4.1.3 Resultaten gesloten zode op zand, taludhelling 1:2,3 – 1:4,5	14
4.1.4 Resultaten kruin	15
4.2 Bovenrivierengebied	15
4.3 Samenvatting resultaten	17
<b>5 Invloed overgangen en objecten</b>	<b>19</b>
<b>6 Invloed golfoverslag op andere faalmechanismen en overige overwegingen voor het (niet) toelaten van veel golfoverslag</b>	<b>25</b>
<b>7 Conclusies</b>	<b>26</b>
<b>8 Referenties</b>	<b>28</b>
<b>Bijlage(n)</b>	
<b>A Kansverdelingen kritisch overslagdebiet taludhelling flauwer dan 1:4,5 en kruin</b>	<b>A-1</b>
<b>B Aanlevering tekst voor OI2014 v4</b>	<b>B-1</b>
<b>C Geometrische overgang talud naar achterland of berm</b>	<b>C-1</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

In de huidige versie van het OI2014, versie 3, worden rekenwaarden van het kritisch overslagdebiet gegeven [1]. Deze rekenwaarden zijn gebaseerd op kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet voor het mechanisme erosie van de grasbekleding bij golfoverslag die zijn afgeleid tijdens een expert sessie eind 2013. De verdelingen zijn gedeeltelijk gebaseerd op berekeningen van de faalkans (bij hoge overslagdebieten) en deels op basis van expert judgement. De berekende faalkans bij lage overslagdebieten bleek hoog gezien de proefresultaten, waarna de faalkansen bij lage overslagdebieten op basis van expert judgement naar beneden zijn bijgesteld. Na oplevering van het OI2014v1 eind 2013/ begin 2014 is het leveren van de onderbouwing van de kansverdelingen en het bijstellen van de rekenwaarden blijven liggen.

Binnen het WBI2017 in toetslaag 2 wordt gebruik gemaakt van dezelfde kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet. In dit kader is een beperkte onderbouwing gegeven in [2], gebaseerd op de state of the art kennis van eind 2013, begin 2014.

In de periode hierna is het erosiemodel voor grasbekledingen verder ontwikkeld, eveneens in het kader van WBI2017. Het effect van de taludhelling en taludlengte is toegevoegd aan het model. Er zijn factoren geïntroduceerd waarmee het effect van objecten en overgangen in rekening kan worden gebracht, waarbij echter gelijk wordt opgemerkt dat de kennisontwikkeling op dit gebied nog in de kinderschoenen staat. Verder is er kennis ontwikkeld (buiten WBI) over de verdeling van overslaande golven gedurende een storm en er is beter gekeken naar de erosieve belasting van de bekleding bij een werkelijk storm en waterstandsverloop voor verschillende watersystemen.

Tijdens een volgende expertsessie 29 april 2015 over het OI2014 versie 4 is geconstateerd dat de onderbouwing van de rekenwaarden in versie 3 nog onvoldoende was en dat dit eerst moet worden opgepakt, voordat kan worden gedacht aan verruiming van de rekenwaarden.

De rekenwaarden van het kritisch overslagdebiet zijn toegespitst op het mechanisme erosie van de grasbekleding. Het is van belang dat men zich realiseert dat hogere overslagdebieten ook indirecte effecten op de veiligheid van de dijk kunnen hebben. Met name gaat het om de indringing van water in het dijklichaam dat mogelijk leidt tot vermindering van de macrostabiliteit en kan leiden tot afschuiven van de bekleding.

Voor de interactie met macrostabiliteit is een afzonderlijke verificatieprocedure in ontwikkeling. Het effect van infiltratie op de macrostabiliteit en de verminderde erosiebestendigheid van een afgeschoven talud wordt beschouwd bij de beoordeling van de macrostabiliteit. Deze aspecten hoeven dus niet te worden verwerkt in het kritische overslagdebiet.

Het afschuiven van de bekleding wordt beoordeeld met losse voorschriften. De kans op dit faalmechanisme hoeft dus niet te worden verwerkt in de rekenwaarde van het kritische overslagdebiet.

## 1.2 Doel

Het doel is het geven van onderbouwde kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet op basis van de state of the art kennis over het faalmechanisme erosie van de grasbekleding. Indien deze kansverdelingen gunstiger zijn dan de eerder afgeleide kansverdelingen, dan wordt gesteld dat de rekenwaarden van de huidige versie aan de veilige kant zijn.

Er zijn in het kader van deze studie geen nieuwe rekenwaarden afgeleid middels een volwaardige kalibratiestudie. Wel is een voorstel gedaan voor bijstelling van de rekenwaarden uit het OI2014v3 op basis van de opgedane inzichten ten aanzien van het kritische overslagdebiet. Omdat er geen nieuwe kalibratiestudie is uitgevoerd zit in de huidige versie in sommige gevallen (groot) conservatisme.

De verdelingen die in het kader van deze studie worden afgeleid kunnen ook worden gebruikt in het WBI2017.

## 1.3 Totstandkoming

Deze studie is uitgevoerd in het kader van een deelproject binnen OI2014 versie 4. De resultaten van het onderzoek zijn eerder door middel van een memo verspreid aan een groep van diverse experts [5]. Tijdens de expert sessie is discussie gevoerd en commentaar geleverd. De resultaten zijn samen met het memo verwerkt in deze eindrapportage.

## 2 Werkwijze

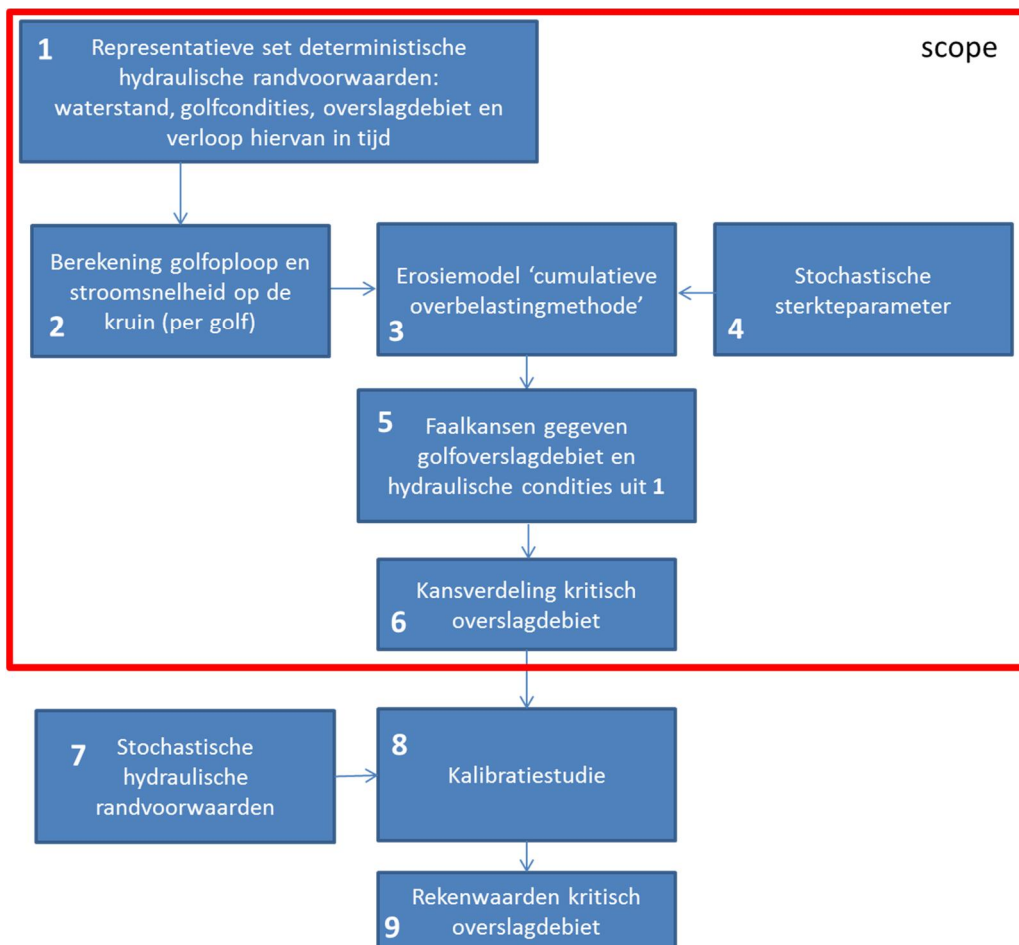
Dezelfde werkwijze zoals gebruikt binnen het WBI2017 is toegepast [2].

Met behulp van het gras erosiemodel, de cumulatieve overbelastingmethode, en diverse uitgangspunten (Hoofdstuk 3) zijn faalkansberekeningen gemaakt, gegeven een golfoverslagdebiet, een golfhoogte, versnellingsfactor afhankelijk van de taludhelling (par. 3.2) et cetera. Hierbij zijn de kritische cumulatieve overbelasting en de kritische stroomsnelheid, afhankelijk van substraat (klei/ zand) en zodekwaliteit (open/ gesloten) beschouwd als normaal verdeelde stochasten, gebaseerd op overslagproeven (par. 3.4).

Door de berekende faalkansen zijn kansverdelingen gefit van het kritisch overslagdebiet en deze zijn vergeleken met de eerder afgeleide kansverdelingen (Hoofdstuk 4). Er is gebruik gemaakt van fits door discrete waarden van de berekende faalkansen, omdat er geen analytische oplossing van de kansverdelingen beschikbaar is. De berekende kansen laten zich redelijk beschrijven door een lognormale kansverdeling, echter de fit is niet 100% nauwkeurig. De nadruk is gelegd op de overslagdebieten en de kansen die er voor het bepalen van de rekenwaarde het meeste toe doen. Buiten deze range neemt de nauwkeurigheid van de fit af. Opgemerkt wordt dat er om praktische redenen voor gekozen is om de kansverdeling van het kritisch overslagdebiet afhankelijk te laten zijn van de golfhoogte  $H_{m0}$ . Daardoor is de sterkte van de grasbekleding, welke wordt beschreven door de kansverdeling van het kritisch overslagdebiet, afhankelijk van de belasting  $H_{m0}$ . Hoewel dit een bijzondere keuze is, sluit het zo wel beter aan bij de beschikbare metingen.

De keten van berekeningen leidend tot de rekenwaarde van het kritisch overslagdebiet is gegeven in Figuur 2.1. De scope van berekeningen binnen deze studie staat in het rode kader.





Figuur 2.1 Schematische weergave keten van berekeningen leidend tot de rekenwaarden van het kritisch overslagdebiet

De kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet die binnen de scope van deze studie zijn bepaald worden vergeleken met de eerder afgeleide kansverdelingen waarmee destijds rekenwaarden zijn afgeleid [1]. Voor die gevallen waarbij de nieuwe kansverdelingen gunstiger zijn dan de oude, wordt geconcludeerd dat de eerder afgeleide rekenwaarden in elk geval aan de veilige kant zijn.



### 3 Uitgangspunten

#### 3.1 Erosiemodel

Voor de modellering van erosie van de grasbekleding wordt uitgegaan van de cumulatieve overbelasting methode (blok 3 in Figuur 2.1):

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

Waarin:

D	Cumulatieve overbelasting, ook wel schadegetal ( $m^2/s^2$ ).
N	Aantal overslaande golven (-).
$\alpha_M$	Factor voor verdisconteren belastingverhoging bij overgangen (-).
$\alpha_a$	Versnellingsfactor afhankelijk van taludhelling en lengte (-).
$\alpha_S$	Factor voor verdisconteren sterkteverlaging bij overgangen (-).
$U_i$	Maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid tijdens de $i^{\text{de}}$ overslaande golf ter plaatse van de kruin (m/s).
$U_c$	Kritische stroomsnelheid (m/s).

Het erosiemodel gaat voor de belasting uit van de maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid van de verschillende overslaande golven (blok 2 in Figuur 2.1). De koppeling met het overslagdebiet en de golfhoogte (blok 1 in Figuur 2.1) zit hem in de afhankelijkheid van overslagdebiet en golfcondities met de verdeling van golfploophoogtes en de relatie tussen oploophoogtes (ten opzichte van het kruinniveau) en de maximale dieptegemiddelde snelheid op de kruin.

Falen van de grasbekleding door erosie bij golfoverslag treedt op als de kritische waarde van de cumulatieve overbelasting  $D_c$  gedurende een storm wordt overschreden. De invloed van overgangen en objecten is in eerste instantie achterwege gelaten ( $\alpha_S = \alpha_M = 1$ ). In hoofdstuk 5 wordt teruggekomen op de invloed van overgangen en objecten.

#### 3.2 Stroomsnelheid op de kruin

De waarden van  $U_i$  tijdens een storm zijn afhankelijk van het overslagdebiet, de golfhoogte en de verdeling van overslaande golven. De hele verdeling van overslag gebeurtenissen tijdens een stormconditie wordt meegenomen bij de berekening van D. Ook tijdens een constante waterstand en golfcondities gekarakteriseerd door een significante golfhoogte, spectrale golfperiode en hoek van inval zullen er verschillende golfoverslagvolumes over de dijk slaan en er verschillende  $U_i$  optreden.

De rekenstappen voor de berekening van  $U_i$  zijn als volgt (blok 2 in Figuur 2.1):

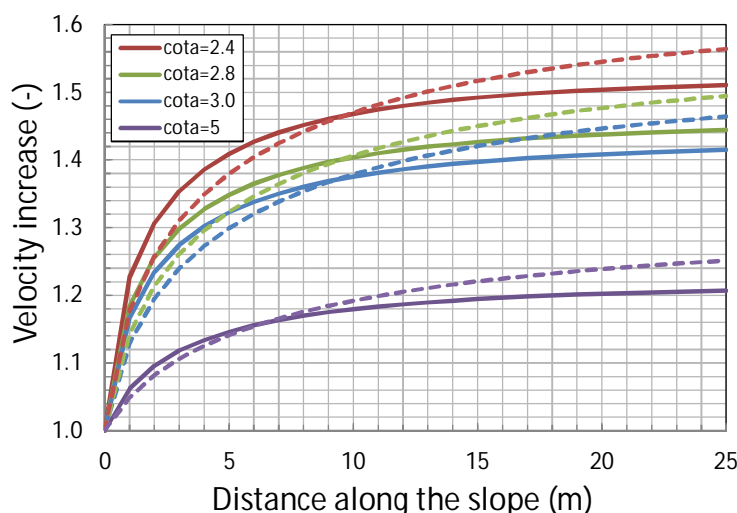
- Beschouwd wordt een geschematiseerd tijdsinterval, waarbinnen de waterstand en de golfcondities stationair zijn. Een stormverloop wordt geschematiseerd als een serie van tijdsintervallen met stationaire condities, of in vereenvoudigde vorm tot één representatieve tijdsduur waarin de condities constant zijn. Een voorbeeld van de toepassing wordt gegeven in bijlage B van [2], waarin voor verschillende watersystemen een schematisering van een stormverloop in discrete intervallen van één uur wordt gegeven.
- Het aantal golven in het tijdsinterval  $N = \text{tijdsinterval} / \text{gemiddelde golfperiode}$ .

- Er worden N waarden geselecteerd uit de kansverdeling van de golfhoogte. Het gaat om de golfhoogtes met onderschrijdingskansen gelijk aan  $1-i/(N+1)$ .
- De grootste runup krijgt een onderschrijdingskans  $P_{Ru,1}$  toegewezen gelijk aan  $P_{Ru,1} = 1 - \frac{1}{N+1}$ , de volgende  $i^{\text{de}}$  runup krijgt een onderschrijdingskans toegewezen gelijk aan  $P_{Ru,i} = 1 - \frac{i}{N+1}$ . enzovoort.
- Het oploophoogte  $Ru_i$  van de  $i^{\text{de}}$  golf wordt berekend met:  $Ru_i = z_{2\%} \left[ \frac{\ln(P_{Ru,i})}{\ln(0.02)} \right]^{0.5}$ ; hierin wordt het  $z_{2\%}$  niveau berekend met formule 5 uit [6].
- De stroomsnelheid op de kruin in de  $i^{\text{de}}$  golf wordt berekend met de formule:  $U_i = c_{u2\%} \left[ g (R_{ui} - h_k) \right]^{0.5}$ , waarin voor coëfficiënt  $c_{u2\%}$  1,45 (-) wordt aangehouden,  $g$  de zwaartekracht-versnelling ( $m/s^2$ ) en  $h_k$  de kruinhoogte [7].

### 3.3 Versnelling op het talud

De versnellingsfactor van de stroming op het talud  $\alpha_a$  wordt als deterministisch beschouwd. Het meenemen van de versnelling van de stroming is een uitbreiding ten opzichte van eerdere studies die in het kader van het WBI2017 zijn uitgevoerd.

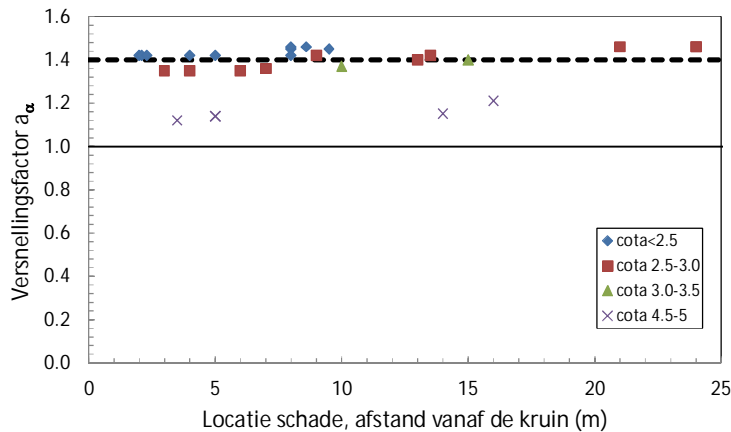
In onderzoek met de golfoverslagsimulator [9] is vastgesteld dat het water over het binnentalud versnelt [7]. De versnellingsfactor hangt vooral af van taludhelling en locatie op het talud. Om de versnellingsfactor in de faalkansverdeling te brengen, lijkt het theoretisch te gaan om een range van 1,0 tot 1,5, zie Figuur 3.1.



Figuur 3.1 Versnellingsfactor als functie van taludhelling en afstand tot de kruin (volle lijn  $U_{kruin} = 4$  m/s; stippellijn  $U_{kruin} = 6$  m/s)

Om gevoel te krijgen voor welke versnellingsfactoren in de proeven zijn opgetreden, is voor elke golfoverslagproef waar schade ontstond de afstand van de kruin tot de schadelocatie genomen, de taludhelling en de versnellingsfactor [7]. Er is alleen gekeken naar schades op het binnentalud, dus geen overgangen, obstakels, etc. Als er geen schade is ontstaan, dan is de lengte van het binnentalud genomen (overgang naar de teen). Figuur 3.2 geeft de

versnellingsfactor als functie van de afstand tot de kruin, waarbij onderscheid gemaakt is naar taludhelling.



Figuur 3.2 Versnellingsfactor als functie van schadelocatie op het binnentalud en taludhelling

Het resultaat lijkt verrassend, maar is bij nader inzien verklaarbaar. Bij taluds steiler dan 1:3.5, dat zijn alle proeven behalve die bij de Vechtdijk, komt er een versnellingsfactor van 1,4 uit met weinig spreiding. Alleen de punten met een talud van 1:4,9 (Vechtdijk) zitten gemiddeld op 1,2. De schade bij de steilste taluds zijn het dichtst bij de kruin opgetreden (gemeten langs het talud).

Vanaf de kruin versnelt het water heel snel om na enige meters dicht bij een versnellingsfactor van 1,4 te komen. Dit heeft eigenlijk meer met de afgelegde hoogte te maken dan de afstand langs het talud. Wat betreft hoogteligging ten opzichte van de kruin, liggen de schadelocaties dichter bij elkaar dan langs het talud gemeten. Mogelijk komt er daardoor een versnellingsfactor uit die vrij constant 1,4 is.

Dit heeft geleid tot het onderscheid tussen de volgende gevallen:

Taludhelling	
1:2,3 – 1:4,5	$\alpha_a=1,4$
flauwer dan 1:4,5	$\alpha_a=1,2$
kruin	$\alpha_a=1,0$

Er is een aparte waarde voor de kruin opgenomen ( $\alpha_a=1,0$ ) voor het geval er rekening moet worden gehouden met objecten of overgangen op de kruin. In dat geval kan de combinatie van  $\alpha_a=1,0$  en de correctiefactor voor overgangen en objecten ( $\alpha_M > 1$  en  $\alpha_S < 1$ ) maatgevend zijn ten opzichte van  $\alpha_a=1,4$  voor het talud, zonder factor voor overgangen en objecten ( $\alpha_M = \alpha_S = 1$ ). Dit komt verder aan bod in hoofdstuk 5.

### 3.4 Kritische stroomsnelheid $U_c$ en kritische cumulatieve overbelasting $D_c$

De kritische stroomsnelheid  $U_c$  staat voor de erosiebestendigheid van de grasbekleding. Er wordt onderscheid gemaakt in drie klassen:

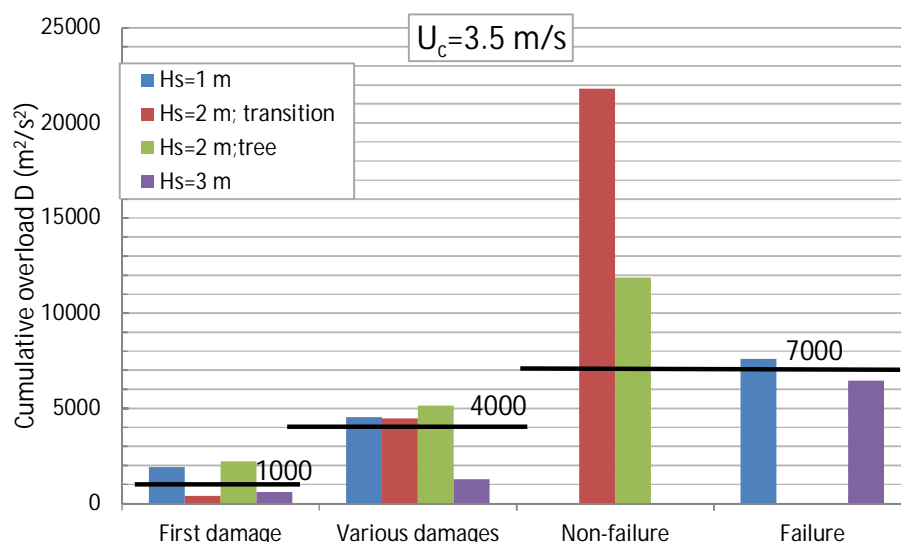
- Gesloten zode (meest erosiebestendig).
- Open zode.
- Fragmentarische zode (geen significante sterkte, wordt verder niet beschouwd).

De fragmentarische zode bevat kale grond zonder aanwezigheid van een wortelnet om de grond vast te houden. Dit kan bijvoorbeeld ook ontstaan door overbeweiding, waarbij op grote delen van het dijktaalud nog wel een wortelnet aanwezig is, maar op de slechtste plekken sporadisch gras met veel mos. De erosiebestendigheid van een fragmentarische zode is bij benadering gelijk aan die van de kale grond en een orde lager dan die van een open of gesloten zode. Dit type bekleding is verder niet meer beschouwd. Bij een dijkontwerp waarbij wordt uitgegaan van een fragmentarische zode (bv een park of tuintjes) moet ervoor worden gezorgd dat de kans op een significante hydraulische belasting voldoende klein is.

De kritische waarde van de cumulatieve overbelasting, of schadegetal,  $D_c$  is de maat van de overbelasting die een willekeurige grasbekleding kan hebben.  $D_c$  representeert, samen met de kritische stroomsnelheid  $U_c$  de sterkte van de grasbekleding.  $D_c$  is echter voor alle grasbekledingen gelijk terwijl  $U_c$  afhankelijk is van de kwaliteit van de grasbekleding. i

Voor bezwijken van het binnentalud is een cumulatieve overbelasting, of schadegetal,  $D_c = 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$  gevonden [7]. Deze waarde is afgeleid door de proeven van de Vechtdijk te analyseren, waar op één dijk, op naast elkaar gelegen teststroken, verschillende golfregimes werden gesimuleerd. Omdat de teststroken dicht bij elkaar lagen en het gras er op het oog vergelijkbaar uit zag is er vanuit gegaan dat de erosiebestendigheid  $U_c$  gelijk was. Dit geldt in elk geval voor twee van de vier stroken.

De resultaten van de vier proeven in bereikte  $D$  zijn schematisch weergegeven in Figuur 3.3. Het binnentalud bezweek bij het rivierregiem ( $H_s=1 \text{ m}$ , blauwe balk) en bij het zware zee-regiem ( $H_s=3 \text{ m}$ , paarse balk) allebei bij  $D$ -waarden dicht bij  $D = 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , uitgaande van een  $U_c$  van  $3,5 \text{ m/s}$  (zie Figuur 3.3). In beide gevallen was schade door mollen in de bovenste paar meter bij de dijkkruij de aanleiding voor schade en uiteindelijk falen. De stroken waren uiterlijk vergelijkbaar.



Figuur 3.3 Schadegetallen bij de Vechtdijk met een kritische snelheid van  $3,5 \text{ m/s}$

Bij de middelste golfhoogte ( $H_s=2 \text{ m}$ , groene balk), eveneens op het binnentalud, was een boom in de teststrook aanwezig en bezweek het talud door falen van het gras rondom de boom. Deze schade is gerepareerd met doek en de proef is voor zover mogelijk doorgezet tot  $D= 12.000 \text{ m}^2/\text{s}^2$  (uitgaande van  $U_c=3,5 \text{ m/s}$ ). Ook de reparatie rondom de boom bezweek toen, maar er was verder geen schade aan het binnentalud zelf. Dit kan worden verklaard

door zowel een plaatselijk hogere erosiebestendigheid  $U_c$  als een plaatselijk hoger kritisch schadegetal  $D_c$ . Teruggerekend zou  $U_c$  hier minimaal gelijk moeten zijn geweest aan 4 m/s als  $D_c$  inderdaad het beste wordt gekarakteriseerd door een deterministische waarde van  $7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

De eerste proef ( $H_s=2$  m; rode balk) betrof de dijkovergang aan de andere kant (buitentalud) van de dijk dan waar de volgende drie proeven werden uitgevoerd (blauw, groen en paars; op het binnentalud). Het is mogelijk dat het gras op deze helling sterker was, vanwege de Zuidelijke oriëntatie van deze teststrook. Uitgaande van een relatief lage  $U_c$  van 3,5 m/s, zoals bij de andere Noordelijk georiënteerde hellingen, was het talud nog niet bezweken bij een  $D_c$ -waarde van  $22.000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Teruggerekend zou  $U_c$  hier hoger moeten zijn geweest dan 5,1 m/s, als we uitgaan van een kritische waarde van het schadegetal van  $7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

In [7] is besloten dat  $7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$  een geschikte waarde is als kritische schadegetal. Het is echter mogelijk, gezien de resultaten bij de Vechtdijk, dat een hogere waarde van  $D_c$  soms beter aansluit bij proefresultaten. De vraag is of de variatie zit in de  $U_c$  (ondanks visueel redelijk gelijkwaardige grasbekledingen) of in  $D_c$  of in een combinatie van deze twee waarden. Zonder definitief uitsluitsel te kunnen geven over wat er in werkelijkheid aan de hand is, is hier in de verdere studie als volgt omgegaan:

- Bij het terugrekenen van de  $U_c$  van grasbekledingen uit alle andere golfverslagproeven dan de Vechtdijk (onderstaand) is uitgegaan van een vaste waarde van  $D_c=7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ .
- Bij de faalkansberekening (Hoofdstuk 4) is uitgegaan van een verdeling van  $U_c$  gebaseerd op deze per proef teruggerekende waarden van  $U_c$ .
- Bij de faalkansberekeningen is vervolgens  $D_c$  als stochast beschouwd met een gemiddelde van 7000 en een standaardafwijking van  $700 \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

Eenzijds is alle variatie toegerekend aan de standaardafwijking in  $U_c$ . Door uiteindelijk ook een standaardafwijking aan te nemen voor  $D_c$  leidt deze aanpak tot iets grotere berekende faalkansen dan anders het geval zou zijn geweest. Er zou ook voor kunnen worden gekozen om  $D_c$  als determinist te beschouwen. Het wordt aanbevolen om een en ander in latere studies beter uit te zoeken.

In uitbreiding op de onderbouwing voor het WBI2017 is voor alle golfverslagproeven gekeken naar de versnelling van de stroming op het talud en de plek waar de grasbekleding faalde. Naast het onderscheid tussen een gesloten, open en fragmentarische zode is gedifferentieerd naar het substraat (klei of zand). Dat laatste is voor WBI2017 niet gedaan. De resultaten zijn samengevat in Tabel 3.1.

Gesloten zode op klei	$U_c$ op basis van proeven	$U_c$ gekozen	Open zode op klei	$U_c$ op basis van proeven
Delfzijl	>8	8.5	St Philipsland	6.0
Boonweg 1	>8	8.5	Nijmegen	6.5
Boonweg 2	>8	8.5		
Boonweg 3	7.5	7.5	Fragmentarisch	$U_c$ op basis
Boonweg 4	7.5	7.5	op elke ondergrond	van proeven
Kattendijke	>8	8.5	Tielrode	2.0
Afsluitdijk	>8	8.5	Tholen	2-5
Millingen	7-8	7.5		
Noord-Beveland	>7	7.5	Gesloten zode	$U_c$ op basis
	gemiddelde	8.06	op zand	van proeven
	sigma	0.53	Vechtdijk	3.5

Tabel 3.1 Kritische snelheden als functie van zode kwaliteit en ondergrond

Wat betreft de gesloten zode op klei zijn er veel proeven waar geen bezwijken is vastgesteld. Dit betekent dat de kritische snelheid hoger dan 8 m/s moet zijn. Er is voor gekozen om voor deze proeven  $U_c = 8,5$  m/s aan te houden. Voor de gesloten zode op klei komt de gemiddelde kritische snelheid in dat geval op 8,0 m/s met een kleine berekende spreiding van  $\sigma = 0.5$  m/s.

St Philipsland had een slechte grasmat, met redelijk veel open plekken. Hier past de kwalificatie van open zode. Er waren wel voldoende wortels aanwezig (methode VTV2006 bijlage 8.2). Nijmegen valt zeker in de categorie open zode, zowel met de oude (VTV2006) als de nieuwe methode. De gevonden kritische snelheden waren respectievelijk 6.0 m/s en 6.5 m/s. Voor een open zode op klei kan  $U_c = 6$  m/s worden aanhouden.

De Vechtdijk, met een gesloten zode op zand, is een kritische snelheid van  $U_c = 3,5$  m/s gevonden.

De berekende spreiding van ca. 0,5 m/s voor de gesloten zode op klei lijkt aan de lage kant (expert judgement). Een aantal van de proeven heeft niet geleid tot falen, waardoor een waarde van 8,5 m/s is 'gekozen'. In werkelijkheid zal de  $U_c$  waarschijnlijk hoger en mogelijk lager zijn geweest, wat in werkelijkheid tot een grotere spreiding zou leiden. Het is daarom goed mogelijk dat de  $U_c$  gemiddeld iets hoger is en bovenal meer spreiding zal hebben. Besloten is om de spreiding aan te passen naar 1 m/s.

Er is dan 2% kans dat de kritische snelheid kleiner is dan 6 m/s en 16% kans dat deze kleiner is dan 7 m/s. Er is 68% kans dat de kritische stroomsnelheid tussen 7 en 9 m/s zit, wat goed past bij het beeld van de experts. Een  $\sigma = 1,0$  m/s geeft een variatiecoëfficiënt van 12,5%. Voor de andere kritische snelheden is globaal deze variatiecoëfficiënt aangehouden.

De verdelingen kunnen dan als volgt worden gegeven:

- Gesloten zode op klei                       $U_c = 8$  m/s       $\sigma = 1,0$  m/s.
- Open zode op klei                               $U_c = 6$  m/s       $\sigma = 0,75$  m/s.
- Gesloten zode op zand                       $U_c = 3.5$  m/s       $\sigma = 0,5$  m/s.

Deze verdelingen leiden ertoe dat er een (kleine) kans is dat een zode die is beoordeeld als 'open' een grotere erosiebestendigheid heeft dan een zode die is beoordeeld als 'gesloten'.

Gezien de ervaringen tot dusver bij het beoordelen van de zodekwaliteit is dit ook niet uit te sluiten.



## 4 Resultaten faalkansberekeningen

Met behulp van het erosiemodel (formule (1)) zijn faalkansberekeningen gemaakt waarbij  $U_c$  en  $D_c$  als stochasten zijn beschouwd met bovengenoemde gemiddelden en spreidingen. Er is gebruik gemaakt van normale verdelingen van  $U_c$  en  $D_c$ . Opgemerkt wordt dat indien gebruik wordt gemaakt van lognormale verdelingen de berekende faalkansen bij kleine overslagdebieten nog kleiner worden.

Door de op deze wijze berekende faalkansen per golfhoogte en overslagdebiet is een lognormale kansverdeling gefit.

Vanwege de karakterisering van de duur van de overslagbelasting is onderscheid gemaakt tussen stormgedreven watersystemen (par. 4.1) en het bovenrivierengebied (par. 4.2). Bij de berekeningen van de cumulatieve overbelasting is gebruik gemaakt van de volgende uitgangspunten:

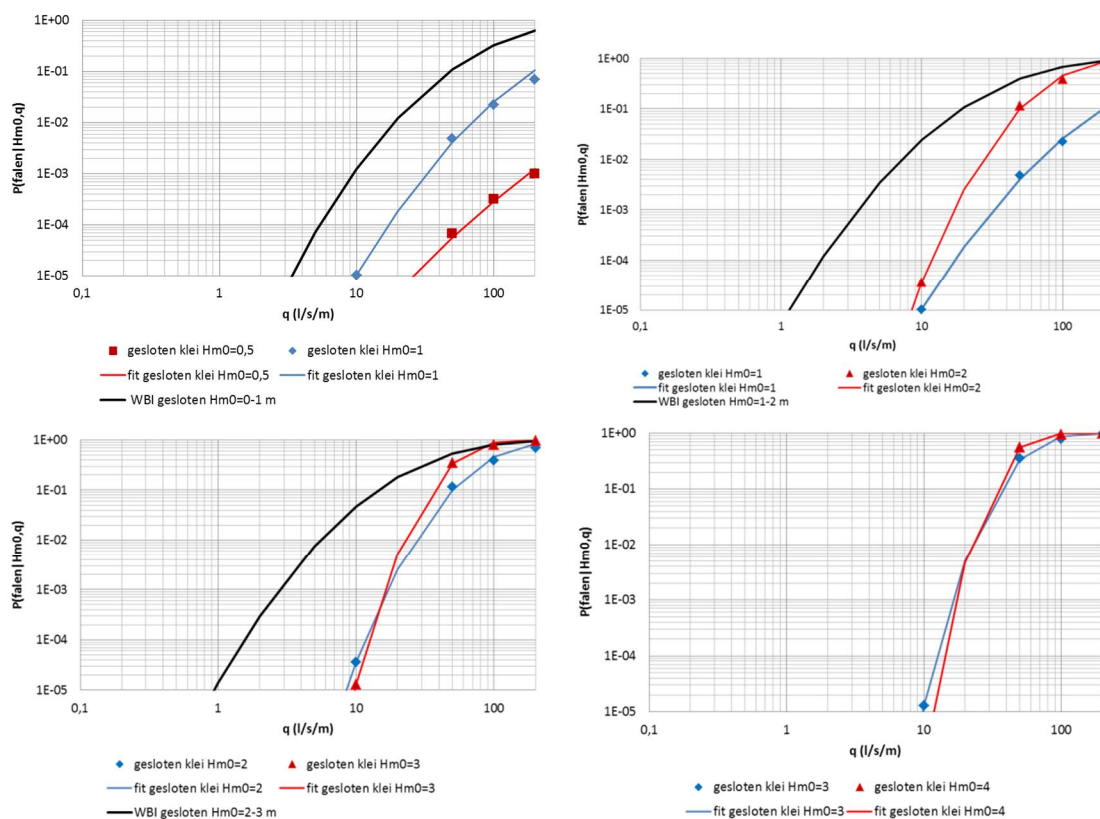
- Golfsteilheid  $s_{0p} = 0,04$  (-).
- Buitentalud 1:4 (geen berm).
- Ruwheid buitentalud 1,0.
- Berekening golfoploop met formule 5 uit [6].
- Relatie tussen kruinhoogte en overslagdebiet formule 24 en 25 uit [6].
- Factor voor berekening snelheid uit oploophoogte  $c_{u2\%}=1,45$  (-).
- Factoren voor overgangen en objecten  $\alpha_S=\alpha_M=1$  (-).
- Stormduur gekarakteriseerd door 3 uur maximaal voor stormgedreven watersystemen (zie studie WBI); stormduur gekarakteriseerd door 5 uur maximaal voor het bovenrivierengebied.
- Overslagdebiet  $q=0,1; 1; 5; 10; 50; 100$  en  $200$  l/s/m.
- Significante golfhoogte 0,5; 1; 2; 3; 4 m.
- Graszone kwaliteit en substraat: gesloten zone op klei, gesloten zone op zand, open zone op klei.
- Versnellingsfactor  $\alpha_a = 1,4$  (taluds 1:2,3 – 1:4,5), 1,2 (taluds flauwer dan 1:4,5) en 1,0 voor de kruin.
- Er is niet expliciet rekening gehouden met de altijd aanwezige geometrische overgang van het talud naar het achterland of de berm. Deze overgang zorgt voor een geringe verhoging van de belasting [3]. Het resulterende verschil in de berekende faalkans wordt nader toegelicht in Hoofdstuk 5 en Bijlage C.

### 4.1 Stormgedreven watersystemen (kust, meren, estuaria en benedenrivierengebied)

#### 4.1.1 Resultaten gesloten zone op klei taludhelling 1:2,3 – 1:4,5

De berekende faalkansen gegeven een significante golfhoogte, versnellingsfactor, overslagdebiet, zodekwaliteit en substraat zijn uitgezet in grafieken (Figuur 4.1), waardoor log-normale verdelingen zijn gefit. In de grafieken is tevens de eerdere kansverdeling van het kritisch overslagdebiet gegeven voor een gesloten zone (waarbij niet is gedifferentieerd naar klei of zand).

Uit de eerdere afleiding van rekenwaarden van het kritisch overslagdebiet in het kader van eerdere versies van het OI2014 is gebleken dat het belangrijkste deel van de kansverdeling ligt tussen een kans van circa 0,1 en 0,01.



Figuur 4.1 Kansverdeling kritisch overslagdebiet voor gesloten zode op klei versnellingsfactor 1,4 met eerder afgeleide kansverdeling voor gesloten zode

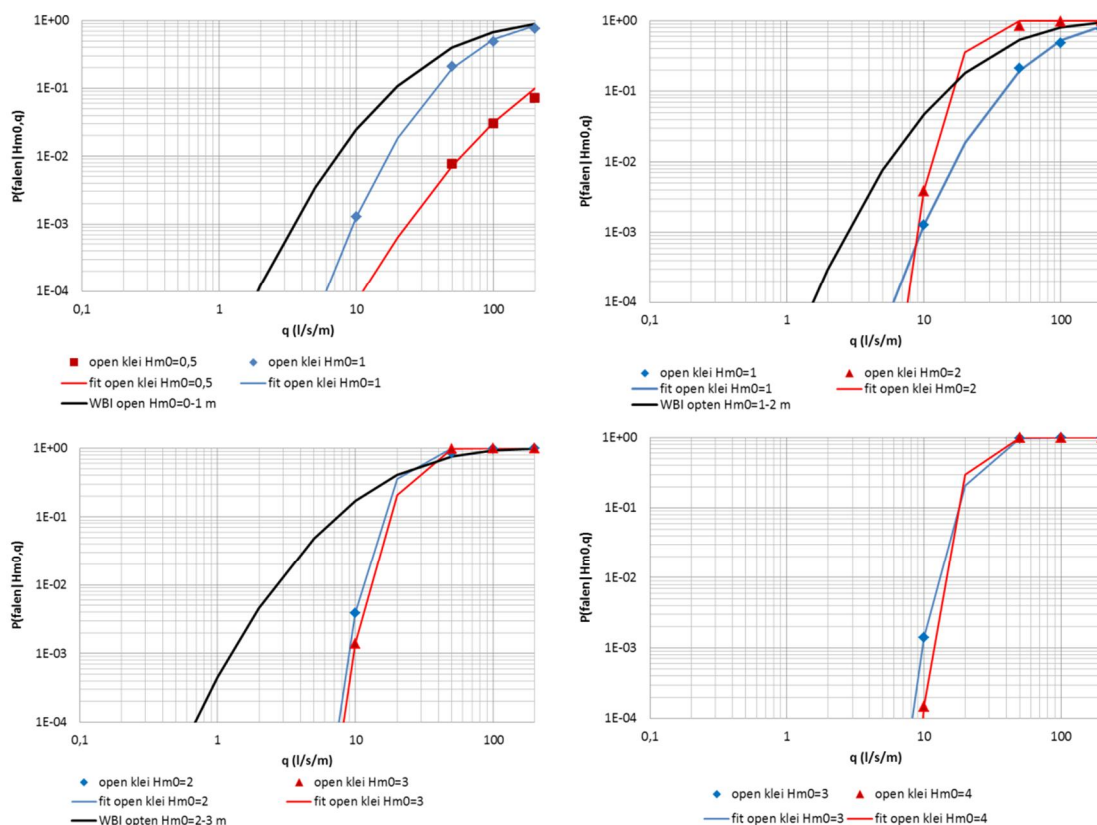
Opvallend is dat bij een hoge golfhoogte en een klein overslagdebiet de faalkans gegeven de hoge golfhoogte juist kleiner is. Dit lijkt op het eerste gezicht contra intuïtief, echter het aantal golven dat bij deze kleine overslagdebieten over de kruin slaat wordt bij hoge golven zodanig klein dat de erosiebijdrage toch kleiner is dan bij meer overslaande, maar iets kleinere golven bij een lagere golfhoogte. Het kruisen van de fits in Figuur 4.1 is vanuit de erosieformule en de achterliggende fysica verklaarbaar.

De nieuwe fits liggen beduidend lager dan de kansverdelingen die eerder zijn gebruikt. Dit is grotendeels verklaarbaar door het differentiëren naar substraat bij het afleiden van de verdeling van  $U_c$ , waarbij in bovenstaand geval van de sterkste situatie wordt uitgegaan (gesloten zode op klei).

Uit de figuur volgt dat de nieuwe kansverdelingen bij 10 l/s/m golfoverslag minimaal een factor 100 en soms wel 1000 kleinere faalkans geeft dan de eerder gebruikte kansverdeling. Bij een golfoverslagdebiet van 20 l/s/m is het verschil nog steeds een factor die veel groter is dan een factor 10. Ook wordt in de figuren bij deze 10 l/s/m golfoverslag een kans gevonden in de buurt van  $10^{-5}$ , wat voor de meeste dijktrajecten dezelfde orde van grootte is als de faalkanseis op doorsnedeniveau voor het mechanisme erosie door golfoverslag. Omdat de jaarlijkse kans op het überhaupt optreden van golfoverslag ook heel klein is, betekent dit dat golfoverslag voor de meeste dijktrajecten geen aandachtspunt is. Dit zijn grote verschillen met de eerder gehanteerde kansverdeling en hiervan afgeleide kritische overslagdebieten. Het aanhouden van de eerder afgeleide kritische overslagdebieten leidt voor deze situatie tot zeer groot conservatisme.

#### 4.1.2 Resultaten open zode op klei taludhelling 1:2,3 – 1:4,5

De berekende faalkansen zijn uitgezet in grafieken (Figuur 4.2), waarin tevens de eerdere kansverdeling van het kritisch overslagdebiet voor een open zode is gegeven.



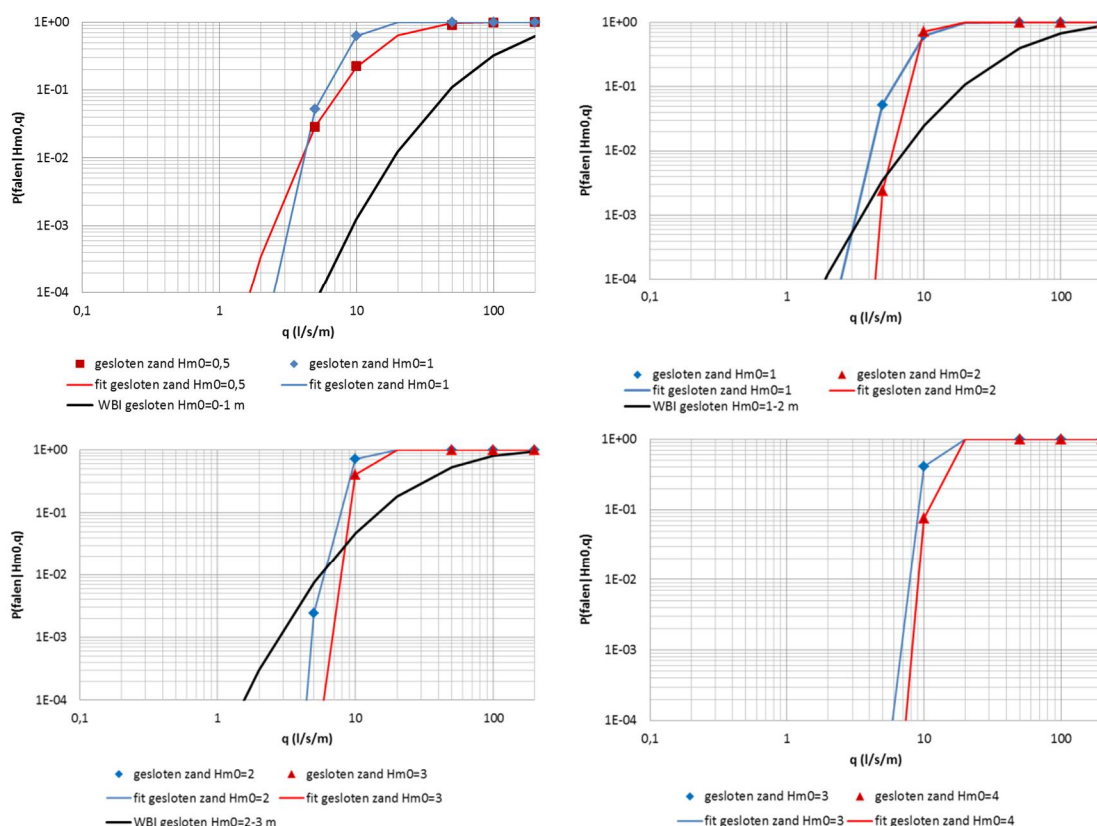
Figuur 4.2 Kansverdeling kritisch overslagdebiet voor open zode op klei versnellingsfactor 1,4 met eerder afgeleide kansverdeling voor open zode

De nieuwe fits liggen grotendeels lager dan de kansverdeling die eerder in het WBI2017 is gebruikt, met uitzondering van die voor golfklasse 1-2 m bij een overslagdebiet >20 l/s/m.

Bij een overslagdebiet van 10 l/s/m is de kans een factor 10-50 kleiner dan bij de eerder vastgestelde kansverdeling. Bij een overslagdebiet van 5 l/s per m is de kans kleiner dan  $10^{-5}$ , wat inhoudt dat golfoverslag dan geen aandachtspunt meer is. De faalkans is dan zeker voldoende klein. Ook hier kan worden geconcludeerd dat het aanhouden van de eerdere kritische golfoverslagdebieten kan leiden tot behoorlijk conservatisme.

#### 4.1.3 Resultaten gesloten zode op zand, taludhelling 1:2,3 – 1:4,5

De berekende faalkansen zijn uitgezet in grafieken (Figuur 4.3), waarin tevens de eerdere kansverdeling van het kritisch overslagdebiet voor een gesloten zode is gegeven.



Figuur 4.3 Kansverdeling kritisch overslagdebiet voor gesloten zode op zand versnellingsfactor 1,4 met eerdere kansverdeling voor gesloten zode

Omdat is gedifferentieerd naar substraat (zand of klei) liggen de gefitte kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet voor zanddijken met een gesloten zode hoger dan de eerdere kansverdelingen die worden toegepast voor een gesloten zode (zonder differentiatie tussen zand en klei). Eerder afgeleide rekenwaarden van het kritisch overslagdebiet in het OI2014 zijn dus niet veilig genoeg voor grasbekledingen op zand en toepassing hiervan voor gras op zand wordt daarom ontraden. Bij het ontwerpen van dijken zal echter niet snel worden overgegaan tot zandtaluds met een grasbekleding, onder andere vanwege de onzekerheid of zich op zand een gesloten zode kan vormen.

Opgemerkt wordt dat de situatie van een gangbaar talud, versnellingsfactor 1,4; in combinatie met een gesloten zode op zand niet is beproefd. Het enige beproefde zandtalud was de Vechtdijk, waar de taludhelling ca. 1:4,5 was en dus eigenlijk een versnellingsfactor van 1,2 zou moeten worden aangehouden.

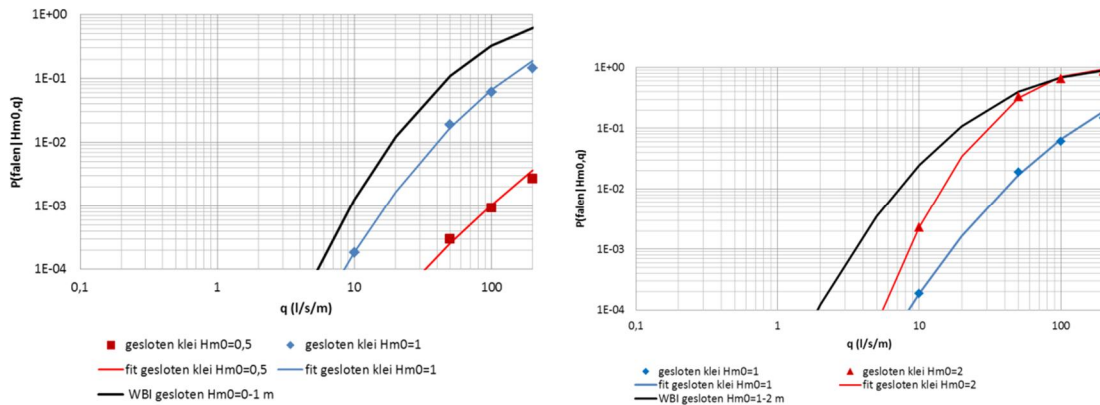
#### 4.1.4 Resultaten kruin

Deze resultaten voor gesloten zode op klei en zand en een open zode op klei voor de kruin (zonder versnellingsfactor) staan in bijlage A. Deze zijn voor het ontwerp van dijken minder relevant. Logischerwijs liggen de berekende faalkansen en de gefitte kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet lager dan voor de gangbare taluds.

### 4.2 Bovenrivierengebied

Uit de eerdere beperkte onderbouwing van kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet in het kader van WBI2017 is gebleken dat in het bovenrivierengebied de storm wordt gekarakteriseerd door een belastingduur van circa 5 uur met het maximale overslagdebiet, in

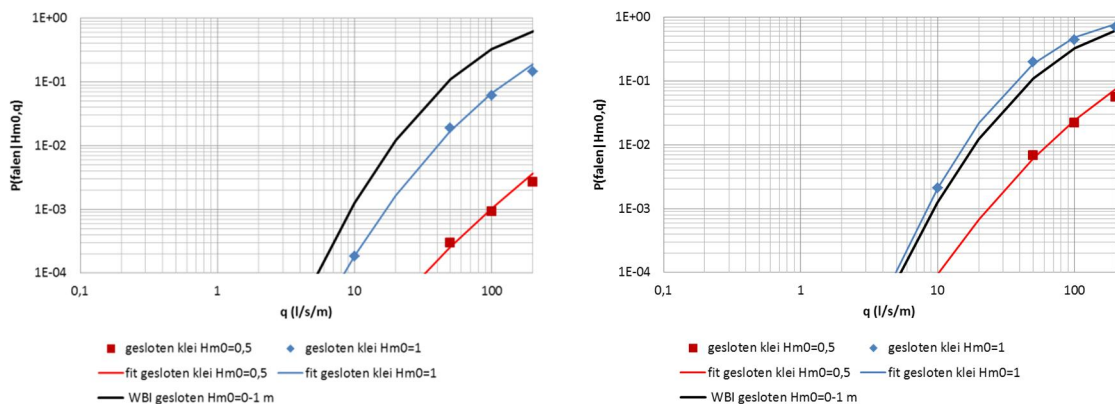
plaats van 3 uur voor stormgedreven watersystemen [2]. De berekeningen zijn hierop aangepast en de resultaten worden onderstaand gegeven. Omdat in het rivierengebied de golfhoogte beperkt is, worden de significante golfhoogtes van 3 en 4 m weggelaten (Figuur 4.4).



Figuur 4.4 Kansverdeling kritisch overslagdebiet voor gesloten zode op klei versnellingsfactor 1,4 en overslag 5 uur maximaal met eerder afgeleide kansverdeling voor gesloten zode

Voor de meest gangbare taluds van 1:2,3 tot 1:4,5 van een gesloten zode op klei blijven ook bij een langere duur van 5 uur een maximaal overslagdebiet de berekende faalkansen onder de eerder afgeleide kansverdeling van het kritisch overslagdebiet. De kansen bij een golfoverslagdebiet van 10 l/s per m liggen minimaal een factor 5 lager dan bij de eerder aangenomen kansverdeling.

Voor het bepalen van de golfloop en het overslagdebiet is uitgegaan van een *buitentalud*helling 1:4. Voor rivierdijken wordt echter dikwijls een steilere helling van het buitentalud aangehouden tot zelfs ca. 1:2. Het effect hiervan op de berekende cumulatieve overbelasting en de hiermee berekende faalkans is voor kleine golven inzichtelijk gemaakt in Figuur 4.5. De vergelijking is gemaakt voor een golfhoogte  $H_{m0}$  van 0,5 en 1 m, omdat deze relevant zijn voor rivierdijken. De faalkansen en fits zijn afgezet tegen de eerder afgeleide kansverdeling van het kritisch overslagdebiet voor de golfhoogte klasse 0-1 m.



Figuur 4.5 Invloed steile buitentaludhelling op berekende faalkans, links 1:4 rechts 1:2

Bij een steiler buitentalud wordt een hogere faalkans berekend. Beschouw als voorbeeld een overslagdebiet van 1 l/s/m en een golfhoogte  $H_{m0}$  van 1 m (punt ligt buiten de grafiek). Bij deze condities zal bij het steile talud van 1:2 de kruin ongeveer 1 m hoger moeten zijn dan bij het flauwere talud van 1:4 om te voldoen aan een overslagdebiet van 1 l/s/m. Bij het steile

talud zullen er in 5 uur minder golven over de kruin slaan, 399 tegenover 505 bij het flauwe talud, echter de grootste van deze golven zullen met een hogere snelheid over de kruin schieten dan bij het flauwe talud. Dit maakt het verschil. De grootste golf bij het steile talud heeft op de buitenkruinlijn een snelheid van 6,4 m/s terwijl de grootste golf bij het 1:4 talud een snelheid heeft van 5,2 m/s. Er zijn dus minder golven, maar met een hogere snelheid en dat laatste geeft de doorslag bij de berekende cumulatieve overbelasting.

Bij een golfhoogte van 1 m, de bovenkant van wat in het rivierengebied aan golfhoogte mag worden verwacht en bij een taludhelling van 1:2 wat voor de zwaarder aangevallen rivierdijken aan de steile kant zal zijn, ligt de fit door de berekende faalkansen bij een golfhoogte van 1 m nagenoeg op de eerder afgeleide faalkansverdeling voor de klasse tot 1 m. Bij een golfhoogte van 0,5 m ligt de fit er ruim onder.

#### 4.3 Samenvatting resultaten

Voor verschillende golfhoogteklassen (0,5-1-2-3-4 m), graskwaliteit (open of gesloten zode) met substraat (zand of klei), versnellingsfactor voor de taludhelling (1 of 1,4) zijn faalkansen van de grasbekleding berekend als functie van het kritisch overslagdebiet. Dit is gedaan voor een reeks van overslagdebieten (0,1-1-5-10-50-100-200 l/s/m). Uiteraard was de berekende faalkans bij het kleine overslagdebiet van 0,1 en 1 l/s/m heel klein en nam deze toe bij de grotere overslagdebieten van 100 en 200 l/s/m. Voor elk scenario is door deze reeks faalkansen een lognormale kansverdeling gefit. Deze gefitte kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet zijn getalsmatig samengevat in onderstaande *Tabel 4.1*. De getalsmatige waarden van de fits worden gegeven, omdat deze bij latere studies handig kunnen zijn. Voor deze studie is het strikt gesproken voldoende om te kijken of de verdelingen in het interessante gebied onder of boven de oude kansverdelingen liggen.

Opgemerkt wordt dat de fit is uitgevoerd op het voor ontwerpen (en toetsen) interessante gebied van de kansverdeling (vooral rondom onderschrijdingskansen van 0,1 à 0,01). Let op dat het gebruik van de verdeling ver beneden deze range leidt tot (grote) onnauwkeurigheid. Dit betekent ook dat de  $\mu$  en  $\sigma$  niet altijd aansluiten bij het ervaringsgebied van de overslagproeven, echter voor het relevante deel van de kansverdeling van het kritisch overslagdebiet fitten deze parameters het beste.

Watersysteem	Binnen- talud	Zode	Substraat	H <sub>m0</sub> (m)	μ (l/s/m)	σ (l/s/m)
Stormgedreven: 3 uur maximaal overslagdebiet  Zee, meer, estuaria, beneden- rivierengebied	1:2,3 - 1:4,5 $\alpha_a = 1,4$	gesloten	klei	0,5	1,1E+05	4,3E+05
				1	1,2E+03	1,5E+03
				2	1,3E+02	83
				3	65	29
			zand	4	50	17
				0,5	19	13
				1	9,5	3,5
				2	9,1	1,9
		open	klei	3	11	1,8
				4	13	2,3
				0,5	1,8E+03	3,2E+03
				1	1,2E+02	1,1E+02
zand	2		23	7,2		
	3		27	8,9		
	4		23	5,3		
	Bovenrivieren- gebied 5 uur maximaal overslagdebiet		1:2,3 - 1:4,5 $\alpha_a = 1,4$	gesloten	klei	0,5
1		1,0E+03				1,6E+03
2		88				68
3		26				9,0
4		21				5,7

Tabel 4.1 Samenvatting belangrijkste resultaten faalkansverdelingen kritisch overslagdebiet (zonder de waarden uit bijlage)

Voor de eventuele toepassing van de getalswaarden in de bovenstaande tabel in het WBI2017 in een toets op maat, wordt een iteratieve aanpak aanbevolen:

1. Keuze kansverdeling kritisch overslagdebiet voor een schatting van de golfhoogte  $H_{m0}$  in het ontwerp punt.
2. Uitvoering probabilistische berekening.
3. Controle of de golfhoogte  $H_{m0}$  uit het ontwerp punt ligt in de range van  $H_{m0}$  waarvoor de kansverdeling geldig is. Eventueel herhalen van stappen 1 en 2.

Een belangrijk resultaat is dat voor grasbekledingen op klei, binnen de gangbare taludhellingen, de kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet gunstiger, en vaak veel gunstiger, ligt dan de eerder afgeleide kansverdelingen. De met de kansverdelingen afgeleide rekenwaarden zijn daarmee aan de veilige kant, als het gaat om erosie van de grasbekleding op de kruin en het binnentalud. Doordat het mogelijk is dat er groot conservatisme in de -aannee zit, is het mogelijk dat dit ook zijn effect krijgt in de te ontwerpen kruinhoogte.

Het verdient de aanbeveling in vervolgstudies te kijken of de  $\mu$  en  $\sigma$  kunnen worden geparаметeriseerd in functies van taludhelling en golfhoogte. Dit kan handig zijn bij het afleiden van rekenwaarden van het kritisch overslagdebiet in de toekomst, omdat dan alleen de eigenschappen van de graszode zelf en het substraat nog bepalend zijn en er geen golfhoogteklassen meer hoeven te worden gehanteerd. Er ontstaan dan vier formules in plaats van een tabel met waarden.

Een tweede optie is om de formules te verwerken in software, zoals ook beschikbaar komt voor erosie van gras in de golfploopzone en de golfklapzone. Dit valt echter buiten de scope van deze studie.



## 5 Invloed overgangen en objecten

De invloed van overgangen en objecten wordt in de cumulatieve overbelastingmethode in rekening gebracht door de factoren  $\alpha_M$  en  $\alpha_S$ . De eerste factor staat voor de verhoogde erosieve belasting van de stroming bij overgangen en objecten en de tweede factor voor de sterktereductie rondom overgangen en objecten. De factoren zijn bij het afleiden van de hiervoor gepresenteerde kansverdelingen (hoofdstuk 4) van het kritisch overslagdebiet gelijk aan 1 gesteld, ofwel een dijk zonder overgangen. Ook de eerdere kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet en de hiervan afgeleide rekenwaarden houden niet expliciet rekening met het effect van overgangen en objecten.

Grootschalige overslagproeven en observaties van schade en falen van grasbekledingen bij hoogwaters hebben aangetoond dat overgangen en objecten een zwakke plek zijn in de bekleding. Eerdere studies naar het kwantificeren van dit effect, uitgaande van het erosiemodel 'cumulatieve overbelasting methode' zijn uitgevoerd in het kader van WBI 2017 [3] en [4]. De kennisontwikkeling op het gebied van de kwantificering van het effect van overgangen en objecten op erosie van gras staat nog in de kinderschoenen. Tijdens een expert sessie over het al dan niet meenemen van het effect van overgangen en objecten in het kader van het WBI2017 bleek er onder inhoudelijke experts nog geen consensus over de grootte van de toe te passen factoren voor verschillende overgangen en objecten. Waar de inhoudelijke experts het wel over eens waren was dat factoren  $\alpha_M$  en  $\alpha_S$  van respectievelijk 1,8 en 0,9 samen een bovengrens vormen.

Bij de conclusies over de invloed van overgangen en objecten wordt uitgegaan van een 'nette' overgang. Dat wil zeggen dat er tot aan het object of overgang een graszode aanwezig is en dat deze vergelijkbaar is met de graszode elders op het talud. Kale grond als gevolg van een kapotgereden berm langs een weg wordt bijvoorbeeld niet door de in [3] en [4] genoemde invloedsfactoren ondervangen. Ook als langs het object is aangevuld met zand in plaats van klei, dan kan dit zwakker zijn dan door de invloedsfactoren wordt ondervangen. Bij het ontwerp zal dus rekening moeten worden gehouden met robuustheid van een overgang bij dagelijks gebruik van de dijk, uitvoerbaarheid van het ontwerp, een overgang moet netjes kunnen worden aangelegd, en met de mogelijkheid van het voeren van het beheer en onderhoud.

Daarnaast zijn er ook "obstakels" die niet tot een zwakkere overgang leiden. Dit is zo bij een dwars op de dijk geplaatst hekwerk. Bij een hekwerk kan vaak moeilijk worden gemaaid, waardoor er een soort verhoging onder het hekwerk ontstaat. Aanstromend water zoekt de laagste plek en richt zich van de overgang af.

Onderaan elk talud bevindt zich de overgang naar een berm of het achterland. Ook deze overgang heeft een belasting verhogend effect, al is deze veel minder groot dan voor andere objecten en overgangen. Volgens [3] is de belasting verhogende factor  $\alpha_M$  (zie paragraaf 3.1) voor deze geometrische overgang gelijk aan 1 à 1,2, waarbij 1,2 wordt genoemd als conservatieve waarde. Indien de overgang is afgerond dan is de waarde zelfs ongeveer 1. De relatie tussen de afronding en de factor is in [3] niet nader gedefinieerd. De sterkte reducerende factor  $\alpha_S$  is 1,0. In bijlage C wordt het effect van deze altijd aanwezige overgang verder uitgewerkt.

In [3] en [4] wordt onderbouwd dat in het slechtste geval, bij een theoretisch meest ongunstige overgang van een gladde bekleding naar een 'ruwe' grasbekleding de factoren  $\alpha_M$  en  $\alpha_S$  gelijk zijn aan respectievelijk 1,8 en 0,9. Hierbij moet worden bedacht dat deze theorie

is gebaseerd op stationaire turbulente stroming. Bij de ontwikkeling van de cumulatieve overbelasting is vastgesteld dat het niet alleen de stroomsnelheid is die de belasting veroorzaakt, maar ook het overtrekkend golffront zelf met een bepaalde snelheid. Het is daarom best mogelijk dat de theoretische waarden te conservatief zijn. Alleen meer onderzoek kan hier een antwoord bieden.

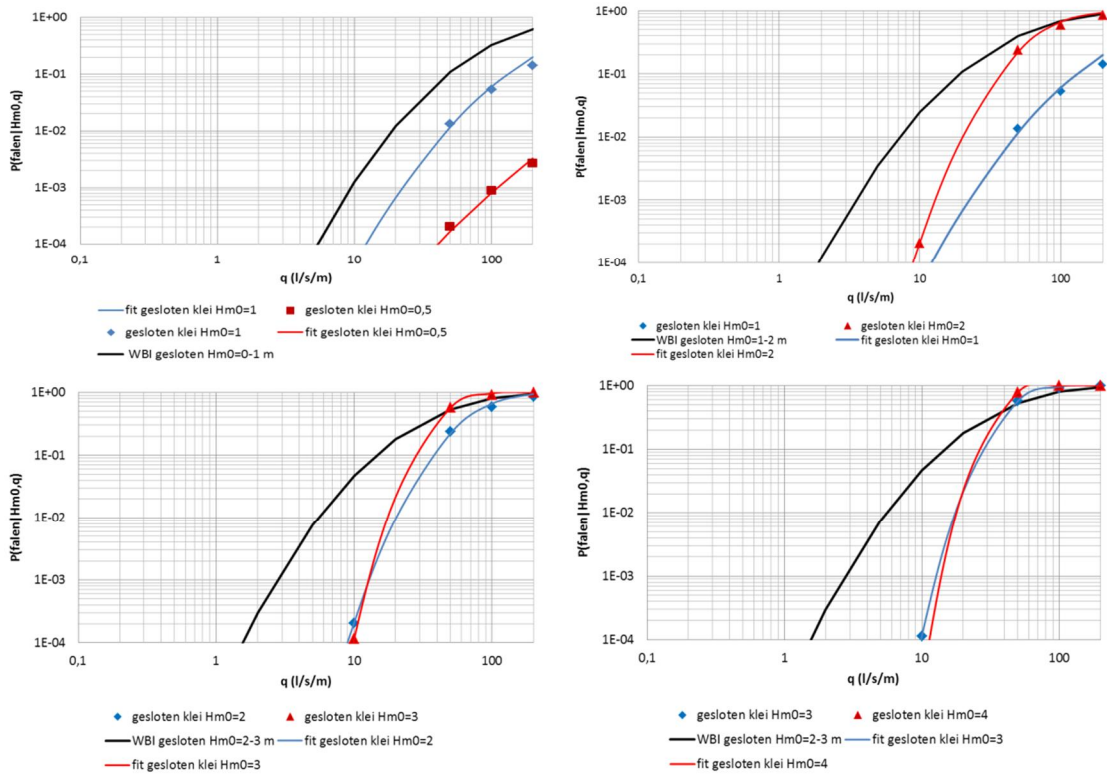
Wel is het zo dat in het verleden nauwelijks aandacht werd besteed aan overgangen, ondanks dat impliciet wel bekend was dat overgangen vaak de zwakste schakels zijn. Het is daarom goed dat nu expliciet aandacht aan overgangen wordt besteed, maar het is ook duidelijk dat er een optimalisatieslag mogelijk is.

Voor minder ongunstige objecten, zoals bomen, gelden volgens [3] factoren van  $\alpha_M=1,5$  en  $\alpha_S=0,9$ .

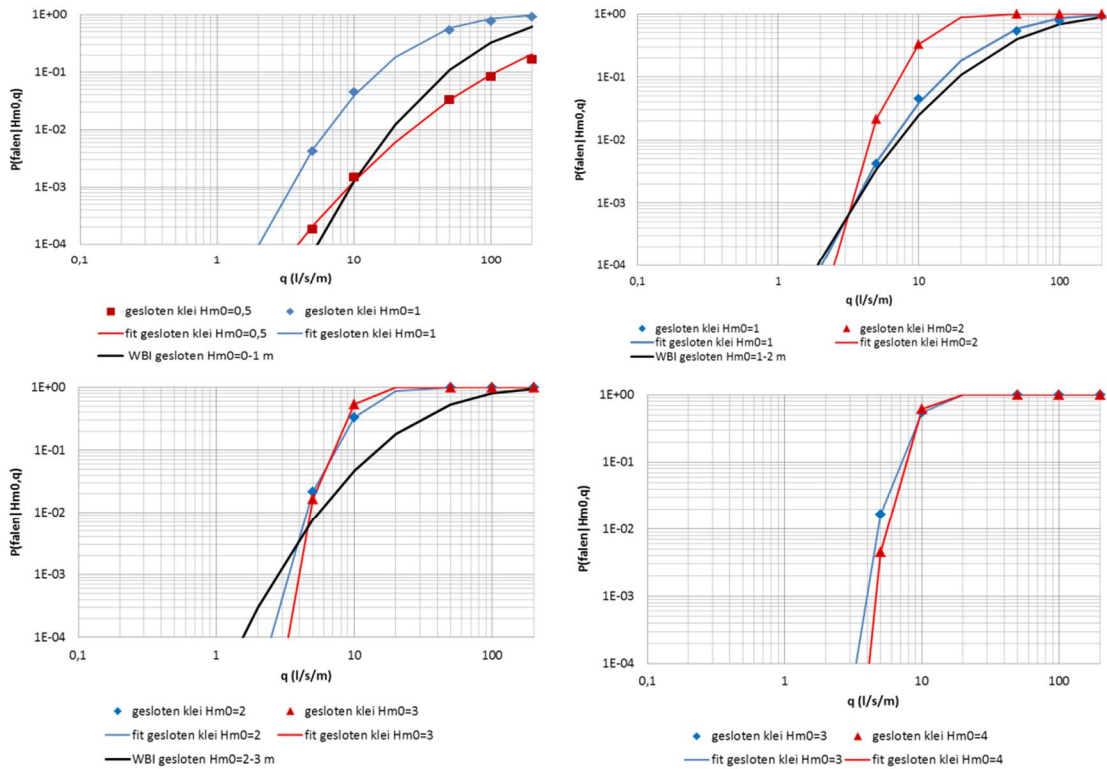
Voor de meest gangbare taluds van 1:2,3 tot 1:4,5 van een gesloten zode op klei betekent dit dat de verdeling als volgt wordt aangepast (Tabel 5.1, Figuur 5.1, Figuur 5.2 en Figuur 5.3).

Watersysteem	Talud	Zode	Substraat	Overgangen	H <sub>m0</sub> (m)	$\mu$ (l/s/m)	$\sigma$ (l/s/m)
Stormgedreven 3 uur maximaal overslagdebiet	1:2,3 - 1:4,5 $\alpha_a =$ 1,4	gesloten	klei	vrij van overgangen	0,5	113.667	427.925
					1	1.150	1.504
					2	127	83
					3	65	29
					4	50	17
				Geometrische overgang	0,5	55.598	192.069
				$\alpha_M = 1,1;$	1	729	915
				$\alpha_S = 1,0$	2	93	59
					3	51	22
					4	41	14
				gemiddeld	0,5	1.561	3.634
				$\alpha_M = 1,5;$	1	59	57
				$\alpha_S = 0,9$	2	13,3	6,1
					3	10,1	3,2
					4	9,6	2,3
				worst case	0,5	460	927
$\alpha_M = 1,8;$	1	24	19,8				
$\alpha_S = 0,9$	2	6,9	2,0				
	3	6,3	1,5				
	4	6,8	1,5				

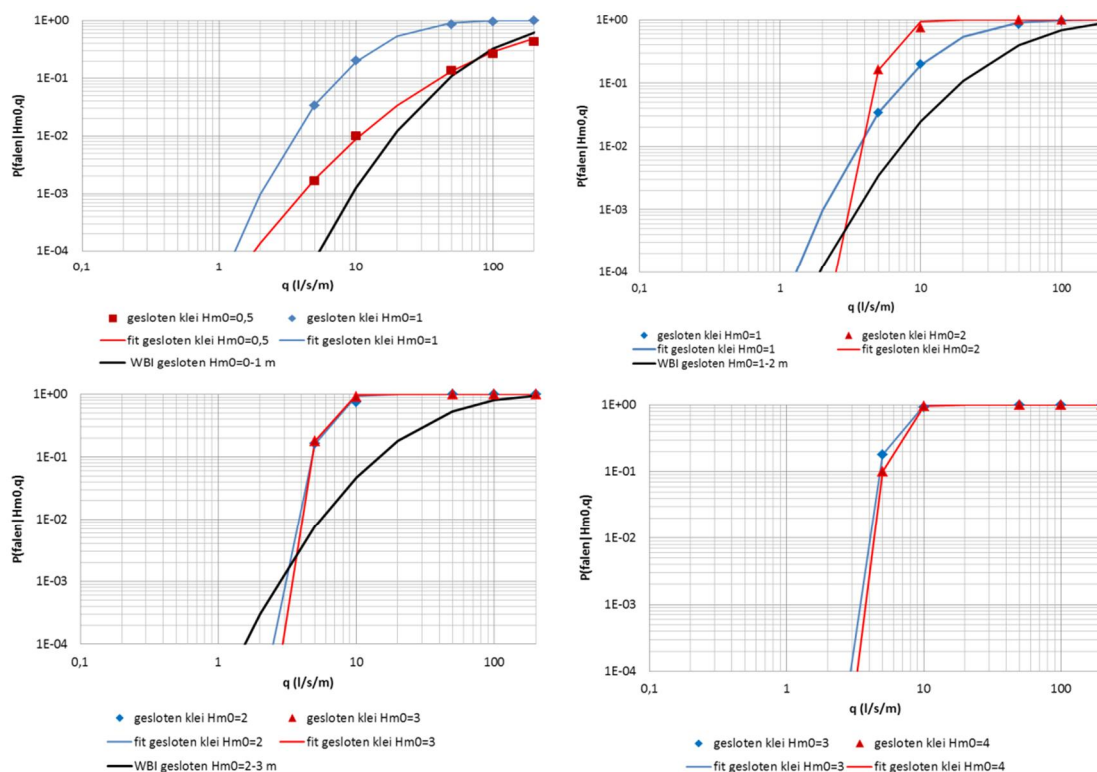
Tabel 5.1 Invloed overgangen en objecten op kansverdeling van het kritisch overslagdebiet



Figuur 5.1 Kansverdeling kritisch overslagdebiet voor gesloten zode op klei versnellingsfactor 1,4 en geometrische overgang talud-horizontaal ( $\alpha_M=1,1$   $\alpha_S=1,0$ ) met oude kansverdeling voor gesloten zode



Figuur 5.2 Kansverdeling kritisch overslagdebiet voor gesloten zode op klei versnellingsfactor 1,4 en gemiddelde factoren voor overgangen en objecten ( $\alpha_M=1,5$   $\alpha_S=0,9$ ) met oude kansverdeling voor gesloten zode

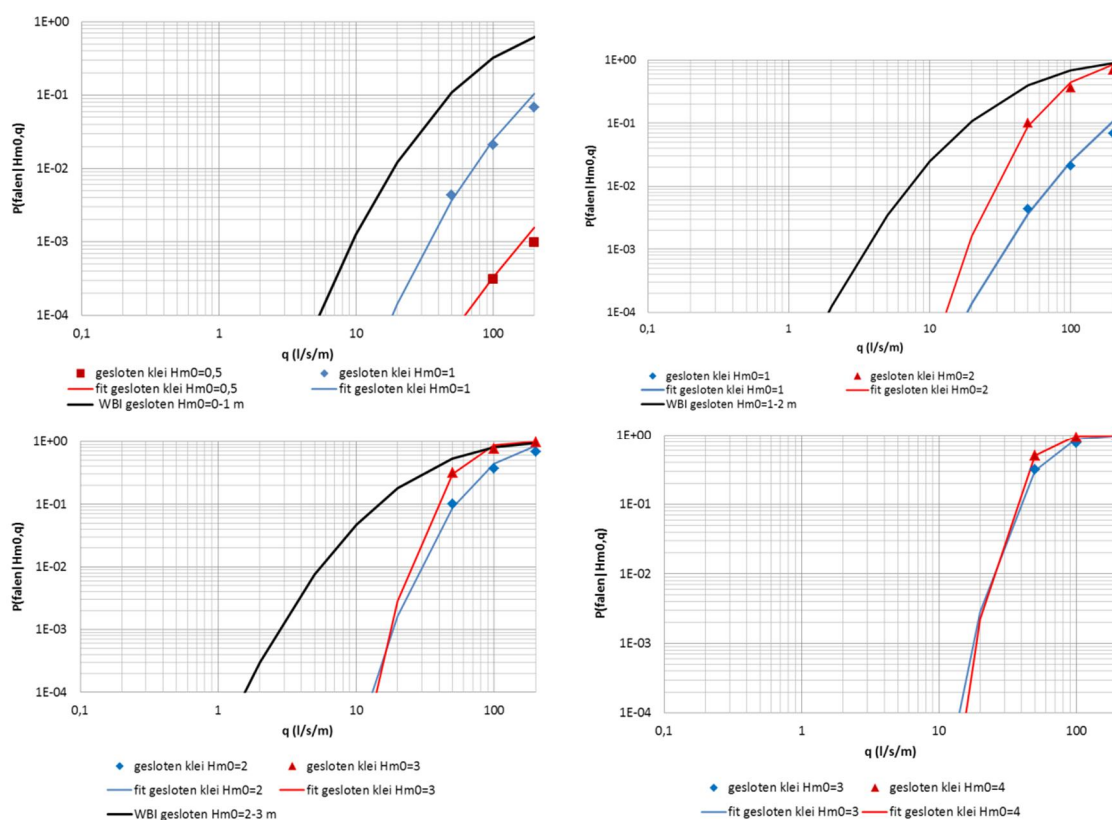


**Figuur 5.3** Kansverdeling kritisch overslagdebiet, berekend, gefit voor gesloten zode op klei versnellingsfactor 1,4 en worst case factoren voor overgangen en objecten ( $\alpha_M=1,8$   $\alpha_S=0,9$ ), met WBI2017 kansverdeling voor gesloten zode

Het effect van de geometrische overgang van talud naar achterland/ berm is relatief klein. De gefitte kansverdelingen liggen in het gebied van interesse, bij een kans van 0,1 à 0,01, ruim onder de eerder aangehouden kansverdelingen.

De gefitte kansverdelingen voor gemiddelde en ‘worst case’ overgangen en objecten ( $\alpha_M=1,8$  en  $\alpha_S=0,9$ ) liggen significant hoger (ongunstiger) dan de kansverdeling die wordt aangehouden in het WBI2017, waarin geen invloed van overgangen en objecten is meegenomen. De op basis van deze kansverdeling afgeleide rekenwaarden in het kader van eerdere versies van het OI2014 mogen dus niet zomaar worden overgenomen en toegepast voor dijken met overgangen, tenzij hier in het ontwerp een oplossing voor wordt bedacht. Bijvoorbeeld door de overgang te versterken of de belasting te verminderen: lokaal hogere dijk, of verplaatsing van de overgang of het object naar een minder aangevallen plek in het dijkprofiel zoals de kruin (zie onderstaand) of het achterland.

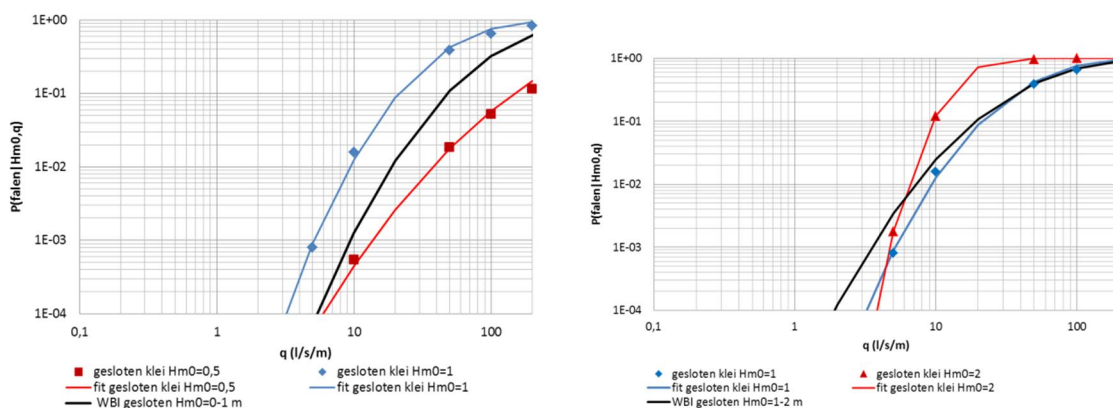
Voor overgangen en objecten op de kruin geldt een versnellingsfactor van 1,0 in plaats van 1,4. In dat geval worden de onderstaande resultaten verkregen (Figuur 5.4), uitgaande van een buitentaludhelling 1:4 en een stormduur gekarakteriseerd door 3 uur maximaal (stormgedreven watersystemen).



*Figuur 5.4 Kansverdeling kritisch overslagdebiet, berekend, gefit voor gesloten zode op klei versnellingsfactor 1,0 en worst case factoren voor overgangen en objecten ( $\alpha_M = 1,8$  en  $\alpha_S = 0,9$ ), met WBI2017 kansverdeling voor gesloten zode*

Op de kruin van de dijk met overgangen en objecten liggen de berekende faalkansen en de fits van de kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet lager dan de eerdere kansverdeling, waardoor de eerder afgeleide rekenwaarden in het kader van OI2014 hiervoor aan de veilige kant zijn.

Voor het rivierengebied, met relatief lage golven, maar een langere overslagduur (5 uur maximaal) en mogelijk een steiler talud (1:2) wordt voor objecten op de kruin onderstaand resultaat verkregen (Figuur 5.5). Vanwege de relatief lage golven worden alleen de grafieken tot  $H_{m0}=2$  m gegeven.



*Figuur 5.5 Kansverdeling kritisch overslagdebiet, berekend, gefit voor gesloten zode op klei versnellingsfactor 1,0 en worst case factoren voor overgangen en objecten ( $\alpha_M = 1,8$  en  $\alpha_S = 0,9$ ), buitentaludhelling 1:2 en overslagduur 5 uur met WBI2017 kansverdeling voor gesloten zode*

Voor relatief lage golven van 0,5 m ligt de fit van de kansverdeling van het kritisch overslagdebiet onder de eerder afgeleide kansverdeling. Voor hogere golven (1 m en hoger) is dit echter niet meer het geval, waardoor de eerder afgeleide rekenwaarden voor deze gevallen niet meer geldig zijn.

Voor alle gevallen geldt echter dat een golfoverslagdebiet van 1 l/s/m en kleiner een faalkans geeft die kleiner is dan  $10^{-6}$ . Dit betekent dat bij een overslagdebiet van 1 l/s/m bij de bovengenoemde gangbare taluds overgangen en objecten in het algemeen toelaatbaar zijn. Bij hogere overslagdebieten, vanaf 5 l/s/m neemt de berekende conditionele faalkans behoorlijk toe, tot orde  $10^{-1}$  à  $10^{-3}$ . De vraag of dit toelaatbaar is zou moeten worden bepaald door een probabilistische studie waarin ook de kans van optreden van de belasting wordt meegenomen. Dit ligt echter buiten de scope van deze studie.

## 6 Invloed golfoverslag op andere faalmechanismen en overige overwegingen voor het (niet) toelaten van veel golfoverslag

De bovenstaande analyse betreft alleen het mechanisme erosie van de grasbekleding op de kruin en het binnentalud.

Het toelaten van (veel) golfoverslag heeft echter ook een negatieve invloed op andere faalmechanismen:

- Afschuiven van de bekleding van het binnentalud (WBI2017 expliciet meenemen infiltratie vanaf een rekenwaarde van het overslagdebiet van 0,1 l/s/m)
- macrostabiliteit binnenwaarts:
  - Beperkte toepassingsmogelijkheid zonering (vanaf 0,1 l/s/m).
  - Toename waterspanningen in de dijk; verhoging freatisch vlak in de dijk (vanaf 0,1 l/s/m).

De in deze studie berekende kritische overslagdebieten zijn alleen toepasbaar als controles op deze overige mechanismen separaat worden uitgevoerd. In het kader van een ander OI-onderzoekspoor wordt hiernaar gekeken.

Momenteel staat in [1] dat er apart een check op afschuiven dient plaats te vinden. Dat zou gezien de huidige stand van zaken gehandhaafd moeten blijven. Dit kan betekenen dat in het ontwerp extra eisen moeten worden gesteld aan de kleilaagdikte op het binnentalud en/ of de taludhelling en/of drainage van de binnenteen et cetera.

In de schematiseringshandleiding grasbekledingen die voor het WBI2017 is opgesteld wordt een conservatieve methode gegeven waarmee de stijging van het freatisch vlak in de dijk bij golfoverslag kan worden geschat [8] (dit was eerder al eens beschreven in [9]). De stijging van de freatische lijn is van belang bij het bepalen van de stabiliteit van de bekleding bij overslag, maar kan mogelijk ook worden gebruikt bij de beoordeling op macrostabiliteit. Hierbij wordt opgemerkt dat de methode is opgesteld voor toetsing en dat dit misschien niet één op één kan worden toegepast voor een dijkontwerp.

Naast de negatieve invloed op andere faalmechanismen kunnen ook andere overwegingen spelen om een lagere rekenwaarde van het overslagdebiet te kiezen:

- Toegankelijkheid van de kruin voor inspectie tijdens hoogwater, voor noodreparaties, bereikbaarheid voor hulpdiensten, beschikbaarheid als vluchtweg. Hierbij kunnen mogelijk lagere betrouwbaarheidseisen worden gehanteerd.
- Leidt de overslag tot onacceptabele, onveilige, peilstijging binnendijks, ofwel kan het water voldoende veilig worden geborgen?

Deze aspecten kunnen een onderdeel van de overweging zijn, maar worden in het kader van dit project niet verder behandeld.



## 7 Conclusies

In het kader van het OI2014v4 zijn, op basis van state of the art kennis over erosie van grasbekledingen bij golfoverslag, kansverdelingen bepaald van het kritisch overslagdebiet. Dit is gedaan voor verschillende graskwaliteiten, substraten (klei / zand), taludhellingen, golfhoogtes en de aanwezigheid van overgangen en objecten. Bij het laatste wordt opgemerkt dat de kennis over kwantificering van het effect van overgangen en objecten nog weinig ontwikkeld is, waardoor is uitgegaan van een conservatieve aanname over deze invloed (zie H5). De kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet zijn vergeleken met eerder afgeleide kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet, welke ten grondslag liggen aan de rekenwaarden in het OI2014v3. Deze kansverdelingen geven de relatie tussen het optreden van een bepaald overslagdebiet en de kans op falen van de grasbekleding.

Geconcludeerd wordt dat voor gangbare taluds met een helling 1:2,3 tot 1:4,5 met een open of gesloten grasbekleding op klei een veel gunstiger kansverdeling van het kritisch overslagdebiet geldt dan de oude kansverdeling. De faalkans bij een overslagdebiet van 10 l/s/m is bijvoorbeeld in de orde van minimaal 10 tot meer dan 100 keer lager dan volgt uit de oude kansverdeling. Dit leidt ertoe dat de rekenwaarden in het huidige OI2014v3 aan de (zeer) veilige kant zijn voor deze taluds. Toepassing van deze rekenwaarden is dus veilig, maar men moet zich realiseren dat ze voor gangbare taluds van gras op klei conservatief zijn.

Grasbekledingen op zand resulteren in minder gunstige kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet, waardoor de ontwerpwaarden van het kritisch overslagdebiet uit het OI2014v3 niet veilig zijn. Hierbij wordt opgemerkt dat grasbekledingen op zand om diverse redenen niet gangbaar en ongewenst zijn bij het ontwerpen.

De invloed van overgangen en objecten is expliciet meegenomen bij het bepalen van de kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet. Dit is een grote stap voorwaarts ten opzichte van het impliciet meenemen van objecten en overgangen, of het negeren ervan. De kennis over de invloed van objecten en overgangen is echter nog gering [3], waardoor gebruik is gemaakt van conservatieve schattingen van de invloed. Dit wil zeggen dat er is uitgegaan van een grote negatieve invloed van overgangen en objecten en het verdient de aanbeveling dit nader te onderzoeken, zodat onderscheid kan worden gemaakt tussen 'worst case' objecten en overgangen en minder kritische overgangen en objecten. Ondanks dat is uitgegaan van worst case overgangen en objecten kunnen deze in sommige gevallen toch worden toegelaten. Indien deze vanuit het oogpunt van erosie van de grasbekleding niet kunnen worden toegelaten, dan zal dit mogelijk in het ontwerp kunnen worden opgelost. Bijvoorbeeld door het aanbrengen van extra kleilaagdikte of geotextiel.

De geometrische overgang van talud naar achterland of berm is in deze studie ook expliciet meegenomen. Dit was nog nooit eerder gebeurd. De invloed hiervan is ongunstig, echter maar in geringe mate. De kansverdeling van het kritisch overslagdebiet is gunstiger dan de eerder afgeleide kansverdeling.

De bovenstaande conclusies zijn in gecondenseerde vorm geschreven naar een tekstvoorstel voor de samensteller(s) van het OI2014v4. Het tekstvoorstel is opgenomen in Bijlage B. De rekenwaarden en hun toepassingsvoorwaarden uit het OI2014v3 zijn bijgesteld op basis van de opgedane inzichten.

Aansluitend op de conclusies worden de volgende aanbevelingen gegeven:

1. Aanbevolen wordt om de cumulatieve overbelastingbenadering in software te implementeren zodat de tussenstap met kritische overslagdebieten niet langer nodig is.
2. Indien de voorgaande aanbeveling op bezwaren stuit, dan wordt aanbevolen om de relatie tussen het kritische overslagdebiet en de significante golfhoogte parametrisch te beschrijven. Nu moeten gebruikers zelf controleren of de vooraf gekozen kansverdeling van het kritische overslagdebiet past bij de golfcondities die in de faalkansberekening van belang blijken. Dit is dan niet langer nodig.

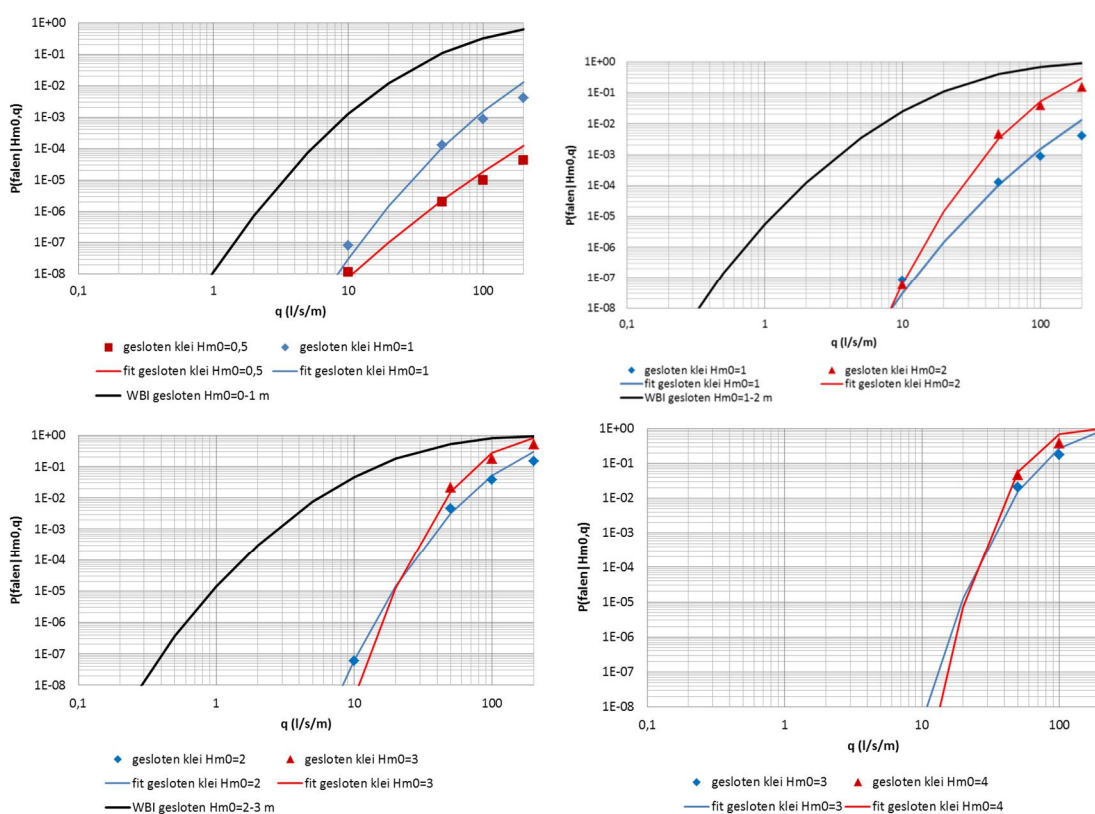
## 8 Referenties

- [1] Handreiking ontwerpen met overstromingskansen Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskans-normen, Rijkswaterstaat OI2014v3, juli 2015
- [2] Memo Verdelingen kritisch overslagdebiet WTI2017 1220086-005-HYE-0003, d.d. 10 september 2015
- [3] WTI 2017 Onderzoek en ontwikkeling landelijk toetsinstrumentarium, Product 5.8 Validatie erosiebestendigheid overgangen, Deltares nr. 1209437-003-HYE-0001, juni 2015
- [4] Invloed van overgangen op het kritieke overslagdebiet, Deltares nr. 1220086-016 WBI Productnummer: 5.37, augustus 2015
- [5] Memo Onderbouwing kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet en afgeleide rekenwaarden voor het OI, d.d. 15 april 2016, Deltares kenmerk 1230090-011-GEO-0004, van A. van Hoven (Deltares) en J.W. van der Meer (Van der Meer Consulting)
- [6] Technisch Rapport Golfoploop en Golfoverslag bij Dijken, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Delft, mei 2002
- [7] WTI 2017 Onderzoek en ontwikkeling landelijk toetsinstrumentarium, Product 5.12 Analyses grass erosion in wave run-up and wave overtopping conditions, Deltares nr. 1209437-005-HYE-0003, maart 2015
- [8] Schematiseringshandleiding voor toetsing grasbekledingen WTI-2017, cluster 5, Product 5.27v3, Deltares kenmerk 1220086-003-HYE-0002, februari 2016
- [9] Handreiking Toetsen Grasbekledingen op Dijken t.b.v. het opstellen van het beheerdersoordeel (BO) in de verlengde derde toetsronde, Rijkswaterstaat 25-10-2012

## A Kansverdelingen kritisch overslagdebiet taludhelling flauwer dan 1:4,5 en kruin

### Resultaten gesloten zode op klei taludhelling flauwer dan 1:4,5

De berekende faalkansen zijn uitgezet in grafieken (Figuur 8.1), waarin tevens de oude kansverdeling van het kritisch overslagdebiet voor een gesloten zode is gegeven. De versnellingsfactor voor flauwe taluds is 1,2.

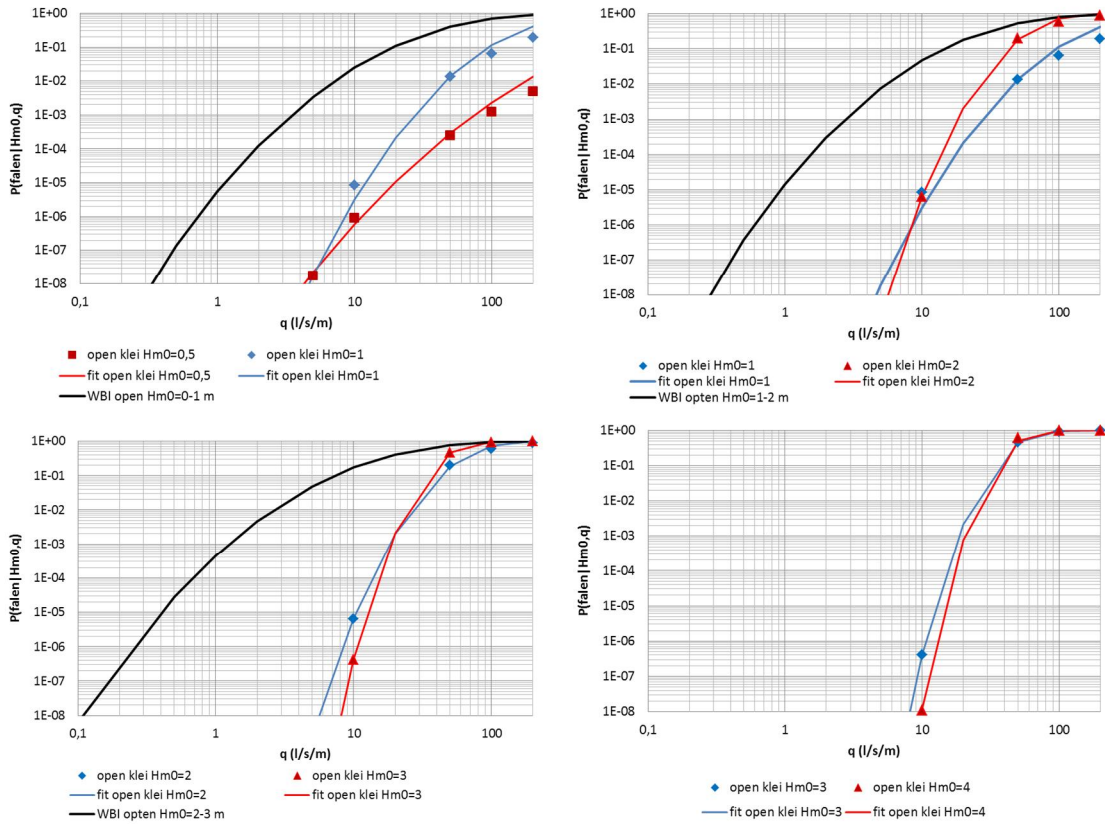


Figuur 8.1 Kansverdeling kritisch overslagdebiet, berekend, gefit voor gesloten zode op klei versnellingsfactor 1,2 met oude kansverdeling voor gesloten zode

Logischerwijs liggen de berekende faalkansen en de gefitte kansverdelingen lager dan bij de versnellingsfactor van 1,4. De gefitte kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet liggen veel lager dan de oude verdelingen.

### Resultaten open zode op klei taludhelling flauwer dan 1:4,5

De berekende faalkansen zijn uitgezet in grafieken (Figuur 8.2), waarin tevens de oude kansverdeling van het kritisch overslagdebiet voor een open zode is gegeven.

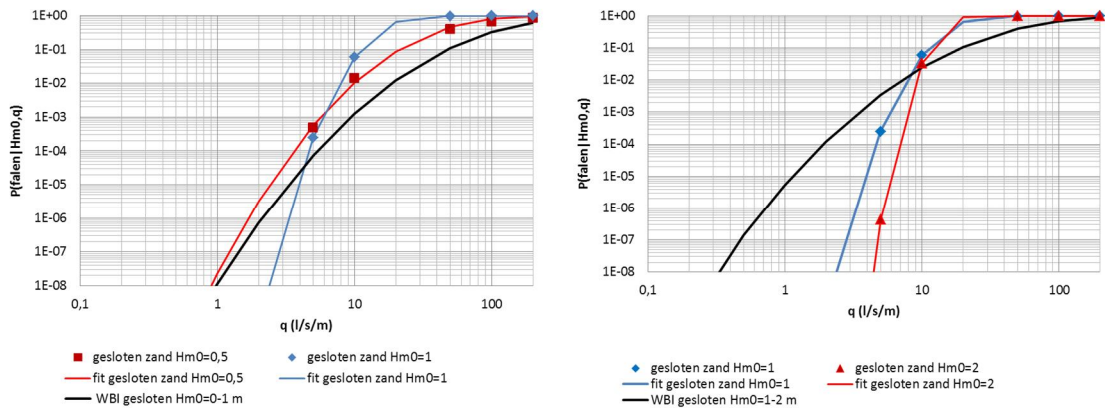


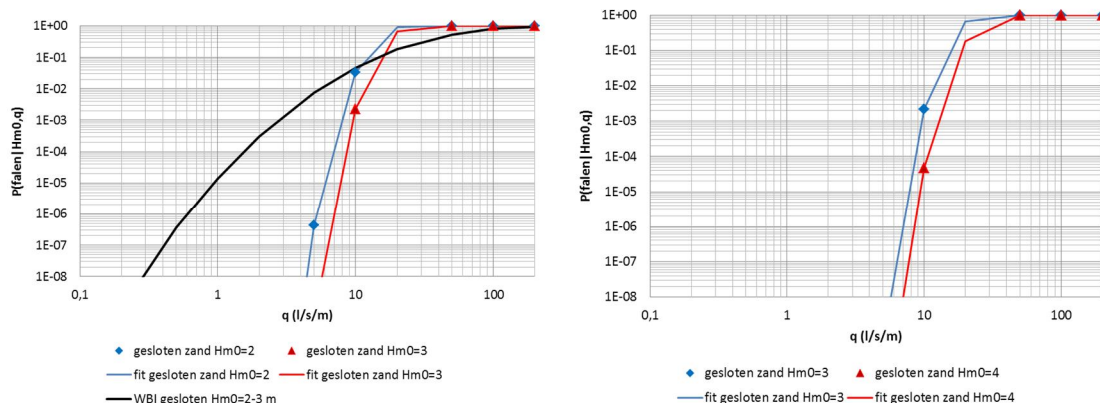
Figuur 8.2 Kansverdeling kritisch overslagdebiet, berekend, gefit voor open zode op klei versnellingsfactor 1,2 met oude kansverdeling voor open zode

Logischerwijs liggen ook in dit geval de berekende faalkansen en de gefitte kansverdelingen lager dan bij de versnellingsfactor van 1,4. De gefitte kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet liggen ook lager dan de eerder bepaalde verdelingen.

### Resultaten gesloten zode op zand taludhelling flauwer dan 1:4,5

De berekende faalkansen zijn uitgezet in grafieken (Figuur 8.3), waarin tevens de oude kansverdeling van het kritisch overslagdebiet voor een gesloten zode is gegeven.



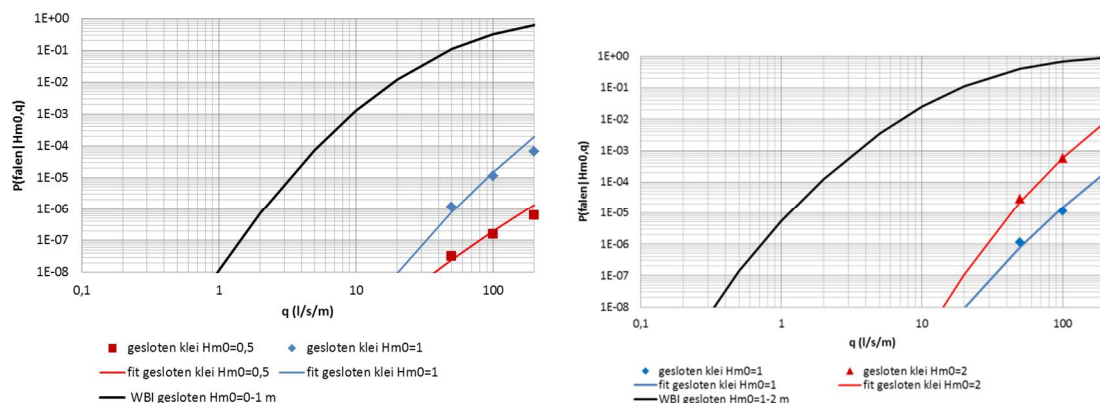


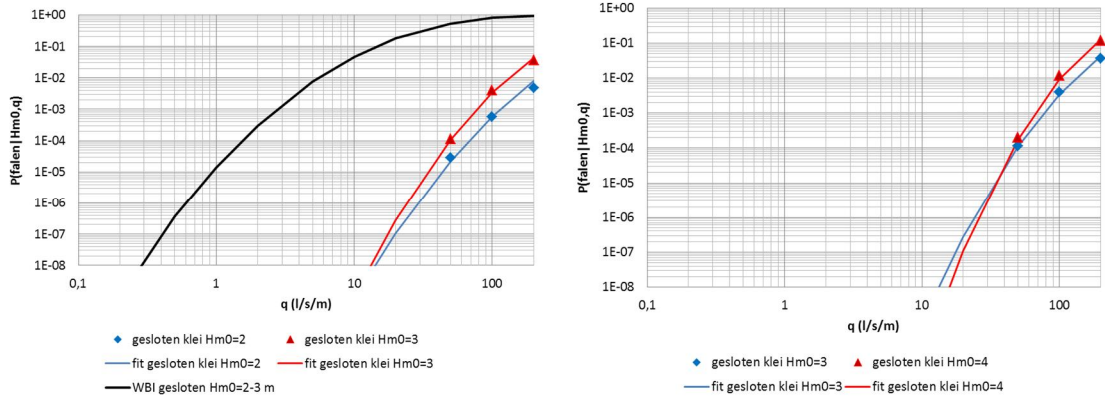
Figuur 8.3 Kansverdeling kritisch overslagdebiet, berekend, gefit voor gesloten zode op zand versnellingsfactor 1,2 met oude kansverdeling voor gesloten zode

Hoewel de berekende faalkansen lager zijn dan in het geval van steilere taluds, liggen de kansen nog steeds gedeeltelijk boven de eerder afgeleide kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet. Dit wordt zoals eerder genoemd veroorzaakt door het differentiëren naar substraat (zand/klei) zoals nu is toegepast.

### Resultaten gesloten zode op klei kruin

De berekende faalkansen zijn uitgezet in grafieken (Figuur 8.4), waarin tevens de oude kansverdeling van het kritisch overslagdebiet voor een gesloten zode is gegeven. De versnellingsfactor voor de kruin is 1,0.



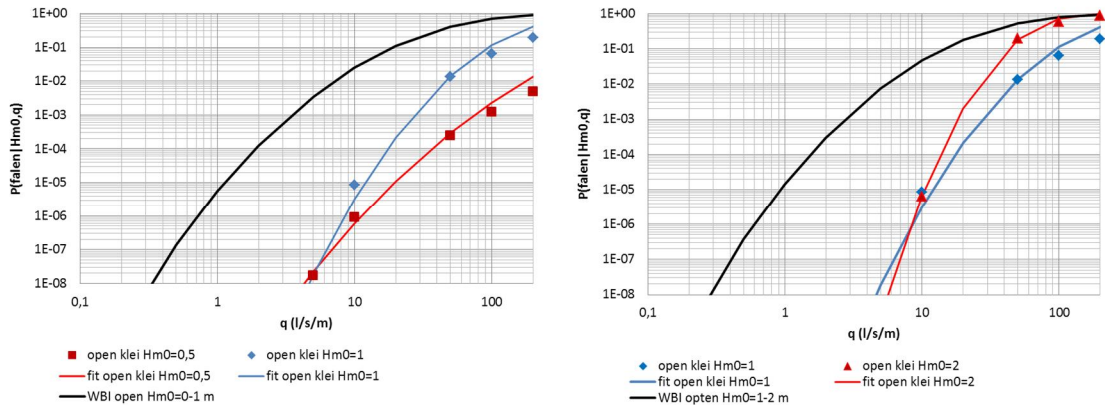


Figuur 8.4 Kansverdeling kritisch overslagdebiet, berekend, gefit voor gesloten zode op klei versnellingsfactor 1,0 met oude kansverdeling voor gesloten zode

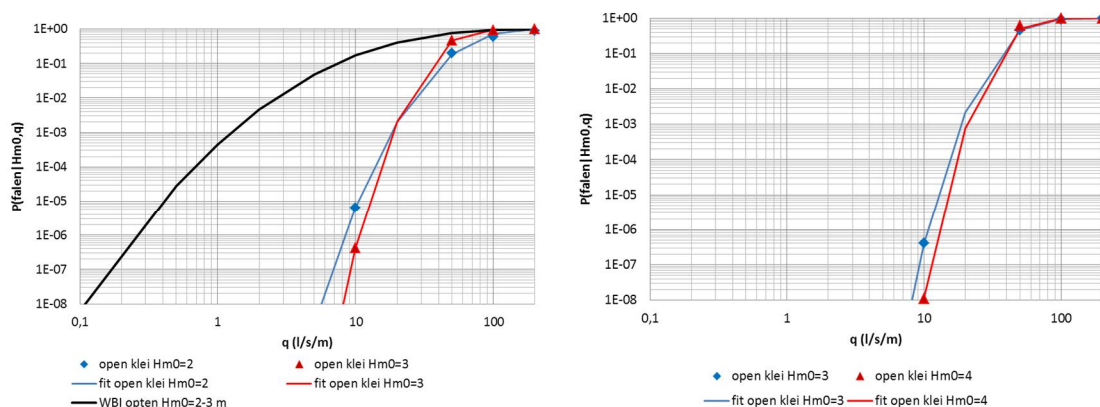
Logischerwijs liggen de berekende faalkansen en de gefitte kansverdelingen lager dan bij de versnellingsfactor van 1,4 en 1,2. De gefitte kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet liggen veel lager dan de eerder bepaalde verdelingen.

### Resultaten open zode op klei kruin

De berekende faalkansen zijn uitgezet in grafieken (Figuur 8.5), waarin tevens de oude kansverdeling van het kritisch overslagdebiet voor een open zode is gegeven.





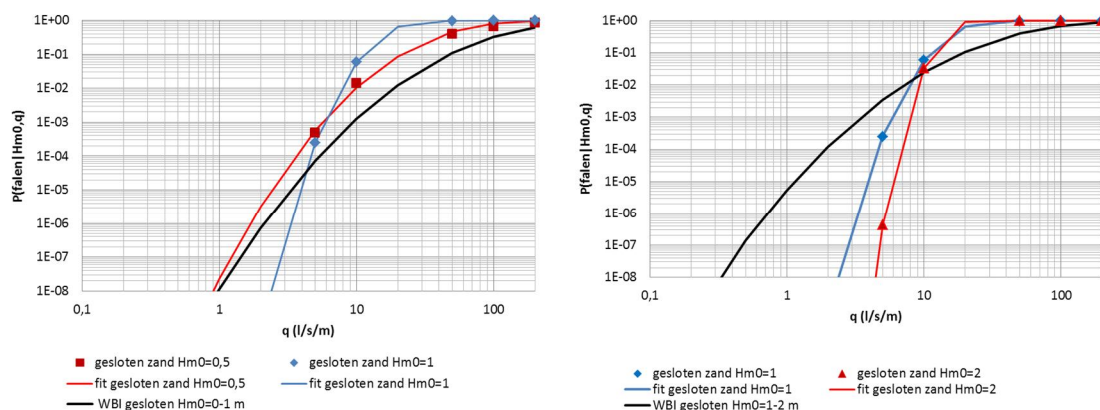


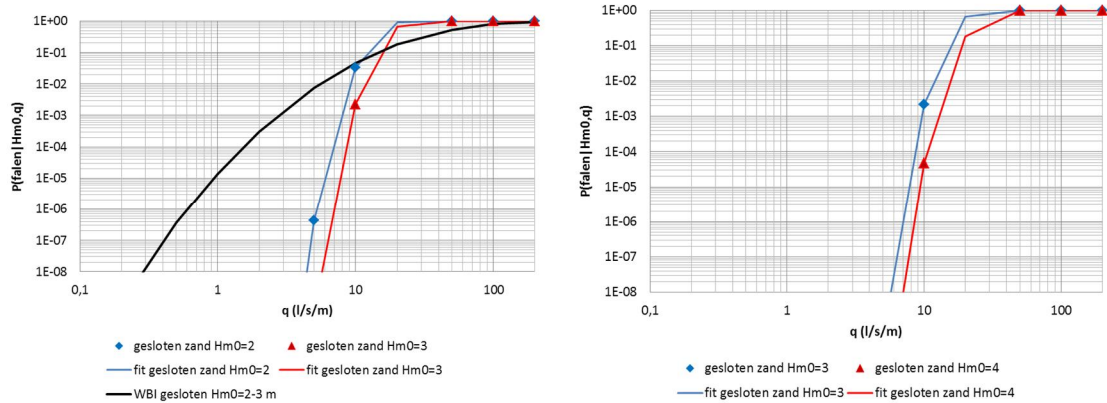
*Figuur 8.5 Kansverdeling kritisch overslagdebiet, berekend, gefit voor open zode op klei versnellingsfactor 1,0 met oude kansverdeling voor open zode*

Logischerwijs liggen ook in dit geval de berekende faalkansen en de gefitte kansverdelingen lager dan bij de versnellingsfactor van 1,4 en 1,2. De gefitte kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet liggen ook in dit geval veel lager dan de eerder bepaalde verdelingen.

### Resultaten gesloten zode op zand kruin

De berekende faalkansen zijn uitgezet in grafieken (Figuur 8.6), waarin tevens de oude kansverdeling van het kritisch overslagdebiet voor een gesloten zode is gegeven.





Figuur 8.6 Kansverdeling kritisch overslagdebiet, berekend, gefit voor gesloten zode op zand versnellingsfactor 1,0 met oude kansverdeling voor gesloten zode

Hoewel de berekende faalkansen op de kruin lager zijn dan in het geval van taluds, liggen de kansen nog steeds grotendeels boven de eerder afgeleide kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet. Dit wordt zoals eerder genoemd veroorzaakt door het differentiëren naar substraat (zand/klei) dat nu is toegepast.

## B Aanlevering tekst voor OI2014 v4

*Onderstaande tekst is aangeleverd aan de samenstellers van het OI2014 v4 en dient als input voor de update van het hoofdstuk 3 'Hoogte' uit het OI2014 v3. Opgemerkt wordt dat de uiteindelijke tekst is uitgebreid met achtergrond over de faalkanseis en enigszins is herschreven. De uiteindelijke versie zal binnenkort te vinden zijn in OI2014v4.*

De kans op het falen van een dijk door golfoverslag moet kleiner zijn dan de faalkanseis. Bij de beoordeling van de erosiebestendigheid van een ontwerp van een met gras bekleed binnentalud kan worden uitgegaan van de rekenwaarden van het kritieke overslagdebiet  $q_c$  uit Tabel B.1 (ter vervanging van Tabel 5 in OI2014 v3). Benadrukt wordt dat ook een groter kritiek overslagdebiet kan worden aangehouden als:

1. Het binnentalud op een groter overslagdebiet wordt ontworpen. Dit kan door:
  - a. Gebruik te maken van andere erosiebestendige materialen zoals asfalt, open steenasfalt, versterkt gras en dergelijke
  - b. De rekenwaarde van het kritieke overslagdebiet locatie-specifiek af te leiden, op basis van de gegevens en gedachten die ten grondslag liggen aan de rekenwaarden in Tabel B.1. Dit betreft maatwerk en wordt bij het ontwerp alleen aanbevolen als hiermee wezenlijke besparingen zijn te realiseren.
2. De kans voldoende klein is dat door overslag een overstroming optreedt zonder het bezwijken van de kering. Het gaat hierbij alleen over overstromingen met substantiële economische schade of slachtoffers tot gevolg.

$q_c$ (l/s/m)	Aanvullende eisen
0,1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geen eisen</li> </ul>
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• gesloten of open zode op klei*</li> <li>• geen eisen aan objecten en overgangen</li> <li>• voldoende stabiliteit**</li> </ul>
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toepasbaar in twee mogelijke gevallen: <ul style="list-style-type: none"> <li>– gesloten zode op klei* en <math>H_{m0} &lt; 4</math> m <b>of</b></li> <li>– open zode op klei* en <math>H_{m0} &lt; 2</math> m</li> </ul> </li> <li>• taludhelling flauwer dan 1:2,3</li> <li>• geen eisen aan objecten en overgangen op kruin</li> <li>• op talud geen objecten groter dan <math>0,15 \times 0,15</math> m<sup>2</sup> en geen overgangen</li> <li>• voldoende stabiliteit**</li> </ul>
10	<ul style="list-style-type: none"> <li>• gesloten zode op klei</li> <li>• taludhelling flauwer dan 1:2,3</li> <li>• objecten en overgangen op de kruin toegestaan (geldt niet in het bovenrivierengebied)</li> <li>• op talud geen objecten groter dan <math>0,15 \times 0,15</math> m<sup>2</sup> en geen overgangen</li> <li>• <math>H_{m0} &lt; 4</math> m</li> <li>• controle stabiliteit**</li> </ul>
<p>* Minimale gegarandeerde dikte van 0,4 m</p> <p>** Controle of bij de rekenwaarde van het overslagdebiet leidt tot onaanvaardbare toename van de faalkans als gevolg van de geotechnische instabiliteit van de bekleding op het binnentalud of macrostabiliteit binnenwaarts. Dit kan leiden tot aanvullende eisen ten aanzien van kleilaagdikte, kleikwaliteit, aanbrengen drainage, taludhelling en dergelijke</p>	

Tabel B.1 Overzicht rekenwaarden voor het kritieke overslagdebiet

In Tabel B.1 is steeds uitgegaan van een 'nette' overgang. Dat wil zeggen dat er tot aan het object of overgang een graszode aanwezig is en dat deze vergelijkbaar is met de graszode elders op het talud.

Grasbekledingen worden ontworpen op klei of op een kleilaag. Voor grasbekledingen op zand worden geen rekenwaarden afgegeven. De reden is dat het zeer onzeker is of een gesloten zode zich op zand kan ontwikkelen. Een ontwerp van een zandtalud met grasbekleding moet worden gezien als maatwerk.

Bij een zanddijk met een kleibekleding heeft de kleibekleding verschillende functies. Voor de toepassing van de rekenwaarden van het kritieke overslagdebiet van 1-10 l/s/m uit Tabel B.1 moet sprake zijn van een minimale gegarandeerde dikte van 0,4 m. Vanuit de substraatfunctie voor het gras en vooral het voorkomen of in de hand houden van graafgangen van konijnen, ratten, muizen en mollen tot in de zandkern zal een grotere dikte moeten worden aangelegd: 0,8 m. Ook vanwege de stabiliteit van de bekleding bij golfoverslag kan het nodig zijn om een dikkere laag aan te leggen.

Bij het ontwerp van een grasbekleding kan worden uitgegaan van een gesloten zode, tenzij er slechte ervaringen zijn waarbij ondanks zorgvuldig beheer en onderhoud van de te verbeteren dijk, of dijken in de omgeving, niet hebben geleid tot een gesloten zode. Hierdoor zou de beheer-, onderhouds- of handhaaf inspanning om een gesloten zode te kunnen garanderen onredelijk hoog kunnen worden. Dit is een ontwerpafweging. In deze gevallen kan worden gekeken of een open zode haalbaar is, of dat moet worden uitgegaan van een

fragmentarisch zode, waardoor de dijk hoger moet worden aangelegd, of een harde bekleding.

Objecten en overgangen verdienen bij het ontwerpen van dijken aandacht. Bij het ontwerp van de dijk kan hier op verschillende manieren mee worden omgegaan:

- a. Het treffen van een maatregel bij een overgang of object, waardoor falen van het gras daar niet optreedt, of het falen van de grasbekleding niet leidt tot doorgaande erosie leidend tot een doorbraak. Hierbij kan worden gedacht aan het aanbrengen van dikke erosiebestendige klei rondom een overgang of object of het toepassen van een geotextiel.
- b. Het hanteren van een lagere rekenwaarde van het kritisch overslagdebiet bij de bepaling van de vereiste kruinhoogte.
- c. Het vermijden van overgangen en objecten groter dan  $0,15 \times 0,15 \text{ m}^2$ , en/of het verplaatsen van overgangen en objecten naar een minder kwetsbare plaats (binnendijks of op de kruin).

Bij het ontwerp zal rekening moeten worden gehouden met de mogelijkheden van beheer en onderhoud.

*Overige toelichtingen uit het OI2014v3 over de kerende hoogte kunnen worden gehandhaafd, zoals over het verschil tussen falen en overbelasting, de omgang met gebruiksgrenstoestanden (bijv. begaanbaarheid en zoutbezwaar) en het vervallen van de waakhoogte.*

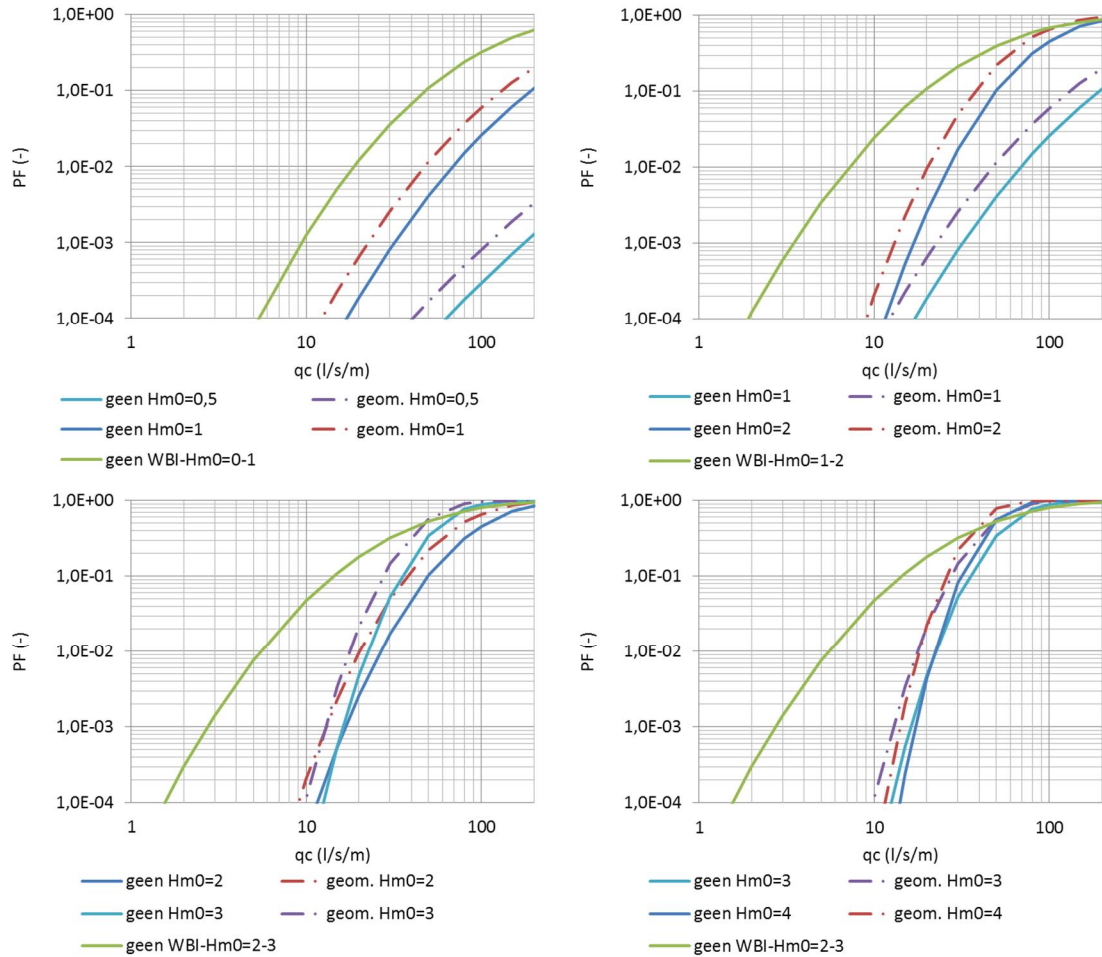
## C Geometrische overgang talud naar achterland of berm

Elk dijktaalud eindigt bij een overgang naar het achterland of berm. De geometrische overgang van talud naar berm en of achterland zorgt voor een verhoging van de erosieve belasting op de grasbekleding. De mate van de belastingverhoging hangt af van de afronding van de overgang. De bijhorende belasting verhogende factor  $\alpha_M$  (zie H3), varieert tussen 1 en 1,2 [3]. De waarde van 1,2 wordt een conservatieve waarde genoemd. Bij een afgeronde overgang zou de factor in de buurt van 1 moeten liggen. Er is uitgegaan van een gemiddelde waarde van 1,1. De sterkte wordt verondersteld gelijk te zijn aan de sterkte van het gras op de rest van het talud, ofwel de sterkte reductiefactor is 1.

Voor het meest gangbare scenario van een taludhelling tussen 1:2,3 en 1:4 (versnellingsfactor 1,4) en een gesloten zode op klei zijn de kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet voor de gevallen met en zonder de geometrische overgang in onderstaande figuren gezet (Figuur C.1). Tevens staan hierin de kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet die ten grondslag liggen aan de rekenwaarden in het OI2014v3.

Het expliciet meenemen van de geometrische overgang leidt tot een relatief kleine verhoging van de kansverdeling van het kritisch overslagdebiet. Voor het uitgewerkte, meest gangbare scenario, blijven bijna alle nieuwe gefitte kansverdelingen gunstiger dan de eerdere kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet. Alleen de gefitte kansverdeling voor een golfhoogte van 3 à 4 m en bij het meenemen van de geometrische overgang ligt bij grote overslagdebieten (ca. 40 l/s/m en meer) iets ongunstiger dan de eerdere kansverdeling. Bijvoorbeeld, de kans op falen van de grasbekleding bij een overslagdebiet van 50 l/s/m en een golfhoogte van 4 m is volgens de gefitte kansverdeling 80%. Volgens de eerdere kansverdeling voor de golfhoogteklasse van 2-3 m is deze kans 50%. Voor de bepaling van de rekenwaarden zijn deze verschillen niet van belang. Hiervoor zijn de overslagdebieten bij een kans van ongeveer 0,1-0,01 veel belangrijker. De kans op falen bij 10 l/s/m is orde 10 tot ruim 100 keer kleiner dan volgt uit de oude kansverdelingen. Dit is een groot verschil.

Omdat de kansverdelingen gunstiger liggen dan de eerder aangehouden kansverdelingen uit het OI2014v3, kan worden gesteld dat de eerder afgeleide rekenwaarden van het kritisch overslagdebiet, zoals opgenomen in het OI2014v3, aan de veilige kant zijn, ook als de geometrische overgang van talud naar horizontaal expliciet in rekening wordt gebracht.



*Figuur C.1 Invloed van geometrische overgang op kansverdeling van het kritisch overslagdebiet  $q_c$  (l/s/m) voor verschillende golfhoogtes  $H_{m0}$  (m) met daarbij de oude kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet zoals gebruikt in het WBI voor verschillende golfhoogte klassen*