

Rekenwaarden erosieparameters gras op zand bekledingen

Gras op zand onderzoek product 9



Rekenwaarden erosieparameters gras op zand bekledingen
Gras op zand onderzoek product 9

Rekenwaarden erosieparameters gras op zand bekledingen

Gras op zand onderzoek product 9

Opdrachtgever	Waterschap Drents Overijsselse Delta
Contactpersoon	P. Schoonen
Referenties	Opdracht onderzoek gras op zand, kenmerk Z/19/025946/137132 d.d. 5 mei 2020
Trefwoorden	Grasbekleding, golfoverslagproeven, golfklapproeven, gras op zand, Vechtdijk, erosie, rekenwaarden

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	16-12-2021
Projectnummer	11204369-002
Document ID	11204369-002-GEO-0019
Pagina's	56
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	W.J. Klerk A. van Hoven L. Wopereis	F. Diermanse	G. de Vries	
1.0	W.J. Klerk A. van Hoven L. Wopereis	F. Diermanse T. Stoutjesdijk W. Kanning (Bijlage H)	G. de Vries	

Samenvatting

Voor het project gras op zand is onderzoek gedaan naar de erosiebestendigheid van grasbekledingen die direct wortelen op een substraat van zand. Het onderzoek heeft onder andere bestaan uit grootschalige erosieproeven op de Overijsselse Vechtdijk. Het onderzoek heeft geresulteerd in kansverdelingen van parameters die kunnen worden gebruikt in erosiemodellen. Dit geldt voor zowel erosie door golfklappen op het buitentalud als erosie door golfoverslag op de kruin en het binnentalud.

Voor de veiligheidsbeoordeling en scope bepalende berekeningen bij dijkversterkingen wordt gebruik gemaakt van het Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium BOI. In het BOI wordt voor de beoordeling van de grasbekleding op de kruin en het binnentalud gebruik gemaakt van kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet. In deze studie zijn op basis van de kansverdeling van de kritische stroomsnelheid kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet bepaald. Hierbij is gebruik gemaakt van het erosiemodel voor grasbekledingen: cumulatieve overbelastingmethode. De aanpak is gelijk geweest aan die eerder is gehanteerd voor het Ontwerp Instrumentarium OI2014 versie 4.

Voor het buitentalud in de golfklapzone wordt in het BOI gebruik gemaakt van een semi-probabilistische beoordeling. Op basis van een kalibratiestudie zijn voor het standtijdlijn model rekenwaarden bepaald voor de benodigde parameters a, b en c.

Inhoud

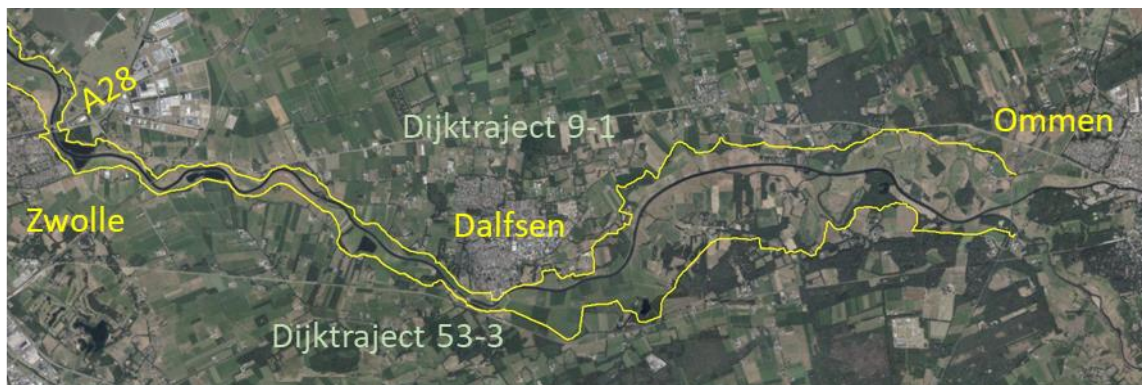
	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	Dit rapport	7
1.3	Uitvoerenden van het onderzoek	8
1.4	Doel	8
2	Kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet	10
2.1	Inleiding	10
2.2	Aanpak	10
2.3	Aannames en uitgangspunten	11
2.4	Resultaten	13
2.5	Samenvatting en discussie	15
3	Kalibratie rekenwaarden standtijdlijn voor erosie in de golfklapzone	16
3.1	Inleiding	16
3.2	Kalibratie van een semi-probabilistisch veiligheidsformat	16
3.3	Probabilistische analyses gras in de golfklapzone	18
3.3.1	Selectie van locaties	18
3.3.2	Analyses basiscases	19
3.3.2.1	Aanpak en invoer	19
3.3.2.2	Resultaten	20
3.3.3	Vergelijking met gras op klei	21
3.3.4	Invloed van het stormverloop	21
3.4	Bepaling rekenwaarden	22
3.4.1	Semi-probabilistische analyse met verschillende mogelijke veiligheidsformats	22
3.4.2	Keuze van het veiligheidsformat	23
3.5	Conclusies en aanbevelingen	24
4	Conclusies	26
	Referenties	27
A	Versnellingsfactor frontsnelheid	28
A.1	Inleiding	28
A.2	Vechtdijk	28
A.3	Ijsseldijk	29
A.4	Samenvatting	30
B	Invloed keuze D_c deterministisch vs stochastisch	31
C	Expliciet in rekening brengen (fiets)pad op de kruin	32

D	Berekende en gegenereerde frontsnelheden bij golfoverslag	34
E	Correlaties grootschalige proefresultaten met bedekking en wortellengte	39
F	Herbepaling parameters standtijdlijn	48
F.1	Inleiding	48
F.2	Resulterende standtijdlijn	48
F.3	Analyse bij $H_{m0}=0.65\text{m}$	49
F.4	Analyse bij $t=12$ uur	50
F.5	Discussie	51
G	Verzameling U_c	52
H	Lengte-effect factoren	55
	56	

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Uit de veiligheidsbeoordeling van Dijktraject 9-1 ten noorden van de Overijsselse Vecht en Dijktraject 53-3 ten zuiden van de Overijsselse Vecht (Figuur 1-1) is gebleken dat de dijken niet voldoen aan de norm voor de overstromingskans. Daarom zijn deze dijken opgenomen in het Hoogwater Beschermingsprogramma (HWBP) om te worden versterkt. Een belangrijke reden voor het niet voldoen aan de norm is de grasbekleding die direct op zand wortelt. Hiervoor zijn in het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017 geen modellen beschikbaar. De kennis ontbreekt momenteel om de faalkans van een grasbekleding op zand te bepalen. Dit geeft een grote onzekerheid in de scope van de dijkversterking.



Figuur 1-1 Overzichtkaart Vecht en dijktrajecten 9-1 en 53-3

Voorafgaand aan de scope bepaling van de dijkversterking is in de periode tot en met december 2021 onderzoek gedaan naar de erosiebestendigheid van gras op zand. De resultaten van het onderzoek moeten leiden tot een betrouwbare onderbouwing van de versterkingsopgave van de Vechtdijken. Het projectgebied ligt tussen de kruising met de A28 in het westen tot het einde van de dijktrajecten bij Ommen in het oosten.

Het onderzoek bestond grofweg uit drie fasen: 1) een voorstudie, waarin de stand van zaken met betrekking tot de kennis van gras op zand wordt beschreven en de dijk wordt gekarakteriseerd door vegetatie, bodem en wortelonderzoek. Hierbij zijn ook eerder op de IJsseldijk uitgevoerde grootschalige erosieproeven betrokken. De voorstudie is gevolgd door 2) grootschalige erosieproeven met de golfklapgenerator en de golfoverslagsimulator in het winterseizoen 2020-2021 op de Overijsselse Vechtdijk. Ten slotte 3) worden de resultaten van de proeven en de karakterisering van de dijk gebruikt om rekenwaarden van de erosieparameters af te leiden die kunnen worden gebruikt om de scope van de dijkversterking goed onderbouwd te bepalen.

1.2 Dit rapport

Dit rapport betreft een onderdeel van fase 3: het afleiden van rekenwaarden van erosieparameters. Deze rekenwaarden kunnen worden gebruikt voor de beoordeling van dijken met een bekleding van gras op zand.

Er wordt enkel gekeken naar de beoordeling van bestaande gras op zand dijken en niet naar het ontwerp hiervan. Aan het ontwerp van dijken met een gras-op-zandbekleding zitten onzekerheden die in het kader van dit project niet worden behandeld. Door onvolledige kennis over de ontwikkeling van grasbekledingen op een substraat van zand en de verwachting dat ontwikkeling hiervan mogelijk tientallen jaren zal duren wordt het gebruik van grasbekledingen op een substraat van zand in het ontwerp afgeraden.

De interpretatie van de resultaten van de grootschalige erosieproeven is eerder gerapporteerd in het analyserapport [2] en bevatten onder andere de met modellen berekende erosieparameters en een voorstel voor de beschrijving van kansverdelingen van deze erosieparameters. Na definitieve oplevering van het analyserapport heeft naar aanleiding van aanvullend reviewcommentaar een heroverweging van de beschrijving van de proefdata en de hieruit volgende kansverdelingen van erosieparameters plaatsgevonden. Deze aanpassingen ten opzichte van [2] staan in bijlagen F en G. De aangepaste kansverdelingen vormen de basis voor dit rapport.

De analyse van correlaties tussen de vegetatieparameters bedekking en wortellengte is eveneens beschreven in [2]. Hieruit bleken geen duidelijke correlaties. Naar aanleiding van aanvullend reviewcommentaar is in het kader van deze rapportage in meer detail naar correlaties gekeken (Bijlage E).

1.3 Uitvoerenden van het onderzoek

Het onderzoek naar gras op zand wordt uitgevoerd door de projectgroep met vertegenwoordiging vanuit de volgende partijen:

- Deltares (hoofdaannemer).
- Waterschap Drents Overijsselse Delta (Opdrachtgever).
- Infram Hydren.
- Radboud Universiteit Nijmegen.
- Van der Meer Consulting B.V..
- Wageningen Environmental Research (WnR).
- EurECO ecologisch onderzoek & advies.
- Universiteit Twente.
- Lumbricus B.V..

Elk van de partijen vervult hierin een rol, zoals beschreven in [1]. Onderhavig rapport is opgesteld door Deltares.

1.4 Doel

Het doel van het onderzoek, waar dit rapport deel van uitmaakt, is om erosiebestendigheidsparementers te bepalen voor grasbekledingen op zand, waarmee de scope van de dijkversterking van de Vechtdijk kan worden onderbouwd. De hoofdvragen waarop met dit onderzoek beoogd wordt antwoord te geven zijn:

- Is het standtijdlijnmodel voor golfklappen voor graserosie buitentalud (GEBU) toepasbaar voor situaties met gras op zand, en zo ja, wat zijn dan de rekenwaarden voor de parameters a, b en c in de standtijdlijn in de methode voor golfklappen op gras op zanddijken?
- Wat is, voor golfoverslag, de kansverdeling van variabele U_c (kritische frontsnelheid) voor grasbekledingen op kruin en binnentalud (GEKB) op zanddijken?

Deze hoofdvragen zijn (in iets gewijzigde vorm) overgenomen uit het Plan van Aanpak behorende bij dit onderzoek [1].

Het doel van dit rapport is het afleiden van rekenwaarde voor erosieparameters in de golfklapzone voor gras op zand bekledingen, op basis van de kansverdelingen hiervan zoals gerapporteerd in [2]. Daarnaast worden op basis van kansverdelingen van de kritische frontsnelheid U_c (m/s) kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet afgeleid die kunnen worden gebruikt in Riskeer voor een probabilistische beoordeling van erosie van de grasbekleding op de kruin en het binnentalud.

Uiteindelijk moet het volledige onderzoek worden samengevat en verwoord in een eindadvies “Product 10 Eindadvies” (P10), dat zal worden opgeleverd aan het Waterschap Drents Overijsselse Delta om daarmee de scopebepalende berekeningen uit te voeren voor de Vechtdijken. Daarnaast wordt regelmatig afgestemd met het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI), zodat de resultaten van het onderzoek kunnen worden opgenomen in het BOI 2023 voor toepassing op het hele areaal van gras op zanddijken.

2 Kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet

2.1 Inleiding

Voor faalkansberekeningen met Riskeer voor het mechanisme “gras erosie kruin en binnentalud” (GEKB) wordt gebruikt gemaakt van kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet. Deze kansverdeling representeert de sterkte van de grasbekleding.

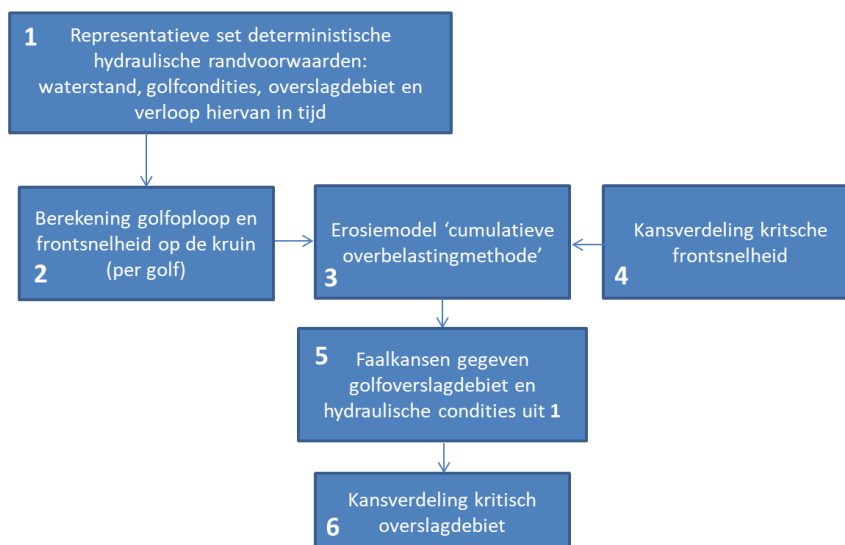
In Riskeer is de faalkans voor GEKB een combinatie van de kans op overschrijding van het kritisch golfoverslagdebiet gecombineerd met de kans op overloop. Bij overschrijding van het kritisch golfoverslagdebiet wordt uitgegaan van falen van het gras en daarmee een doorbraak van de toplaag. De sterkte van onderlagen wordt derhalve niet meegenomen.

De kansverdeling van het kritisch golfoverslagdebiet q_c (l/s per 'm) wordt bepaald met behulp van de cumulatieve overbelastingmethode, waarbij de kritische stroomsnelheid U_c (m/s) en de kritische waarde van de overslagbelasting D_c (m^2/s^2) als stochast worden beschouwd, zie [4] en [5].

Het is tegenwoordig ook mogelijk om bijvoorbeeld in het kader van een ‘beoordeling op maat’ direct faalkansberekeningen te maken met de cumulatieve overbelastingmethode. In dat geval kan direct gebruik worden gemaakt van de kansverdeling van U_c . Voor D_c wordt in dat geval een vaste waarde van $7000 m^2/s^2$ aangehouden. Een voordeel hiervan is dat de methode nauwkeuriger is. Voor het afleiden van de kansverdeling van q_c worden namelijk een aantal aannames en vereenvoudigingen gedaan (paragraaf 2.3). Opgemerkt wordt dat er ook bij direct toepassen van de cumulatieve overbelasting onzekerheden resteren, bijvoorbeeld in de berekening van de optredende frontsnelheden.

2.2 Aanpak

De afleiding van kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet is eerder uitgevoerd in het kader van het Ontwerp Instrumentarium 2014 versie 4 (OI2014v4) [4] en later in het kader van een studie naar de invloed van overgangen en objecten op het mechanisme GEKB [5]. Hier wordt dezelfde aanpak gehanteerd, zoals schematisch weergegeven in *Figuur 2-1*.



Figuur 2-1 Schematische weergave keten van berekeningen leidend tot de kansverdeling van het kritisch overslagdebiet

De kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet worden afgeleid, gegeven een bepaalde set aan hydraulische condities en een verloop hiervan in tijd (stap 1). Deze condities leiden tot golfoploop op het buitentalud, waarbij golfoverslag optreedt bij de golven met een hogere oploophoogte dan de kruinhoogte van de dijk. De frontsnelheid ter plaatse van de buitenkruinlijn (stap 2) wordt gebruikt in het erosiemodel: cumulatieve overbelastingmethode (stap 3). In het model wordt U_c als stochast beschouwd, waarvan de kansverdeling is overgenomen uit [2] (stap 4). Ook voor de overbelasting D wordt een kansverdeling aangehouden. Dit wordt gedaan om rekening te houden met onzekerheden in de overstap van de cumulatieve overbelastingmethode naar het werken met kansverdelingen van een kritisch golfoverslagdebiet. Voor verschillende discrete waarden van het golfoverslagdebiet wordt de kans berekend dat de onzekere kritische waarde van D wordt overschreden (stap 5). Door deze combinaties van golfoverslagdebieten en corresponderende kansen wordt vervolgens een log-normale verdeling gefit (stap 6). Deze log-normale kansverdeling kan vervolgens in Riskeer worden toegepast.

2.3 Aannames en uitgangspunten

De mate van erosie van de grasbekleding wordt berekend met de cumulatieve overbelastingmethode. De belasting wordt gekarakteriseerd door de frontsnelheid van de over de dijk stromende golf U (m/s) en de sterkte of erosiebestendigheid wordt gekarakteriseerd de kritische frontsnelheid U_c (m/s). Golven waarbij de frontsnelheid in het kwadraat de kritische frontsnelheid in het kwadraat overschrijdt laten het schadegetal D (m^2/s^2) toenemen. Bij het bereiken van de kritische waarde van D wordt bezwijken van de grasbekleding voorspeld. De formule inclusief invloedsfactoren is als volgt:

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

Waarin:

D (m^2/s^2)	schadegetal.
N (-)	aantal overslaande golven.
U_i (m/s)	frontsnelheid per overslaande golf op de kruin van de dijk.
U_c (m/s)	kritische snelheid (erosiebestendigheidsparemeter van de toplaag).
α_M (-)	invloedsfactor op de belasting als gevolg van een object of overgang in de grasbekleding.
α_s (-)	invloedsfactor op de sterkte als gevolg van een object of overgang in de grasbekleding.
α_a (-)	correctiefactor voor de versnelling van de frontsnelheid op een talud.

Op basis van waarnemingen bij grootschalige proeven zijn de volgende schadebeelden gekoppeld aan D :

$D=1000$ m^2/s^2	begin schade (of eerste schade).
$D=4000$ m^2/s^2	meerdere kale plekken.
$D=7000$ m^2/s^2	doorbraak toplaag, bezwijken grasbekleding.

Bij de berekeningen met het erosiemodel zijn de volgende aannames en uitgangspunten gehanteerd:

- D_c heeft een normale verdeling met een gemiddelde van 7000 m^2/s^2 en een variatiecoëfficiënt van $0,1$ (zie [4]). Hiermee wordt de aanpak zoals eerder voor OI2014 versie 4 gevolgd. Echter, opgemerkt wordt dat dit niet of nauwelijks invloed heeft op de kansverdeling van q_c ten opzichte van toepassing van een deterministische waarde van 7000 m^2/s^2 (zie bijlage B).

- U_c heeft een normale verdeling met een gemiddelde van 5,5 m/s en een variatiecoëfficiënt van 0,19 (zie [2] en in aanvulling hierop Bijlage G). In aanvulling op [2] is in bijlage E gekeken naar de eventuele correlatie tussen het aandeel grassen en kruiden in de vegetatie en de erosiebestendigheid. Dit heeft niet geleid tot differentiatie tussen vegetaties. In aanvulling op [2] is eveneens gekeken naar mogelijk conservatisme voortkomend uit het hanteren van enkele minimaal aangetoonde U_c als werkelijke waarde van U_c voor proeflocaties waar geen schade en geen falen optrad. In deze gevallen kon enkel worden aangetoond wat de U_c minimaal moet zijn geweest om de waarneming te verklaren, echter de U_c zal in werkelijkheid hoger zijn geweest. Deze minimaal aangetoonde U_c zijn in de verzameling opgenomen als werkelijke U_c . Indien voor deze U_c een 10 of 20% hogere waarde wordt aangehouden, wat ligt in het realistische bereik van de U_c , dan leidt dit tot een hoger gemiddelde van de hele verzameling, maar ook een grotere spreiding. Doordat niet alleen het gemiddelde toeneemt maar ook de spreiding leidt het ophogen van de U_c binnen het realistische bereik van 10 à 20% niet tot significant andere kansverdelingen van q_c (zie Bijlage G voor de uitwerking hiervan).
- Er is rekening gehouden met invloedsfactoren voor overgangen en objecten. Voor de invloedsfactoren voor overgangen en objecten in de grasbekleding (α_M en α_S) is respectievelijk 1,1 en 1,0 aangehouden voor de altijd aanwezige overgang van het talud naar het achterland. De invloed van een eventueel op de kruin aanwezig fietspad is niet maatgevend ten opzichte van het talud (zie Bijlage C). De oorzaak hiervan is de lagere belasting op de kruin die er toe leidt dat de ongunstige invloed van deze overgang geen aanleiding geeft tot grotere overstromingskansen. Er is geen rekening gehouden met overgangen en objecten op het talud, anders dan de altijd aanwezig geometrische overgang van het talud naar het achterland.
- Voor de versnellingsfactor, α_a , wordt 1,4 aangehouden (zie [4] en bijlage A). Deze factor wordt gebruikt om de versnelling van het golfont op het talud te berekenen ten opzichte van de frontsnelheid op de kruin.
- Voor de duur van de golfoverslag is uitgegaan van een constant overslagdebiet van 5 uur. Aangenomen wordt dat dit een vergelijkbare belasting geeft als een stormopbouw met een piek van 2 uur inclusief de flanken (zie [4]).
- Tijdens de 5 uur durende stormconditie wordt het discrete aantal golven dat aankomt bij de dijk en over de kruin slaat beschouwd om de frontsnelheid op de kruin te berekenen. Voor de gesimuleerde en nagerekende condities gaat het om circa 500 tot 5000 golven met een oploophoogte hoger dan de kruin. Hierbij worden de volgende rekenstappen uitgevoerd:
 - Het aantal golven in het tijdsinterval $N = \text{tijdsinterval} / \text{gemiddelde golfperiode}$.
 - Er worden N waarden geselecteerd uit de kansverdeling van de golfhogte. Het gaat om de golfhogtes met onderschrijdingskansen gelijk aan $1-i/(N+1)$, $i=1..N$.
 - De grootste runup krijgt een onderschrijdingskans $P_{Ru,1}$ toegewezen gelijk aan
$$P_{Ru,1} = 1 - \frac{1}{N+1}$$
, de i^{de} runup krijgt een onderschrijdingskans toegewezen gelijk aan
$$P_{Ru,i} = 1 - \frac{i}{N+1}$$
.
 - Het oploophoogte Ru_i van de i^{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 [7].
 - De stroomsnelheid op de kruin in de i^{de} golf wordt berekend met de formule:
$$U_i = c_{u2\%} \left[g (R_{u,i} - h_k) \right]^{0.5}$$
, waarin voor coëfficiënt $c_{u2\%}$ 1,45 (-) wordt aangehouden, g de zwaartekracht-versnelling (m/s^2) en h_k de kruinhoogte [6]. De kruinhoogtes worden berekend op basis van waarden van het golfoverslagdebiet en golfcondities.

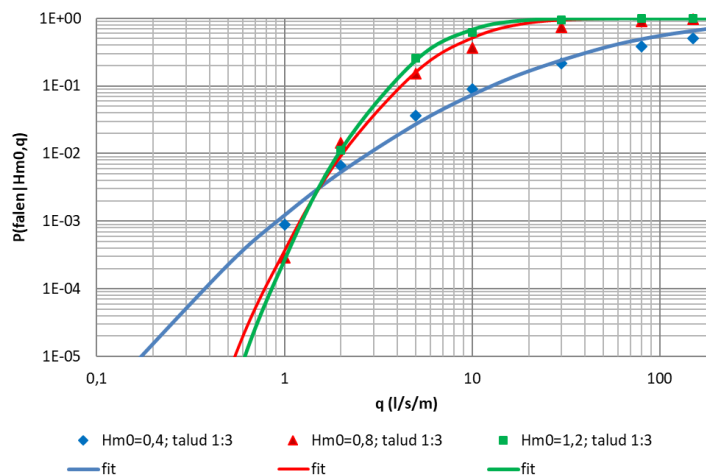
Voor de relatie tussen kruinhoogte en golfoverslagdebiet en voor de berekening van het 2% golfploopniveau is gebruik gemaakt van [7]. Daarbij is uitgegaan van:

- Golfsteilheid $s_{op} = 0,05$ (-) (steilheid berekend met de diepwater golf lengte en de piekperiode T_p). In [4] werd uitgegaan van 0,04 (-) met name bedoeld voor zeedijkten met hoge golven, echter voor rivierdijkten worden vaak wat steilere golven berekend.
- Buitentalud 1:3 (in paragraaf 2.4 is tevens 1:4 toegepast).
- Ruwheid buitentalud 1,0.
- Voor de gemiddelde golfperiode T_m (s) wordt uitgegaan van $T_p/1,265$.

De aanpak van de berekening is verder gelijk aan die eerder is gebruikt in het kader van het Ontwerpinstrumentarium 2014 versie 4. Voor een nadere beschrijving wordt dan ook verwezen naar [4].

2.4 Resultaten

Op basis van de aannames en uitgangspunten in paragraaf 2.3 zijn voor kritische golfoverslagdebieten van 1, 2, 5, 10, 30, 80 en 150 l/s per 'm en voor golfhoogtes H_{m0} van 0,4; 0,8 en 1,2 m de kansen berekend dat de kritische waarde van D wordt overschreden. Door de berekende discrete kansen zijn lognormale verdelingen gefit die kunnen worden gebruikt in Riskeer om faalkansen van de grasbekleding op de kruin en het binnentalud te berekenen. Het resultaat staat in Figuur 2-1, de parameters van de verdelingen staan in Tabel 2-1



Figuur 2-1 Berekende voorwaardelijke overschrijdingskansen van q_c (l/s per 'm) met fits van lognormale verdelingen voor drie H_{m0} (m)

Tabel 2-1 Parameters lognormale verdelingen q_c (l/s per 'm) gras op zand

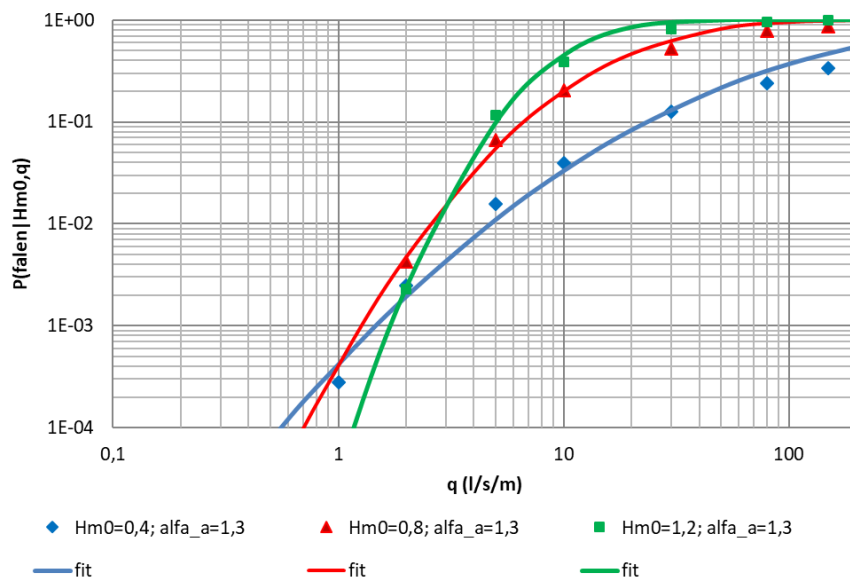
H_{m0} (m)	μ (l/s per 'm)	σ (l/s per 'm)
0,4	236	636
0,8	12	9
1,2	9	6

De berekende faalkansen bij golfhoogten van 0,8 en 1,2 m zijn vrij hoog, meer dan circa 10% bij een golfoverslagdebiet van 5 l/s per 'm. Dit strookt niet met het beeld van de golfoverslagproeven, waar bij een gesimuleerde golfhoogte van 1,0 m geen enkele keer falen optrad bij een overslagdebiet van 50 l/s per 'm, en veelal ook niet bij hogere belastingen [2]. Bij een golfoverslagdebiet van 50 l/s per 'm is de berekende faalkans zelfs dicht bij 1 (-). Bij een golfhoogte van 0,4 m wordt een faalkans van meer dan 10% berekend, gegeven een golfoverslagdebiet van 10 l/s per 'm, terwijl er bij de proeven geen enkele keer falen is

opgetreden bij een debiet van 190 l/s per 'm. Dit verschil tussen de uitkomsten van de proeven en de berekende faalkansen kan worden verklaard door verschillen tussen de berekende frontsnelheden en de gegenereerde frontsnelheden door de simulatoren (zie Bijlage D).

Voor de meeste dijken met een gras op zandbekleding is het resultaat in Figuur 2-1 en Tabel 2-1 bruikbaar. Voor dijken met een flauwer binnentalud (flauwer dan 1:4,5) of een flauwer buitentalud (flauwer dan 1:4) zijn onderstaand ook kansverdelingen opgesteld die iets gunstiger zijn.

De versnellingsfactor van 1,4, geldt voor taluds met een helling van 1:2,3 tot 1:4,5 [4]. Ook de beproefde hellingen op de Vechtdijk vallen in deze categorie en de versnellingsfactor van 1,4 wordt ondersteund door de gemeten versnelling (Bijlage A). Voor dijken met flauwere hellingen kan worden uitgegaan van een versnellingsfactor van 1,3 in plaats van 1,4. Dit leidt tot het resultaat in Figuur 2-2 en Tabel 2-2.

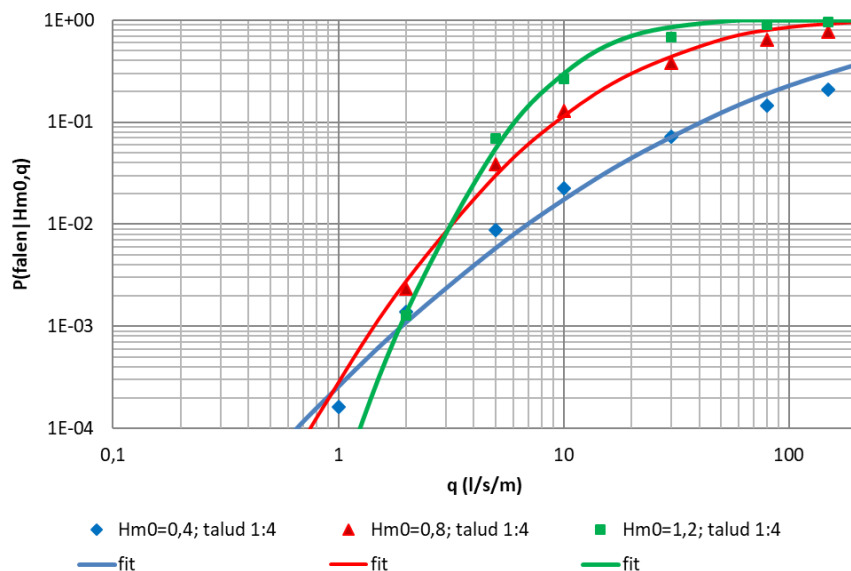


Figuur 2-2 Berekende voorwaardelijke overschrijdingskansen van q_c (l/s per m) met fits van lognormale verdelingen voor drie H_{m0} (m) bij een versnellingsfactor van 1,3 (-)

Tabel 2-2 Parameters lognormale verdelingen q_c (l/s per 'm) gras op zand; versnellingsfactor 1,3

H_{m0} (m)	μ (l/s per 'm)	σ (l/s per 'm)
0,4	540	1655
0,8	33	38
1,2	13	8

De kansverdeling van het kritisch golfoverslagdebiet is ook bepaald voor een buitentaludhelling van 1:4. De overige parameters zijn gelijk gehouden aan die in paragraaf 2.3. Het resultaat staat in Figuur 2-3.



Figuur 2-3 Berekende voorwaardelijke overschrijdingskansen van q_c (l/s per m) met fits van lognormale verdelingen voor drie H_{m0} (m), buitentaludhelling 1:4

Tabel 2-3 Parameters lognormale verdelingen q_c (l/s per 'm) gras op zand, buitentaludhelling 1:4

H_{m0} (m)	μ (l/s per 'm)	σ (l/s per 'm)
0,4	1460	5900
0,8	58	79
1,2	17	13

2.5 Samenvatting en discussie

Op basis van de gevonden kansverdeling voor U_c in [2] en de aanpak voor de afleiding van kansverdelingen voor het kritisch golfoverslag zoals beschreven in [4] en [5] zijn voor gras op zand kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet bepaald, die kunnen worden toegepast in Riskeer voor het berekenen van de faalkans van de grasbekleding op de kruin en het binnentalud door erosie.

Dijken behorende tot de primaire waterkeringen met een grasbekleding op een substraat van zand komen alleen voor langs rivieren, waar naar verwachting de golfhoogte bij een hoge waterstand beperkt zal zijn. Daarom is de studie vooral gericht op de golfhoogtes H_{m0} van 0,4, 0,8 en 1,2 m. Net als gebruikelijk voor gras op klei zal op basis van een inschatting gekozen moeten worden voor een golfhoogteklasse, waarna met Riskeer kan worden gekeken of dit de juiste keuze was en deze eventueel kan worden aangepast.

De kansverdelingen zijn afhankelijk van alle aannames en uitgangspunten zoals aangegeven in paragraaf 2.3. Getracht is om met deze uitgangspunten en aannames een doorsnee rivierdijk met een gras op zandbekleding te benaderen. Specifieke gevallen zullen echter altijd enigszins afwijken van het standaard geval, waardoor ook de kansverdeling iets anders zou moeten zijn. Dit is een logisch gevolg van de stap tussen de cumulatieve overbelastingmethode naar een (discreet aantal) kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet. Voor een flauwer binnen- of buitentalud kan gebruik worden gemaakt van in paragraaf 2.4 gegeven varianten.

3 Kalibratie rekenwaarden standtijdlijn voor erosie in de golfklapzone

3.1 Inleiding

Op basis van de proeven met de golfklapsimulator langs de Overijsselse Vecht, en eerdere proeven op gras-op-zanddijken zijn kansverdelingen voor de standtijdlijn voor erosie in de golfklapzone bepaald (waarden voor a , b en c , zie [2]). Doel van dit hoofdstuk is om een veiligheidsformat bestaande uit representatieve waarden en veiligheidsfactoren af te leiden waarmee erosie in de golfklapzone semi-probabilistisch kan worden beoordeeld.

De sterkte van gras in de golfklapzone wordt beoordeeld doormiddel van het standtijdlijnenmodel. Met het standtijdlijnenmodel kan de duur van de golfbelasting worden gerelateerd aan falen van de bekleding. Dat gaat via de volgende formule:

$$t = \frac{1}{b} \ln \frac{H_{m0} - c}{a}.$$

Hierbij is H_{m0} de significante golfhoogte op een bepaald punt op het talud en t de tijd dat deze golfhoogte gekeerd kan worden. a , b en c zijn parameters voor de sterkte, afhankelijk van het type grasbekleding (zand/klei, gesloten/open zode). In het analyserapport [2] zijn (de verdelingen van) deze parameters beschreven voor gras op zanddijken. Na het definitief worden van het analyserapport zijn de kansverdelingen van de parameters heroverwogen en iets aangepast (zie Bijlage F).

Uitgangspunt van de analyse is het bestaande veiligheidsformat voor gras op kleidijken (zie [9] en [12]). Bij de beoordeling van gras op klei wordt een representatieve 5%-waarde voor parameter a gehanteerd, en beoordeeld op basis van waterstand-golfcombinaties bij doorsnede-eis. Lengte-effect factoren (N) bedragen 1, 2 of 3, gelijk aan beoordeling bij erosie binnentalud (GEKB). In Bijlage H zijn de lengte-effect factoren tegen het licht gehouden. Daaruit volgt dat bij de beoordeling van GEBU de lengte-effect factoren van GEKB+1 moeten worden gehanteerd, dwz: $N_{\text{GEBU}} = N_{\text{GEKB}} + 1$.

Primair beschouwen we voor het bepalen van het veiligheidsformat 2 zaken:

- De overschrijdingskans van de te hanteren randvoorwaarden.
- Het percentiel van de representatieve waarde van a .

De combinatie van deze 2 zaken moet tot een voldoende veilige, maar niet te veilige beoordeling leiden.

In paragraaf 3.2 lichten we de basisprincipes en relatie tussen een semi-probabilistische en probabilistische veiligheidsanalyse toe. Paragraaf 3.3 beschrijft probabilistische analyses met Hydra-Ring, in paragraaf 3.4 wordt dit vertaald naar een veiligheidsformat voor gras-op-zand, paragraaf 3.5 geeft een korte samenvatting en conclusies van de analyse.

3.2 Kalibratie van een semi-probabilistisch veiligheidsformat

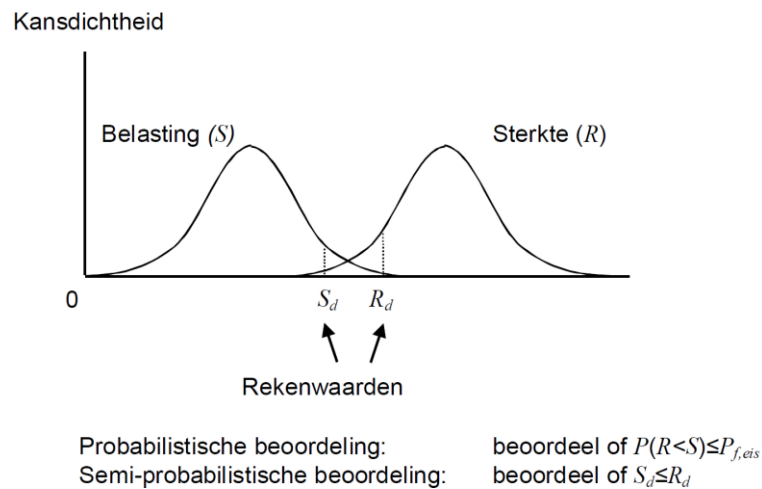
Het doel van dit hoofdstuk is om te bepalen hoe semi-probabilistisch kan worden beoordeeld of gras in de golfklapzone voldoet. Doel is daarbij representatieve waarden te bepalen zodanig dat op basis van 1 semi-probabilistische berekening met representatieve waarden met voldoende zekerheid kan worden gesteld dat de faalkans van de beschouwde kering voldoende klein is. Dergelijke studies zijn eerder uitgevoerd voor andere faalmechanismen

(in het kader van WBI-2017). We beschrijven hier kort de belangrijkste principes, voor een uitgebreidere beschrijving wordt verwezen naar [9].

Een generieke grenstoestandsfunctie voor falen is $Z=R-S$, met $Z<0$ is falen, R de sterkte en S de belasting op de constructie. De faalkans is dan de kans $P(Z<0)$. Het ontwerp punt is de combinatie van waarden voor R en S met de hoogste kansdichtheid, waarvoor geldt dat $Z=0$. Als de constructie faalt, is het meest waarschijnlijk dat het onder die omstandigheden gebeurt. De grenstoestandsfunctie kan worden gelineariseerd in het ontwerp punt volgens de volgende formule:

$$Z_{lin} = \beta + \sum_{i=1}^n \alpha_i u_i ,$$

met β de betrouwbaarheidsindex ($P(Z < 0) = \Phi(-\beta)$), α_i is de invloedscoefficiënt van stochast i , en u_i is de waarde van i in het ontwerp punt in de standaardnormale ruimte. Er geldt dat $\sum \alpha_i^2 = 1$. De waarde u_i in het ontwerp punt is dan gegeven door $u_i = -\alpha_i \cdot \beta$.



Figuur 3-1 Relatie tussen semi-probabilistische en probabilistische analyses voor een grenstoestandsfunctie $Z=R-S$

In een semi-probabilistische beoordeling wordt gebruik gemaakt van rekenwaarden S_d en R_d zoals weergegeven in Figuur 3-1. Deze waarden worden afgeleid op basis van probabilistische berekeningen, zodanig dat deze 'garanderen' dat aan de betrouwbaarheidseis P_T wordt voldaan zolang $S_d < R_d$. Garanderen is daarmee in de kalibratiestudies in het kader van WBI-2017 geïnterpreteerd als dat de gemiddelde faalkans voldoende klein is (gemiddeld over alle situaties waarbij $S_d < R_d$). De representatieve waarden R_d en S_d (voor normaal verdeelde stochasten) zijn:

$$R_d = \mu_R - \alpha_R \beta_T \sigma_R = R_{rep} / \gamma_R$$

$$S_d = \mu_S - \alpha_S \beta_T \sigma_S = S_{rep} \cdot \gamma_S$$

met μ en σ de parameters van de normale verdeling, β_T de doelbetrouwbaarheid en R_{rep} en S_{rep} de representatieve waarden van R en S (bijv. een 5%-waarde). γ_R en γ_S zijn partiële veiligheidsfactoren voor R en S .

Dergelijke waarden zijn ook afgeleid voor gras op klei in de golfklapzone. Daarbij is gekozen voor een format met een representatieve 5%-waarde voor sterkteparameter a , en een representatieve belasting met overschrijdingskans gelijk aan de doorsnede-eis P_T . Alle partiële veiligheidsfactoren zijn 1. Het streven is om dit format aan te houden, maar de kwantilen van de parameters opnieuw te bepalen.

Een semi-probabilistische beoordeling op vakniveau gaat uit van de faalkanseis op vakniveau/doorsnedeniveau P_T . Dat betekent dat ook rekening moet worden gehouden met het lengte-effect bij het afleiden van de faalkanseis uit de norm. We gaan in eerste instantie uit van dezelfde lengte-effect factoren als bij gras op klei. Het advies is wel om dit nader te onderzoeken middels onder meer een gevoeligheidsanalyse (zie paragraaf 3.5).

Samengevat heeft een semi-probabilistische beoordeling dus de volgende ingrediënten:

1. Een faalmechanismemodel.
2. Kansverdelingen voor de stochastische parameters.
3. Een betrouwbaarheidseis op doorsnedeniveau.
4. Een (probabilistische) analyse die onderbouwt welke representatieve waarden een voldoende veilige beoordeling geven.

3.3 Probabilistische analyses gras in de golfklapzone

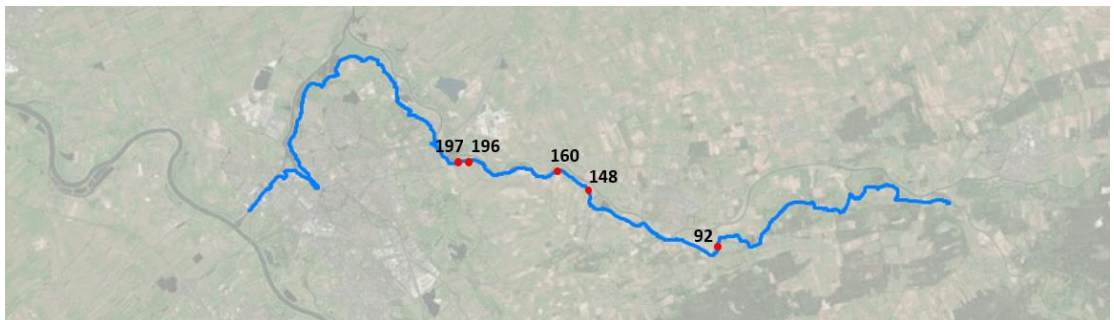
3.3.1 Selectie van locaties

Om de kalibratie uit te voeren zijn negen locaties langs de Vecht tussen Berkum en Dalfsen beschouwd. Vier op de noordoever (dijktraject 9-1, Figuur 3-1) en vijf locaties op de zuidoever (dijktraject 53-3, Figuur 3-2). De locaties zijn verspreid over het gebied, en hebben verschillende dijkoriëntaties.

De ondergrenzen van de overstromingskansen van beide trajecten zijn 1/300 (9-1) en 1/3000 (53-3) per jaar. Uitgaande van een faalkansruimte van 5% voor GEBU, en lengte-effect factor $N=1$ betekent dit dat de doorsnede-eisen zodanig zijn dat het traject zeker aan de ondergrens voldoet (categorie III_v in WBI-2017). Deze eisen bedragen 1/6000 ($\beta=3,59$) respectievelijk 1/60000 ($\beta=4,15$) per jaar. Zie voor achtergrond [1].



Figuur 3-1 Locaties van cases op de noordoever, dijktraject 9-1



Figuur 3-2 Locaties van cases op de zuidoever, dijktraject 53-3

3.3.2 Analyses basiscases

3.3.2.1 Aanpak en invoer

De probabilistische berekeningen voor golfklap zijn gemaakt met Hydra-Ring en de 'plug-in' zoals beschreven in [11]. Deze is ontwikkeld voor het IJsselmeer, maar de aanpak is ook toepasbaar voor de Vechtdelta. Voor het stormverloop is gekozen voor een constante waterstand en golfhoogte met een duur van 12 uur conform de aanpak bij rivieren (zie [12]). Dit is van toepassing voor de Vecht, omdat hier de waterstanden grotendeels bepaald worden door de afvoer bij Dalfsen (eventueel in combinatie met een verhoogd meerpeil). Daardoor zijn de maatgevende randvoorwaarden combinaties van een hoge, maar niet extreme, waterstand en harde wind resulterend in relatief grote golven.

In [2] zijn parameters van de standtijdlijn bepaald. In het kader van dit rapport zijn die nogmaals tegen het licht gehouden. Dat leidt tot iets andere parameters voor de standtijdlijn dan eerder bepaald. De overwegingen daarbij zijn te vinden in Bijlage F.

Probabilistische berekeningen zijn gedaan met Directional Sampling (DS) omdat door discontinuïteiten de FORM-methode niet convergeerde. De uitgangspunten van de berekeningen zijn in Tabel 3-1 terug te vinden voor alle cases en in Tabel 3-2 staan specifieke waarden per case. Opgemerkt moet worden dat gebruik is gemaakt van een grenstoestandsfunctie waarbij GEBU en overloop (waterstand boven de kruin) zijn gecombineerd. Dat laatste heeft geen invloed op de resultaten. Daarnaast neemt de gebruikte 'plug-in' ook de invloed van de hoek van golfaanval mee door voorafgaand aan de berekening de golfhoogte te corrigeren.

Hydra-Ring maakt berekeningen voor alle windrichtingen, daarbij is windrichtingssector 1 gelijk aan noord, en gaat de nummering met de klok mee omhoog. Vervolgens worden deze berekeningen gecombineerd en opgeschaald in de tijd. Het resultaat is een gecombineerde betrouwbaarheidsindex (per jaar) en ontwerppuntwaarden. Hoewel na opschalen en combineren over windrichtingen deze ontwerppuntwaarden niet meer vertaalbaar zijn naar fysische parameters geven deze wel de meest complete indicatie van het belang van de verschillende onzekerheden. Daarom gaan we bij de analyse primair uit van de invloedscoefficienten na opschalen en combineren over windrichtingen.

Tabel 3-1 Parameters voor alle cases

	Beschrijving	Verdeling	Waarden
$\tan \alpha$ (-)	taludhelling	Deterministisch	1/3,5
Δt (sec)	Tijdstap in de berekening	Deterministisch	900
Δz (m)	Stapgrootte taluddelen	Deterministisch	0,1
a (m)	standtijdlijn parameter a	Lognormaal	$\mu = 0,538; \sigma = 0,056$
b (1/uur)	standtijdlijn parameter b	Deterministisch	-0,06
c (m)	standtijdlijn parameter c	Deterministisch	0,25

Tabel 3-2 Dijknormaal, kruin- en teenhoogte per case

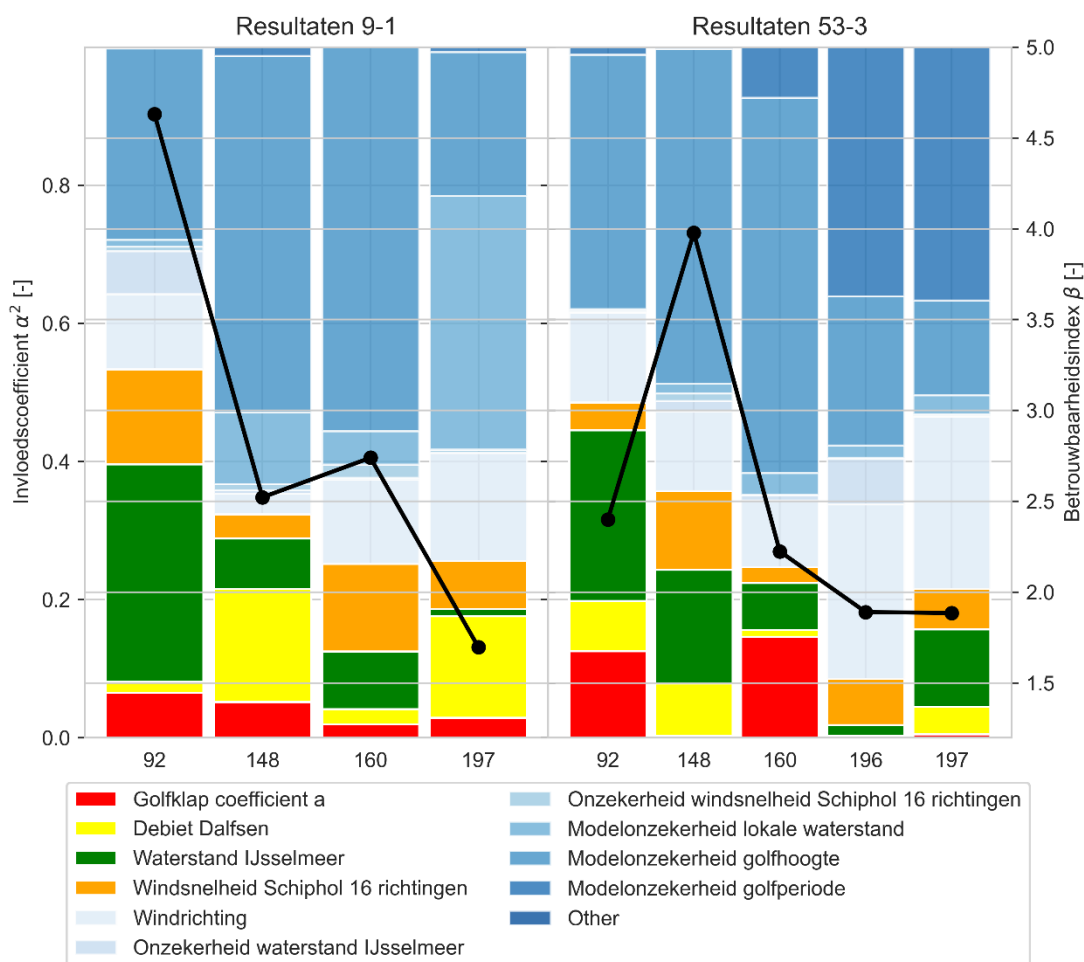
Case	Dijknormaal (graden)	Kruin hoogte (m NAP)	Teen hoogte (m NAP)
9-1 92	85	5,00 (+2)*	3,60
9-1 148	220	4,65	1,70
9-1 160	195	4,30	1,00
9-1 197	206	3,70	0,75
53-3 92	280	5,20 (+2)*	2,50
53-3 148	45	4,60 (+2)*	1,70

53-3 160	330	4,25	1,10
53-3 196	345	3,70	0,70
53-3 197	345	3,70	0,60

*Bij deze vakken is in de berekening de kruinhoogte met 2 meter verhoogd omdat falen door overloop dominant werd.

3.3.2.2 Resultaten

In Figuur 3-1 zijn de resultaten voor beide dijktrajecten weergegeven. De zwarte lijn geeft de betrouwbaarheidsindex β per case aan. Wat direct opvalt is dat de β in veel gevallen ver onder de eis is (eis: $\beta=3.59$ voor 9-1 en $\beta=4.15$ voor 53-3): dit benadrukt de relatief lage weerstand van gras op zand in de golfklapzone. Van de beschouwde dijkvakken heeft er slechts één een faalkans kleiner dan de signaleringswaarde van het betreffende traject (9-1 92). De overige berekende cases, behalve 53-3 148, hebben allemaal een faalkans $>1/200$ jaar.



Figuur 3-1 Resultaten uit Hydra-Ring voor verschillende locaties langs de Vecht. Links: resultaten voor traject 9-1, rechts, resultaten voor traject 53-3. Gekleurde balken geven gekwadrateerde invloedscoëfficiënten (α^2) voor de verschillende onzekerheden. Zwarte lijnen tonen de bijbehorende betrouwbaarheidsindex β .

Zoals in paragraaf 3.2 is aangegeven hangt de keuze van een representatieve waarde niet alleen af van de invloedscoëfficiënt, maar ook van de betrouwbaarheidsindex. De waarde van stochast i in de standaard normale ruimte wordt immers gegeven door $u_i = -\alpha_i \cdot \beta$.

Wanneer β lager is leidt dit tot een lagere u_i bij dezelfde α , concreet betekent dit dat er een minder strenge rekenwaarde kan worden gehanteerd (zie ook hoofdstuk 3.2). De α -waarden

van parameter a in Figuur 3-1 zijn voor de twee cases (9-1 92 en 53-3 148) met wat hogere β vrij klein, maar voor de cases met lagere β soms wat groter. Dit impliceert dus niet dat voor verschillende cases een andere representatieve waarde van a moet worden gekozen.

3.3.3 Vergelijking met gras op klei

Uit de uitgevoerde berekeningen komen in de meeste gevallen zeer lage betrouwbaarheidsindices β . De vraag is wat hier de oorzaak van is. Daarom is voor drie locaties een extra faalkansberekening uitgevoerd met de standtijdlijnen voor gras op klei. Bij gras op klei gelden de volgende parameters voor de standtijdlijn:

- Bij gesloten zode: $a = \text{Lognormaal}(1,82, 0,62)$, $b = -0,035$ en $c = 0,25$.
- Bij open zode: $a = \text{Lognormaal}(1,4, 0,5)$, $b = -0,07$ en $c = 0,25$.

Tabel 3-1 geeft resulterende betrouwbaarheidsindex β en invloedscoefficiënt α_a^2 , ter referentie zijn ook de resultaten voor gras-op-zand toegevoegd. De betrouwbaarheid van gras op klei is aanmerkelijk hoger (overigens voor de beschouwde cases nog steeds niet in alle gevallen voldoende). Er is geen duidelijke relatie tussen zodeklasse en invloedscoefficiënt, in de meeste gevallen is de invloed van de onzekerheid in parameter a beperkt, enkel in de 2 cases op 53-3 met gesloten zode is deze wat groter. Dit zijn ook cases met een wat hogere betrouwbaarheid. Een mogelijke verklaring is dat een belasting waarbij de bekleding faalt voor gras op klei extreem zeldzaam is. In algemene zin kan gesteld worden dat de lagere betrouwbaarheid van gras-op-zand door de als geheel lagere sterkte wordt veroorzaakt, niet zozeer doordat de sterkte onzekerder is.

Tabel 3-1 Vergelijking tussen gras op klei en gras op zand.

Case	Zode	β	Invloedscoefficiënt α_a^2
53-3 160	Gras op klei, Gesloten	4,20	0,335
	Gras op klei, Open	3,00	0,012
	Gras op zand	2,20	0,146
53-3 92	Gras op klei, Gesloten	4,27	0,434
	Gras op klei, Open	3,26	0,086
	Gras op zand	2,42	0,115
9-1 148	Gras op klei, Gesloten	3,19	$5,2 \cdot 10^{-5}$
	Gras op klei, Open	2,86	0,042
	Gras op zand	2,52	0,052

3.3.4 Invloed van het stormverloop

De Vechtdelta is qua randvoorwaarden een typisch overgangsgedebied: meer benedenstrooms wordt de invloed van de waterstanden op het IJsselmeer, en opwaaiing vanuit het Zwarte Water groter. In de eerder besproken berekeningen is uitgegaan van een stormverloop conform de schematisering voor de Bovenrivieren: een constante waterstand, met een stormduur van 12 uur. Wanneer meerpeil en opwaaiing vanuit het Zwarte Water een belangrijke rol speelt kan het stormopzetverloop wat meer in lijn zijn met bijvoorbeeld de waterstandsverlopen op het IJsselmeer. Op dergelijke locaties geldt vermoedelijk ook dat de hoogste golven hoger op het talud inslaan door de correlatie tussen waterstand en golven. Om een indicatie te krijgen van de invloed van het stormverloop is voor twee locaties een berekening uitgevoerd met een constante waterstand en trapeziumvormige golfhoogte met een basisduur van 48 uur en een piekduur van 4 uur. Advies is wel om voor de benedenstroomse delen van de Vecht voor de beoordeling goed de beschouwen welk waterstandsverloop het meest passend is. Vermoedelijk geldt dit vooral voor locaties op dijktraject 53-3 ten westen van de A28. Tabel 3-1 geeft de resultaten voor twee cases. Te zien is dat een trapeziumvormig verloop tot hogere betrouwbaarheidsindices leidt. Vermoedelijk omdat de piekduur korter is (4 uur in plaats van 12 uur), en de relatief lage

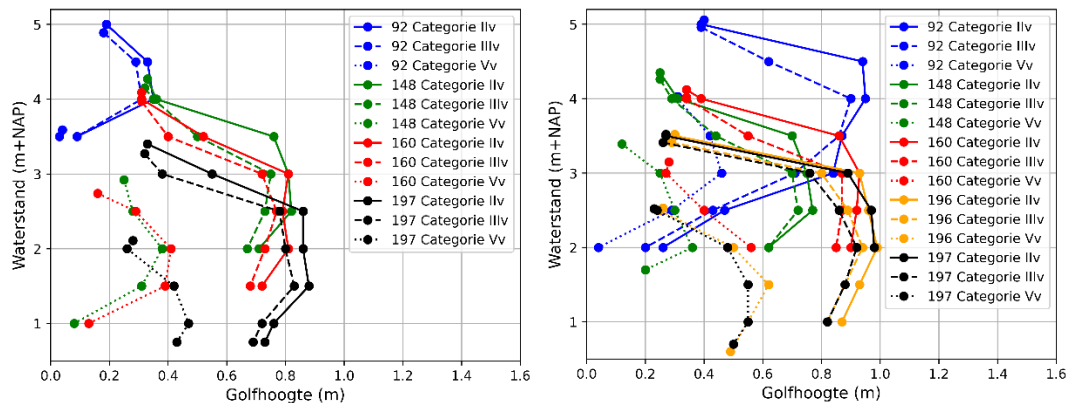
belasting op de flanken van het trapezium weinig schade aanricht. Dit wijst erop dat de aanname van het stormverloop invloed heeft op het beoordelingsresultaat. Tegelijkertijd zijn in deze cases de resulterende betrouwbaarheidsindices in beide gevallen (zwaar) onvoldoende. De onzekerheidsbijdrage van de sterkte is kleiner, wat betekent dat de onzekerheid van de sterkte bij een dergelijk stormverloop niet belangrijker wordt.

Tabel 3-1 Vergelijking voor verschillende stormverlopen

Case	Stormverloop	β	Invloedscoëfficiënt α_a^2
53-3 160	Constant (12 uur)	2,22	0,103
	Trapezium (48 uur basis, 4 uur piek)	2,41	0,038
9-1 197	Constant (12 uur)	1,70	0,029
	Trapezium (48 uur basis, 4 uur piek)	2,21	0,00014

3.4 Bepaling rekenwaarden

3.4.1 Semi-probabilistische analyse met verschillende mogelijke veiligheidsformats



Figuur 3-1 Randvoorwaarden bepaald met Riskeer voor dijktraject 9-1 (links) en 53-3 (rechts)

Voor een semi-probabilistische analyse moeten als eerste golf randvoorwaarden worden bepaald met behulp van Riskeer. Resultaten daarvan voor de verschillende locaties zijn weergegeven in Figuur 3-1. De afname van de golfhoogte bij toenemende waterstanden suggereert dat golven en waterstand (grotendeels) ongecorrleerd zijn. In een semi-probabilistische beoordeling kan vervolgens met de verschillende randvoorwaarden per categorie bepaald worden in welke categorie het beschouwde dijkvak valt. De relevante categorieën zijn voor beide trajecten weergegeven in Tabel 3-1.

Tabel 3-1 Maximale faalkansen per categorie op vakniveau voor beide trajecten

Categorie	Maximale faalkansen op vakniveau	
	53-3	9-1
Iv	1/6.000.000	1/600.000
IIv	1/200.000	1/20.000
IIIv	1/60.000	1/6.000
IVv	1/3.000	1/300
Vv	1/100	1/10

Een semi-probabilistisch veiligheidsformat moet ervoor zorgen dat de verschillende cases in de juiste categorie worden ingedeeld. Een overzicht van de resulterende klasse als functie van de waarde van a is gegeven in Tabel 3-2. Daarbij is uitgegaan van randvoorwaarden met

overschrijdingskans gelijk aan de eis op vakniveau, en verschillende representatieve waarden van parameter a . Te zien is dat de keuze voor een representatieve waarde weinig verschil maakt op de klasse-indeling: de golfhoogte zoals bepaald met Riskeer heeft veel meer invloed op het resultaat. De representatieve waarde van a heeft bij de gehanteerde stormduur van 12 uur weinig invloed op de toelaatbare golfhoogte.

Tabel 3-2 Vergelijking categorieën semi-probabilistisch veiligheidsformat en resultaten uit Hydra-Ring. Rood geeft aan dat het veiligheidsformat tot een te gunstige categorie leidt, groen dat het tot de juiste categorie leidt en oranje geeft aan dat de semi-probabilistische beoordeling tot een te ongunstig oordeel leidt

Locatie	Semi-probabilistisch met verschillende overschrijdingskansen voor de representatieve waarden van a						Hydra-Ring		
	5%	10%	20%	30%	40%	50%	Categorie	Faalkans	
9-1	92	IIv	IIv	IIv	IIv	IV	IV	IIv	1,82E-06
	148	Vv	Vv	Vv	Vv	Vv	Vv	Vv	5,83E-03
	160	Vv	Vv	Vv	Vv	Vv	Vv	IVv	3,07E-03
	197	Vv	Vv	Vv	Vv	Vv	Vv	Vv	4,48E-02
53-3	92	Vv	Vv	Vv	Vv	Vv	Vv	Vv	8,19E-03
	148	Vv	Vv	Vv	Vv	Vv	Vv	IVv	1,82E-06
	160	>Vv	>Vv	>Vv	>Vv	>Vv	>Vv	>Vv	1,30E-02
	196	>Vv	>Vv	>Vv	>Vv	>Vv	>Vv	>Vv	2,93E-02
	197	>Vv	>Vv	>Vv	>Vv	>Vv	>Vv	>Vv	2,97E-02
Toelaatbare golfhoogte [m]	0,469	0,478	0,488	0,496	0,504	0,510	-	-	

Er zijn 3 cases waarin de beschouwde veiligheidsformats in sommige gevallen leiden tot een te streng of te soepel oordeel (geel of rood in Tabel 3-2).

In Tabel 3-3 zijn de golfhoogtes horend bij de categorieën voor die cases weergegeven. Er is één te soepel beoordeelde case: 9-1 92 wordt bij relatief hoge kwantilen voor a ingedeeld in categorie IV. Het gaat om een heel klein verschil in golfhoogte (ongeveer 1 centimeter). De cases 53-3 148 en 9-1 160 zijn te streng beoordeeld: voor 53-3 148 gaat het wederom om een niet te groot verschil (ca. 3 centimeter), en voor 9-1 160 geeft Riskeer een relatief hoge golfhoogte voor categorie IVv.

Tabel 3-3 Golfhoogtes bij cases met in sommige gevallen een te streng of te soepel oordeel

Case	Categorie Hydra-Ring	Golfhoogte Riskeer [m]			
		IV	IIv	IVv	Vv
9-1 92	IIv	0,5	0,35	-	-
9-1 160	IVv	-	-	0,61	0,41
53-3 148	IVv	-	-	0,54	0,36

3.4.2 Keuze van het veiligheidsformat

Op basis van de analyse in voorgaande paragraaf wordt geadviseerd om gras-op-zand op dezelfde wijze te beoordelen als gras-op-klei, maar kan hierbij gekozen worden voor een gemiddelde waarde voor parameter a . Doordat falen sterk belasting gedomineerd is leidt dit

in alle beschouwde cases op 1 na (9-1 92) tot een voldoende veilige beoordeling, en in 2 geval tot een te strenge beoordeling (9-1 160 en 53-3 148). In de te soepel beoordeelde geval gaat het om een verschil in toelaatbare golfhoogte van ongeveer 1 centimeter.

Voor de beoordeling is het relevanter om zeer nauwkeurig te kijken naar de combinatie van randvoorwaarden en stormverloop. In de analyses is gekeken naar een stormverloop met constante waterstand en golven van 12 uur¹. Er zijn enkele sommen gemaakt met een trapeziumvormig stormverloop: dit geeft geen hogere invloedscoefficiënt voor de sterkte, het valt dus te verwachten dat het voorgestelde veiligheidsformat ook voor dergelijke locaties kan worden gebruikt.

Uitgangspunt is voornamelijk dat de lengte-effectfactoren voor gras-op-zand gelijk kunnen worden gehouden aan die voor gras-op-klei: de gevonden invloedscoefficiënten geven geen aanleiding om hiervan af te wijken: de meest invloedrijke stochasten (belastingparameters) hebben allemaal lange fluctuatielengtes. Enkel delen van de onzekerheid in de standtijdlijn zouden op kortere schalen kunnen variëren (bijv. kwaliteit van de grasmatten), maar de verwachting is dat dit door de geringe invloedscoefficiënten weinig effect zal hebben op het in rekening te brengen lengte-effect. Er wordt wel aanbevolen door een extra gevoeligheidsanalyse dit nader te onderzoeken.

Samenvattend kan gras-op-zand voor faalmechanisme GEBU – golfklap op dezelfde wijze worden beoordeeld als gras op klei met 1 wijziging: voor parameter a in de standtijdlijn kan gebruik gemaakt worden van de mediaan uit de kansverdeling (50%-waarde). De parameters voor de standtijdlijn zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 3-1 Parameters voor standtijdlijn bij semi-probabilistisch beoordelen GEBU-golfklap voor gras-op-zand

a (m)	0,538
b (1/uur)	-0,06
c (m)	0,25

Tot slot dient te worden opgemerkt dat de standtijdlijn niet is bepaald op basis van een landelijke proevenverzameling. Daarom dient bij toepassing in andere gebieden altijd geverifieerd te worden of de bekleding karakteristieken heeft die passen bij de proeven gehanteerd bij de bepaling van de standtijdlijn.

3.5 Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk is op basis van probabilistische analyses voor een aantal locaties langs de Vecht een semi-probabilistisch veiligheidsformat afgeleid voor het beoordelen van gras op zanddijken voor het mechanisme GEBU – golfklap. Op basis van deze analyse kan semi-probabilistisch worden beoordeeld met de volgende parameters:

a (m)	0,538
b (1/uur)	-0,06
c (m)	0,25

In algemene zin heeft de keuze voor de parameters van de standtijdlijn weinig invloed op het beoordelingsresultaat. Belangrijker zijn stormverloop en belastingduur: het advies is om bij het beoordelen extra aandacht te besteden aan het realistisch schematiseren van de belasting. Denk daarbij aan het meenemen van voorlanden, schuin invallende golven en goede onderbouw van de keuze voor een bepaald stormverloop. Wanneer een ander stormverloop wordt gehanteerd dan de hier beschouwde 'constante storm' van 12 uur, wordt

¹ Ter illustratie: wanneer uitgegaan wordt van een blokvormig stormverloop met een duur van 6 uur wordt de toelaatbare golfhoogte bij een 50%-waarde van a 0.60 meter (toename van 13 centimeter).

wel aanbevolen om het veiligheidsformat te verifiëren met enkele probabilistische berekeningen. Hanteren van een ander stormverloop kan tot gevolg hebben dat de bijdrage van onzekerheden wijzigt waardoor het format niet meer voldoende veiligheid garandeert.

Uit de probabilistische analyses blijkt dat in algemene zin de faalkansen erg groot zijn. Opgemerkt moet worden dat het (conform dit rapport) een relatief eenvoudige ontwikkeling is om GEBU – golfklap probabilistisch te beschouwen in samenhang met GEKB (zie [11]). Zeker het in samenhang beschouwen van beide mechanismen kan leiden tot een scherper oordeel en doelmatigere bepaling van de veiligheidsopgave, waarbij zowel correlatie tussen beide mechanismen beter wordt meegenomen, als de faalkansruimte beter wordt benut.

In meer algemene zin worden met de hier gehanteerde beoordelingsmethode geen overstromingskansen uitgerekend maar enkel de faalkans van de toplaag van de bekleding. Uit enkele verkennende analyses in [8] bleek dat het dijklichaam, zeker doordat de grootste golven laag op het talud inslaan, veel reststerkte heeft. Daarom wordt geadviseerd te verkennen of reststerkte kan worden meegenomen. Een kanttekening hierbij is dat stroming in de Vecht het erosieproces kan versnellen, hetgeen in de eerdere analyse niet is meegenomen. Effectief is het gevolg van het meenemen van reststerkte dat de grasbekleding minder lang de golven hoeft te weerstaan, omdat ook het zandlichaam een bijdrage levert. Door het exponentiele verloop van de standtijdlijn kan dit relatief veel verschil maken.

4 Conclusies

Voor het mechanisme GEKB zijn op basis van de gevonden kansverdeling voor U_c in [2] en de aanpak voor de afleiding van kansverdelingen voor het kritisch golfoverslagdebiet zoals beschreven in [4] en [5] voor gras op zand kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet bepaald (Tabel 4-1).

Tabel 4-1 Rekenwaarden parameters lognormale kansverdeling van het kritisch golfoverslagdebiet voor gras op zandbekledingen

H_{m0} (m)	μ (l/s per 'm)	σ (l/s per 'm)
0,4	236	636
0,8	12	9
1,2	9	6

Net zo als gebruikelijk voor gras op klei zal op basis van een inschatting gekozen moeten worden voor een golfhoogteklasse, waarna met Riskeer kan worden bepaald of dit de juiste keuze was. Voor dijken met een flauw buitentalud (flauwer dan 1:4) of een flauw binnentalud (flauwer dan 1:4,5) kan gebruik worden gemaakt van in paragraaf 2.4 gegeven varianten op de kansverdelingen.

Op basis van probabilistische analyses voor een aantal locaties langs de Overijsselse Vecht is een semi-probabilistisch veiligheidsformat afgeleid voor het beoordelen van gras op zanddijken voor het mechanisme GEBU – golfklap. Op basis van deze analyse kan semi-probabilistisch worden beoordeeld met de volgende parameters (Tabel 4-2). Daarbij geldt voor de lengte-effect factoren $N_{GEBU} = N_{GEKB} + 1$ (zie Bijlage H).

Tabel 4-2 Rekenwaarden parameters voor beoordeling GEBU – golfklap voor gras op zandbekledingen

Parameter	Rekenwaarde
a (m)	0,538
b (1/uur)	-0,06
c (m)	0,25

De rekenwaarden voor zowel het mechanisme GEKB als GEBU Golfklap zijn geschikt voor dijken waarvan de gras op zand bekleding vergelijkbaar is met die op de Overijsselse Vechtdijk en de IJsseldijk waarop het onderzoek is uitgevoerd. De toepassingsvoorwaarden zullen in het eindadvies van dit project nader worden gespecificeerd.

Referenties

- [1] Plan van Aanpak Grasonderzoek, Verdere ontwikkeling van rekenregels op gras voor keringen, versie 1.0.0 definitief, d.d. 1 augustus 2019, G.J. Steendam et al., Waterschap Drents Overijsselse Delta en Infram Hydren.
- [2] Analyse golfklapproeven en golfoverslagproeven Gras op zand onderzoek product 8, Deltares projectnummer 11204369, definitief v1.0, 13 september 2021.
- [3] 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.
- [4] Onderbouwing kansverdelingen kritisch overslagdebiet ten behoeve van het OI2014v4, Deltares nummer 1230090-011, definitief versie 3, februari 2017.
- [5] BOI Omgaan met overgangen bij faalmechanisme gras erosie kruin en binnentalud, Korte studie naar kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet inclusief overgangen, Deltares nummer 11203720-025, definitief versie 1.0, november 2019.
- [6] 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.
- [7] Technisch Rapport Golfoploop en Golfoverslag bij Dijken, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Delft, mei 2002.
- [8] Relevantie-onderzoek gras op zand, Product 2, Deltares projectnummer 11204369, Definitieve versie 1.0, 12 augustus 2020.
- [9] Jongejan, R. (2017). WBI2017 Code Calibration - Reliability-based code calibration and semi-probabilistic assessment rules for the WBI2017. Retrieved from <https://publications.deltares.nl/WeL1942.pdf>.
- [10] Klerk, W. J., & Jongejan, R. B. (2016). Semi-probabilistic assessment of wave impact and runup on grass revetments (No. 1220080-005-ZWS-0003). Deltares.
- [11] Smale, A., & Klerk, W. J. (2021). Probabilistisch beoordelen en ontwerpen grasbekleding (No. 11206202-002-HYE-0001). Deltares.
- [12] van Hoven, A. (2021). Schematiseringshandleiding grasbekleding (No. v5.0). Rijkswaterstaat.
- [13] Gras op zand, voorbereiding grootschalige proeven. Locatiekeuze, proefprogramma en predictie, Deltares kenmerk 11204369-002-GEO-0012, definitief 23-3-2021
- [14] Onderzoek Gras op Zand, P7: Doorworteling en treksterkte, N. van Rooijen, C. Liebrand, M. Evers, E. Visser, N. Bisschops en H. de Kroon

A Versnellingsfactor frontsnelheid

A.1 Inleiding

De versnellingsfactor α_a (-) is de factor waarmee de frontsnelheid op de kruin van de dijk wordt vermenigvuldigd om de snelheid op het talud te berekenen. De versnelling is afhankelijk van onder andere de taludhelling, lengte over het talud dat het front aflegt en de ruwheid van het talud. In [4] wordt, sterk vereenvoudigd, uitgegaan van het volgende:

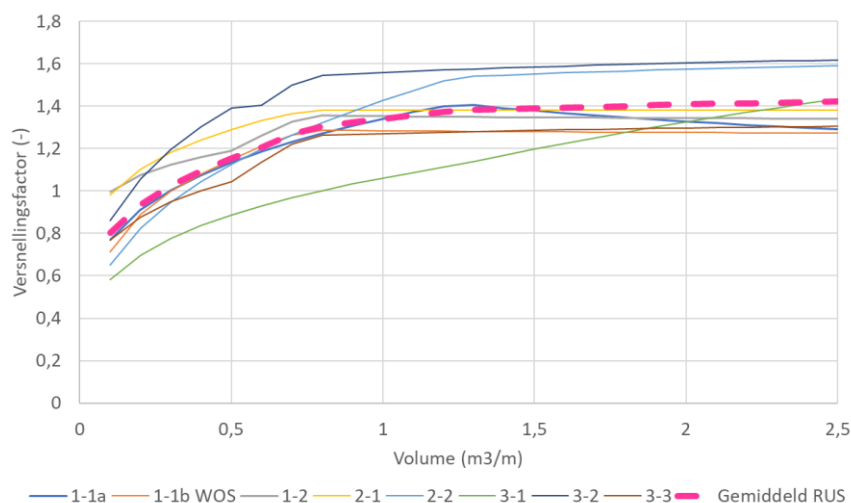
Taludhelling	
1:2,3 – 1:4,5	$\alpha_a=1,4$
flauwer dan 1:4,5	$\alpha_a=1,2$
kruin	$\alpha_a=1,0$

De meeste binnentaluds vallen in de eerste categorie met een factor van 1,4. Voor heel korte taluds is er onvoldoende tijd voor het golfvront om te versnellen, waardoor op basis hiervan een lagere waarde zou kunnen worden onderbouwd. Voor de Vechtdijk met een taludlengte van circa 15 m geldt dit echter niet. De taludhelling van de Vechtdijk is relatief flauw, waarbij opgemerkt dat het bovenste taluddeel veelal wat steiler is, maar valt in de categorie tussen 1:2,3 en 1:4,5. De standaard factor van 1,4 lijkt daarom het meest geschikt.

Ter verificatie is een korte analyse uitgevoerd op basis van de metingen van de frontsnelheden op het talud van de Vechtdijk en de IJsseldijk.

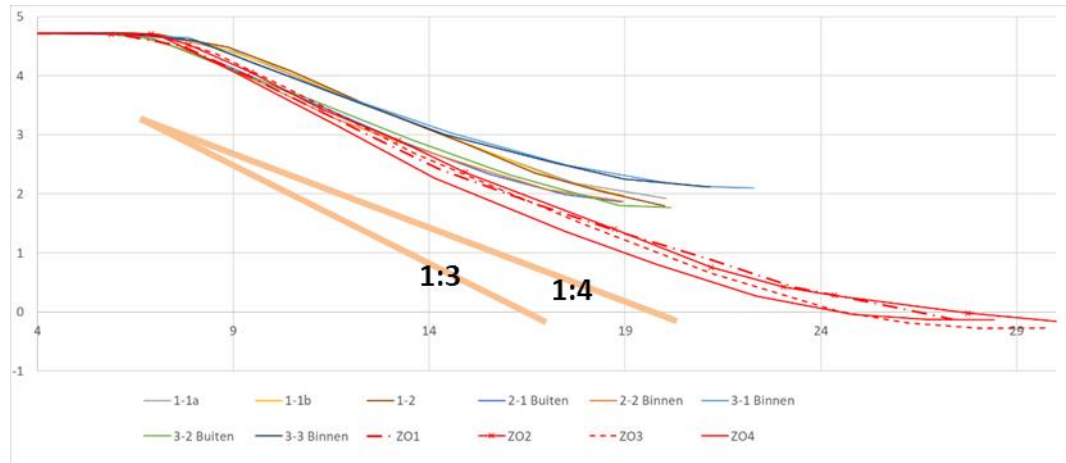
A.2 Vechtdijk

In Bijlage C van [2] wordt per talud op de Vechtdijk waar golfverslagproeven zijn uitgevoerd gekeken naar de metingen van de frontsnelheid en zijn fitformules van de frontsnelheid afgeleid. De fitfunctie geeft per plek op het talud een schatting van de relatie tussen volume (m^3/m) en frontsnelheid (m/s). Door de fit-functie voor de frontsnelheid op het talud te delen door het resultaat op de kruin wordt een schatting van de versnellingsfactor verkregen. Voor het talud zijn de fitfuncties gebruikt waar de frontsnelheden maximaal waren. Vanwege de variabiliteit in de metingen was de plek van de maximale frontsnelheid vaak niet helemaal eenduidig. Voor verschillende volumes lag dit op verschillende plekken op het talud. De berekende geschatte versnellingsfactoren uit de fit-functies zijn uitgezet in Figuur A-1.



Figuur A-1 Schatting versnellingsfactor taluds Vechtdijk tegen losgelaten volume (m^3/m)

De versnellingsfactor neemt toe met het losgelaten volume, echter vanaf een volume van circa 1 m³/m neemt de versnellingsfactor nauwelijks meer toe. Deze wat grotere volumes zijn overigens ook de volumes die er bij erosie toe doen. Gemiddeld is de versnellingsfactor ongeveer 1,4 (-), dezelfde waarde als volgt uit [4]. Er is echter sprake van een spreiding tussen 1,3 en bijna 1,6. Voor de meeste taluds volgt een waarde tussen 1,3 en 1,4, echter voor locatie 3-2 en 2-2 volgt een duidelijk hogere waarde. De gemiddelde taludhelling scheelt niet veel voor alle taluds (Figuur A-2). Talud 2-2 heeft wel een relatief steil stukje van circa 1:3, echter talud 3-2 heeft dat juist niet (steilste stukje 1:3,7) [2]. Opgemerkt wordt dat de versnellingsfactor voor het talud 1-1b dat is beproefd met de WOS (Golfoverslagsimulator) in plaats van met de golfoploosimulator (RUS – Run Up Simulator) een relatief lage versnellingsfactor geeft van iets minder dan 1,3.



Figuur A-2 Dwarsprofielen locaties Vechtdijk (diverse kleuren, kort) en IJsseldijk (ZO1, 2, 3 en 4, rood)

A.3 IJsseldijk

Op de IJsseldijk zijn enkele taluds beproefd. De dwarsprofielen staan in Figuur A-2. De taluds zijn aanmerkelijk langer en bevatten soms iets steilere taluddeelen dan de Vechtdijk. De proeven zijn uitgevoerd met de golfoverslagsimulator (WOS). Voor de analyse wordt verwezen naar het rapport: ANALYSE EN DUIDING GOLFOVERSLAGPROEVEN IJSSELDIJK, Infram kenmerk 19i814, versie 3, 27 augustus 2020. Hieronder worden de bevinden gegeven ten aanzien van de versnellingsfactor.

De frontsnelheden op de kruin, gemiddeld over verschillende metingen, en die op het talud zijn omgerekend naar een versnellingsfactor. Dit is gedaan per taluddeel en per volume. De frontsnelheden op de kruin per volume en de versnellingsfactor per taluddeel staan in

Tabel A-1 en Tabel A-2.

Tabel A-1 Frontsnelheid U_i (m/s) per volume V (m³/m) op de kruin gemeten op de IJsseldijk.

V [m ³ /m]	U_i [m/s]
0,40	4,0
0,60	4,0
0,80	4,2
1,00	4,3
1,25	4,6
1,50	4,8

Tabel A-2 Versnellingsfactor α_a (-) per taluddeel

Taluddeel	cota [-]	α_a [-]
pw2-3	3,5	1,23
pw3-4	3,0	1,20
pw4-5	3,4	1,18
pw5-6	3,8	1,25
pw6-7	4,3	0,90

Geconcludeerd wordt dat de versnellingsfactor op het talud van de IJsseldijk gemiddeld 1,22 (-) is.

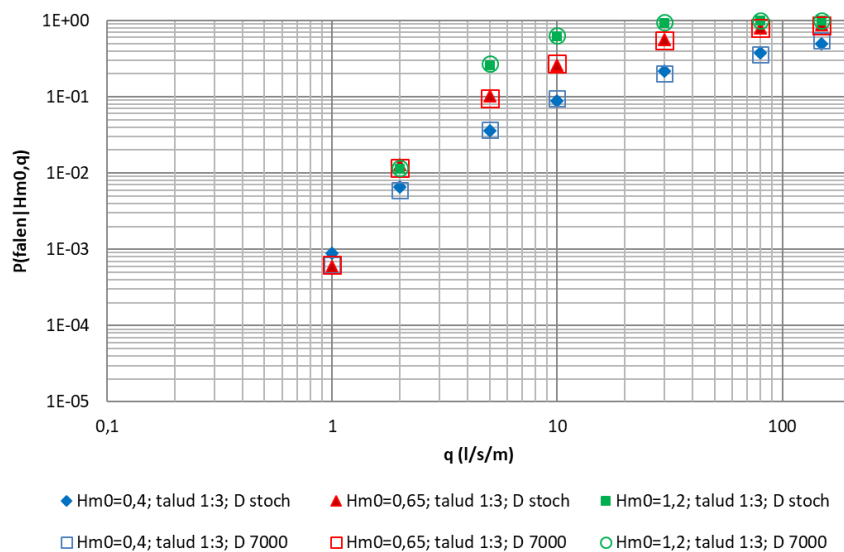
A.4 Samenvatting

De versnellingsfactor op de taluds van de Vechtdijk varieert. Het gemiddelde is 1,4 (-) wat in overeenstemming is met [4]. Afwijkend zijn versnellingsfactoren die zijn afgeleid voor de IJsseldijk. Deze zijn met een gemiddelde van 1,22 aanmerkelijk lager. Omdat deze proeven zijn uitgevoerd met de WOS in plaats van met de RUS kan dit (een deel van) de oorzaak zijn. De enige WOS proef op de Vechtdijk gaf ook een versnellingsfactor die wat lager is. Mogelijk zijn de snelheid op de kruin (iets lager voor de WOS) en de vorm van het overtrekkende volume verantwoordelijk voor het verschil. Een wat kleinere waterlaagdikte leidt bijvoorbeeld tot een hogere relatieve ruwheid, een relatief hogere weerstand en een kleinere versnelling. Dit kan gebeuren als de RUS de volumes sneller loslaat dan de WOS en daarmee een relatief kort maar dik overtrekkend volume levert die makkelijker versneld. Deze korte analyse geeft hier echter geen uitsluitsel over.

B Invloed keuze D_c deterministisch vs stochastisch

In het kader van het onderzoek naar gras op zand is bij de omrekening van de kansverdeling van de kritische frontsnelheid U_c (m/s) naar de kansverdeling van het kritisch golfoverslagdebiet q_c (l/s per 'm) de kritische waarde van de overbelasting D_c (m^2/s^2) als stochast beschouwd met een normale verdeling, een verwachtingswaarde van $7000 m^2/s^2$ en een variatiecoëfficiënt van 0,1. Hiermee wordt de aanpak in [5] gevolgd en werd beoogd om onzekerheden omtrent de modellering in de stap van de cumulatieve overbelastingmethode naar de kansverdeling van q_c te verdisconteren. Bij de bepaling van de kansverdeling van q_c worden namelijk aannames gedaan omtrent golfsteilheid, geometrie en ruwheid van het buitentalud, hoek van golfval et cetera. Getracht is om met de aannames zo dicht mogelijk een gemiddelde dijk te benaderen, echter in de praktijk zullen de omstandigheden altijd wat anders zijn. Die andere omstandigheden kunnen zowel gunstiger als ongunstiger zijn dan de aannames waarmee is gewerkt. Er is geen kwantitatieve onderbouwing van de waarde van deze variatiecoëfficiënt.

Om het effect van de variatiecoëfficiënt op de rekenwaarden voor de kansverdelingen van q_c inzichtelijk te maken zijn de kansverdelingen van q_c bepaald voor zowel een D_c als stochast als een deterministische waarde gelijk aan de verwachtingswaarde. De resultaten staan in Figuur B-1.



Figuur B-1 Voorwaardelijke faalkans gras op zand bekleding gegeven golfhoogtes H_{m0} (m) en golfoverslagdebiet q (l/s per 'm) waarbij D als stochast (volle markers) en $D = 7000 m^2/s^2$ (holle markers).

De berekende voorwaardelijke kansen dat D_c wordt overschreden blijken maar weinig te verschillen voor de gevallen waarbij D_c als stochast of als determinist wordt aangehouden. Een significant verschil treedt alleen op voor de kleinste overschrijdingskansen bij lage golfoverslagdebieten (1 l/s per m en minder). Voor de faalkans van de grasbekleding door golfoverslag zijn deze golfoverslagdebieten en faalkansen echter maar zeer beperkt van belang. De ontwerpapunten van GEKB berekeningen liggen namelijk meestal rondom de verwachtingswaarde van het kritisch golfoverslagdebiet. Geconcludeerd wordt dat de zonder onderbouwing aangehouden marge in D_c voor het afdekken van onzekerheden bij de overgang van de cumulatieve overbelastingmethode naar kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet maar zeer beperkt invloed heeft op de berekende faalkansen.

C Expliciet in rekening brengen (fiets)pad op de kruin

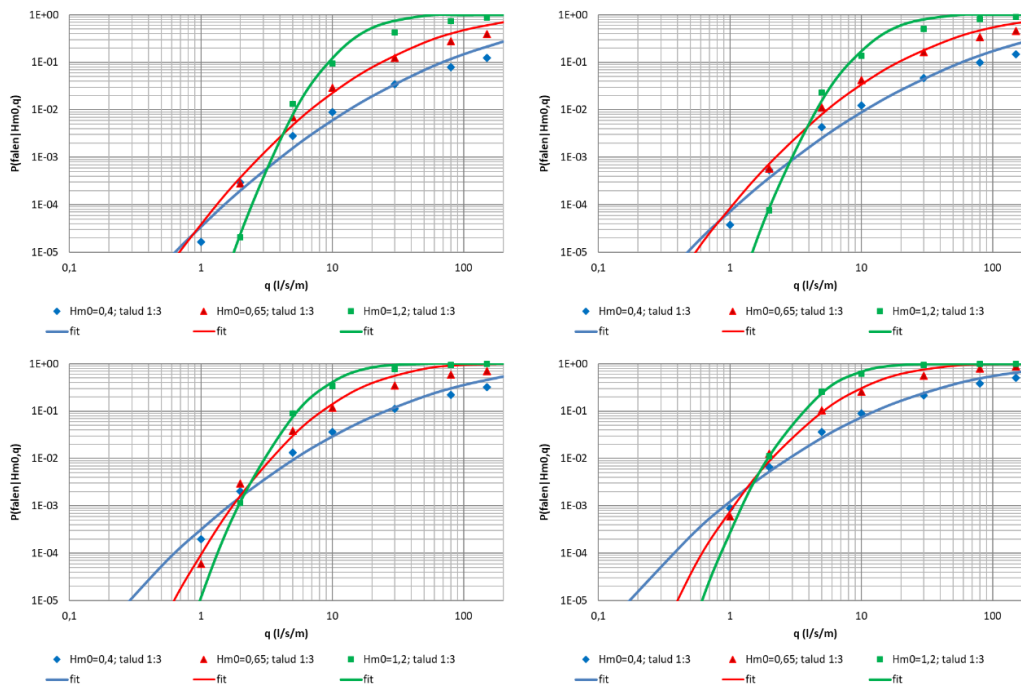
Er was bij drie locaties waarop 7 golfoverslagproeven zijn uitgevoerd sprake van een (fiets)pad. Bij locaties 53-3_103,4 buitentalud was dat een recent aangelegd asfaltpad, waarbij een kleine aanaarding in zand het hoogteverschil van 10 à 15 cm tussen het nieuwe asfalt en het maaiveld overbrugde. Deze aanaarding spoelde bij de eerste golven weg. Hier zijn drie golfoverslagproeven uitgevoerd. De andere locaties zijn beproefd in het kader van een ander project Zwolle – Olst. Hier zijn vier golfoverslagproeven uitgevoerd, drie op een westelijk georiënteerd talud, beschouwd als één locatie en één proef iets verderop op een noordelijk georiënteerd talud, ook beschouwd als één locatie.

Voor de drie proeven op de Overijsselse Vechtdijk is getracht de invloed van het fietspad expliciet in rekening te brengen. Omdat de α_M niet exact is te bepalen, zijn hiervoor waarden van 1,3; 1,4 en 1,7 (-) aangehouden als zijnde een reële waarde en een ongunstige waarde. De ondergrens is vanuit theorie 1,0 en de bovengrens vermoedelijk circa 1,7 (-). De α_S is gelijk gehouden aan 1,0. Schade ontstond namelijk niet op de overgang zelf, maar hier net iets overheen. Het argument dat het gras aan één zijde geen houvast heeft was in dit geval dus niet van toepassing. De eventuele verzwakking van het gras door de aanaarding is onbekend, maar als verwaarloosbaar verondersteld. De aanname van $\alpha_M = 1,3; 1,4$ of $1,7$ en $\alpha_S = 1,0$ voor deze specifieke situatie leidt vanwege falen bij deze overgang tot een verhoging van de teruggerekende U_c van 5,1 m/s naar 5,9; 6,1 en 6,9 m/s.

De proeven die in het kader van Zwolle Olst zijn uitgevoerd zijn apart geanalyseerd en gerapporteerd. Bij de overgang van pad naar gras is wel schade opgetreden, maar geen falen. De schade en het niet falen heeft geleid tot de conclusie dat de overgang niet dominant is bij erosie door golfoverslag. De uit deze proeven bepaalde U_c 's van de grasbekleding veranderen niet.

Door de verhoging van de U_c voor de locatie met fietspad van 5,1 naar 5,9; 6,1 en 6,9 m/s wordt de (normale) kansverdeling net iets anders. Bij een α_M van 1,3 en 1,4 gaat het om een verandering twee cijfers achter de komma, bij een α_M van 1,7 worden de verwachtingswaarde en de variatiecoëfficiënt van 5,5 en 0,19 respectievelijk 5,6 m/s en 0,20 (-).

Vervolgens is gekeken naar de kansverdeling van q_c gegeven een α_M op de kruin van 1,3; 1,4 of 1,7. Omdat het niet ondenkbeeldig is dat bij paden wel sprake is van het niet hebben van houvast van de graszode aan de overgang wordt hierbij gerekend met een α_S van 0,9 (-). De resulterende gefitte lognormale verdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet staan in Figuur C-1.



Figuur C-1 Gefitte lognormale kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet q (l/s/m) voor verschillende golfhoogtes H_{m0} (m), voor de overgang van het pad op de kruin $\alpha_M=1,3$ (linksboven), $\alpha_M=1,4$ (rechtsboven), $\alpha_M=1,7$ (linksonder) en voor het talud (rechtsonder).

De kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet liggen hoger voor het talud (ongunstiger) dan voor het fietspad op de kruin. Voor het geval waarbij $\alpha_M=1,7$ en $\alpha_S=0,9$ benadert de kansverdeling van het kritisch golfoverslag voor het pad op de kruin, die voor het talud. De oorzaak dat het fietspad op de kruin niet maatgevend wordt zit in de versnellingsfactor van 1,4 op het talud tegen 1,0 op de kruin. Deze belastingverhoging heeft een grotere invloed dan de gehanteerde invloedsparameters α_M en α_S voor het pad op de kruin.

Geconcludeerd kan worden dat het zeer onwaarschijnlijk is dat het negatieve effect van een fietspad op de kruin dominant wordt in de faalkans van de grasbekleding door golfoverslag. Er hoeft niet expliciet rekening te worden gehouden met een (fiets)pad op de kruin, omdat de kansverdeling voor het kritisch golfoverslagdebiet, die is afgeleid voor het talud, maatgevend is. Hierbij wordt er wel vanuit gegaan dat de aansluiting van de grasbekleding op het pad netjes is (het wortelnetje sluit aan op het pad en is tot aan de overgang te typeren als een 'gesloten zode') en geen al te grote hoogteverschillen kent (orde 5 cm). De aanaarding bij het fietspad op locatie 53-3_103.4 buitentalud was ook bedoeld om het hoogteverschil op te heffen, en als het in enkele seizoenen is begroeid dan zal deze overgang hier waarschijnlijk ook aan voldoen.

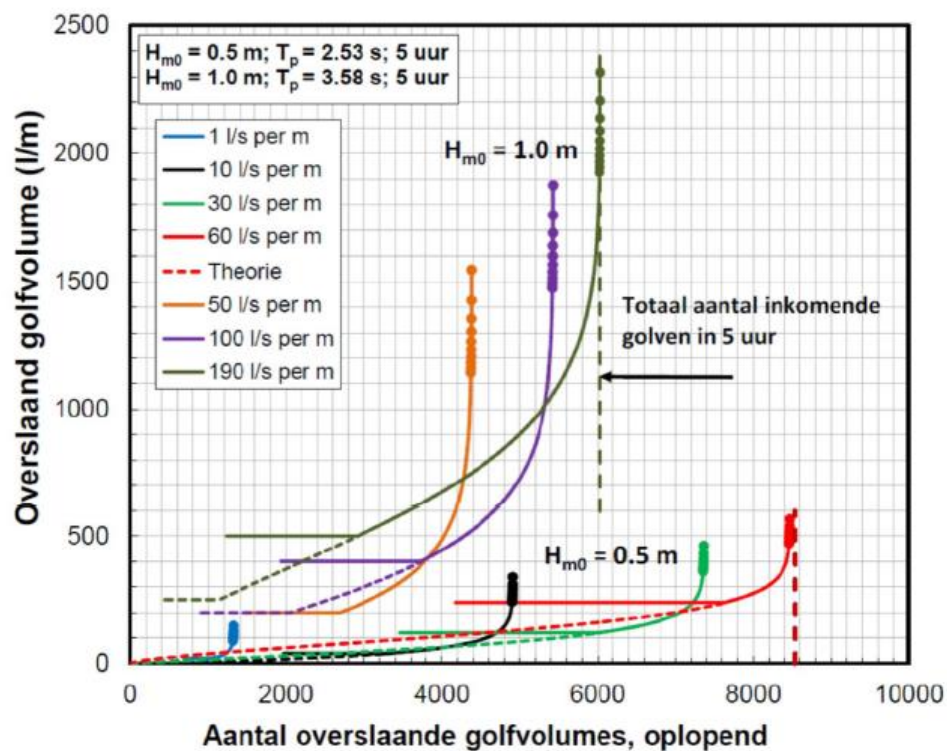
D Berekende en gegenereerde frontsnelheden bij golfoverslag

Er bestaat een discrepantie tussen de berekende faalkans van erosie van de grasbekleding bij golfoverslag en het beeld dat wordt gevormd door de grootschalige proeven. Er wordt een hoge faalkans berekend bij combinaties van golfhoogtes en golfoverslagdebiet die tijdens de proeven nergens tot falen hebben geleid. Deze discrepantie kan worden veroorzaakt door:

1. Conservatisme in de bepaalde U_c . Sommige U_c betreffen minimaal aangetoonde U_c (er is nog geen falen of schade opgetreden bij deze U_c dus de werkelijke U_c ligt hoger) in plaats van de werkelijke kritische waarde bij falen.
2. Afwijkende gegenereerde frontsnelheden dan modelmatig berekende frontsnelheden bij de omrekening van de kansverdeling van U_c naar de kansverdeling van het kritisch golfoverslagdebiet q_c .

In deze bijlage wordt gekeken naar de frontsnelheden, punt 2. De golfoverslagsimulator en de golfploopsimulator zijn gebruikt voor het simuleren van golfoverslag. De simulatoren laten een verdeling van volumes los over de dijk en genereren daarmee een verdeling van frontsnelheden. De sturing vindt plaats op basis van het gemiddelde gesimuleerde golfoverslagdebiet en een geschematiseerde benadering van de verwachte verdeling van golfoverslagvolumes. Hierbij moeten de beperkingen van de simulator in ogenschouw worden genomen. Door de open- en sluitijd van de klep is het niet mogelijk om alle kleine volumes te simuleren, daarom worden de allerkleinste volumes samengevoegd tot een minimaal te simuleren volume, zodanig dat het totale volume klopt. Getracht wordt om de grootste volumes bij benadering wel te simuleren. Uiteraard gaat het om een discretisatie van een verdeling. De kans is aanwezig dat in een werkelijke storm het grootste volume groter is dan de het grootste gesimuleerde volumen (of juist kleiner is). De toegepaste belasting voor de Vechtdijk is toegelicht in [13]. In Figuur D-1 is een samenvatting gegeven van de belasting per proefstrook. De proefstrook wordt belast met een oplopende belastingstappen. Elke stap betreft een gesimuleerde stormconditie van 5 uur, met een golfoverslagdebiet en bij een golfhoogte H_{m0} .

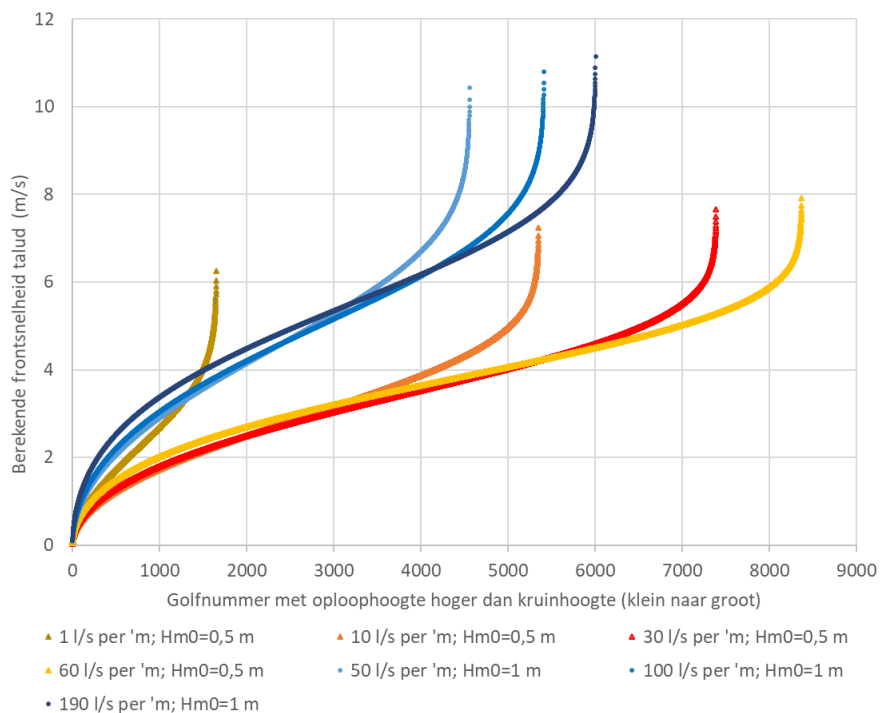
Significante golfhoogte (m)	Overslagdebiet (l/s per m)	Duur (uur)	Aantal overslagvolumes (-)	Schatting grootste volume (l/m)
0,5	1	5	1318	147
0,5	10	5	4909	339
0,5	30	5	7360	462
0,5	60	5	8471	567
1,0	50	5	4376	1546
1,0	100	5	5432	1875
1,0	190	5	6032	2360



Figuur D-1 Opgelegde belasting [13] voor de beschrijving en onderbouwing

Tijdens de proeven zijn de frontsnelheden niet continu gemeten. Er werden per proefstrook duizenden volumes losgelaten en het is vooralsnog ondoenlijk om deze allemaal te meten. Veelal is per proefstrook tijdens de proef een reeks volumes losgelaten die wel zijn gemeten, zodat voor de hele range van volumes in de verdeling een meting van de frontsnelheid over het talud beschikbaar is. Door deze metingen zijn functies gefit die de relatie benaderen tussen volume en frontsnelheid. De fit-functies en metingen zijn beschreven in [2].

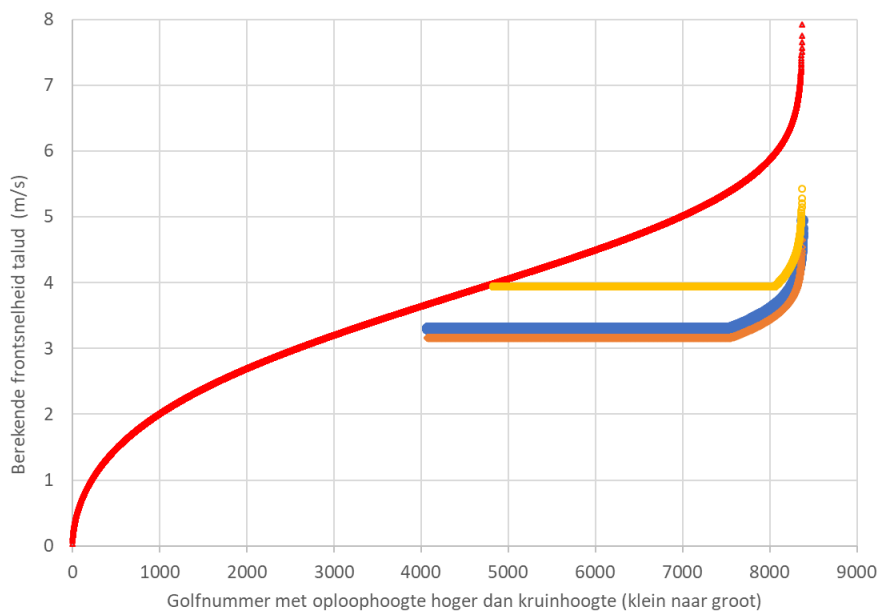
De berekening van de verdeling van frontsnelheden, afhankelijk van het golfoverslagdebiet en de golfhoogte H_{m0} is beschreven in het hoofdrapport. Ook hier is gebruik gemaakt van een discretisering van de verdeling. Per stormconditie gaat het om circa 500 tot 5000 golven met een oploophoogte boven de kruinhoogte, afhankelijk van de beschouwde stormconditie. De berekende frontsnelheden op het talud, uitgaande van een versnellingsfactor van 1,4 (-) zijn gegeven in Figuur D-2.



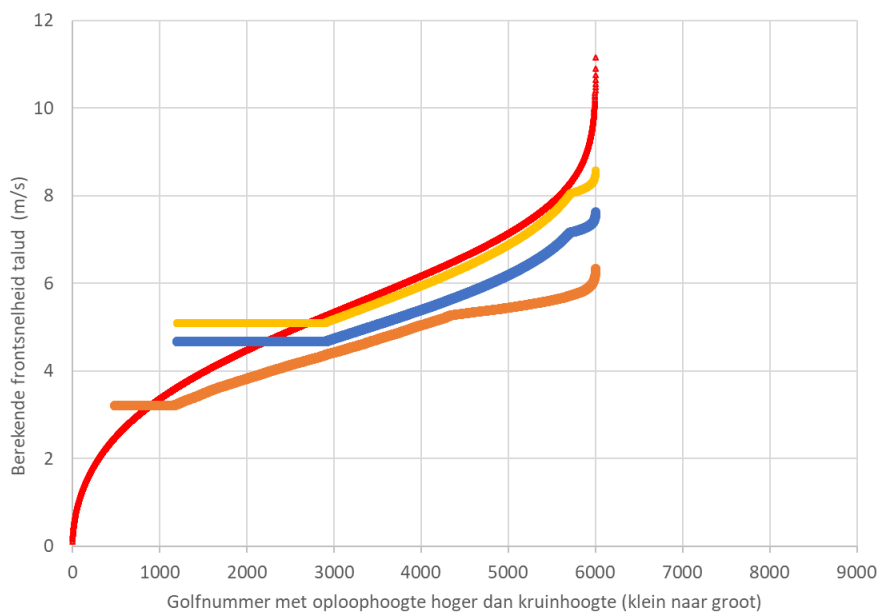
Figuur D-2 Berekenende frontsnelheden (m/s) per gesimuleerde stormconditie, geordend van kleinste overslaande golf tot de grootste, op het talud uitgaande van een versnellingsfactor van 1,4 (-).

Te zien is dat voor de oplopende golfoverslaggebieden bij $H_{m0}=0,5$ m het aantal golven flink toeneemt, echter de hoogste frontsnelheden worden niet heel veel hoger. De hoogste berekenende frontsnelheden zitten tussen 7 en 8 m/s. Bij een golfhoogte van 1,0 m nemen de maximale frontsnelheden toe tot 10 à 11 m/s voor de hoogste golven.

Voor twee stormcondities de vergelijking gemaakt tussen de berekenende frontsnelheden en de op metingen gebaseerde fitfunctie-frontsnelheden. Er is gekozen voor een golfoverslagdebiet van 60 l/s per 'm en $H_{m0}=0,5$ m en bij een debiet van 190 l/s per 'm en $H_{m0}=1,0$ m. Dit is gedaan voor de proefstroken 1-1A (53-3_103,4 buitentalud), 1-1B (53-3_103,4 buitentalud – golfoverslagsimulator in plaats van golfoploopsimulator) en 2-2 (9-1_14,0 binnentalud). Elke strook kent zijn eigen metingen en daarmee ook zijn eigen fitfuncties. Het resultaat staat in Figuur D-3.



▲ 60 l/s per 'm; $H_{m0}=0,5$ m ● 1-1A ◆ 1-1B ○ 2-2



▲ 190 l/s per 'm; $H_{m0}=1$ m ● 1-1A ● 1-1B ○ 2-2

Figuur D-3 Berekende frontnelheden bij 60 l/s per 'm en $H_{m0}=0,5$ m (boven) en 190 l/s per 'm en $H_{m0}=1,0$ m en de op metingen gebaseerde fitfunctie frontnelheden bij dezelfde condities voor stroken 1-1A, 1-1B en 2-2 [2].

De afwijking tussen de berekende en gesimuleerde frontnelheden is duidelijk zichtbaar. Voor de stormconditie bij een golfoverslagdebiet van 60 l/s per 'm en $H_{m0}=0,5$ m zijn de berekende frontnelheden over de hele lijn aanmerkelijk hoger. Voor de stormconditie bij een golfoverslagdebiet van 190 l/s per 'm en $H_{m0}=1$ m zijn de verschillen kleiner, echter er blijft een substantieel deel van de golven dat een aanzienlijk hogere berekende frontnelheid heeft dan dat bij de proeven werd gegenereerd. Eveneens is zichtbaar dat de frontnelheden uit de golfoverslagsimulator een stukje lager zijn dan die uit de golfoploosimulator, hetgeen ook in [2] al was geconstateerd. Overigens wordt opgemerkt dat de lagere frontnelheden, uitgaande van een voldoende nauwkeurig erosiemodel, niet hoeven te leiden tot een bias in

de bepaalde U_c . De gemeten frontsnelheden worden immers gebruikt bij het terugrekenen van de U_c uit de proefresultaten.

Geconcludeerd kan worden dat het verschil tussen de gegenereerde frontsnelheden (gemeten en benaderd door de fitfuncties) en de op basis van theorie berekende frontsnelheden substantieel bijdraagt aan de discrepantie tussen de berekende faalkans en hetgeen tijdens de proeven is waargenomen.

E Correlaties grootschalige proefresultaten met bedekking en wortellengte

De correlatie tussen de vegetatieparameters bedekking en wortellengte zijn eerder beschreven in [2]. Hieruit bleken geen duidelijke correlaties. In het kader van onderhavige rapportage is geopperd dat er een mogelijke correlatie is tussen erosiebestendigheid en het aandeel kruiden ten opzichte van grassen in de vegetatie in een gras op zandbekleding. Hier is in deze bijlage in iets meer detail naar gekeken.

De bedekking van dijktaluds met grassen en kruiden op de Overijsselse Vechtdijk is twee keer bepaald, één keer in het voorjaar van 2020 (mei/ juni) en één keer in het najaar van 2020 (oktober), voorafgaand aan het winterseizoen waarin de grootschalige erosieproeven zijn uitgevoerd. Een samenvatting van de resultaten staat in Tabel E-1.

Tabel E-1 Totale bedekking voorjaar en najaar 2020 en het aandeel grassen en kruiden hierin.

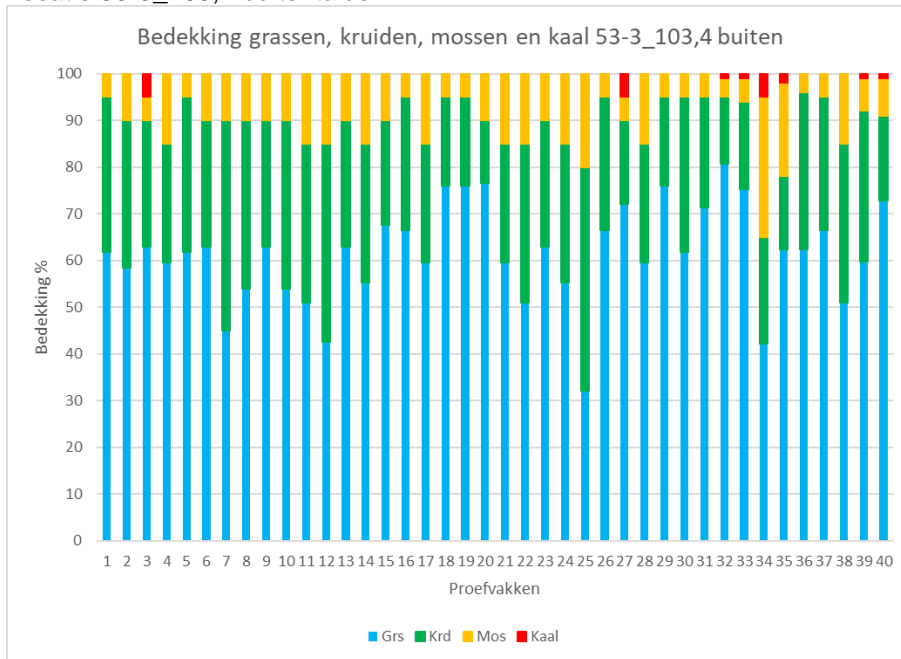
Traject Dijkpaal	Talud	Voorjaar 2020			Najaar 2020		
		Bedekking totaal %	grassen %	kruiden %	Bedekking totaal %	grassen %	kruiden %
53-3 103,4	buiten	93	85	8	89	61	28
9-1 18,2	binnen	84	82	2	90	68	22
9-1 18,2	buiten	83	61	22	91	13	78
9-1 14,0	binnen	82	79	3	73	43	30
9-1 14,0	buiten	60	30	30	80	20	60

Opvallend is dat, ten opzichte van de bepaling in het voorjaar, het aandeel kruiden in het najaar flink toeneemt. Extreem hierin in het buitentalud van locatie 9-1_18.2. In het voorjaar is de totale bedekking op het talud 83%, waarvan ca. 75% grassen en ca. 25% kruiden. In het najaar is de totale bedekking toegenomen tot 91%, echter het aandeel grassen is nog maar 14% tegen een aandeel kruiden van 86%. De toename van de bedekking door kruiden is verklaarbaar omdat de bovengrondse plantdelen van een aantal kruiden in de winter afsterft, om in de lente en zomer weer uit te groeien, ook over de grassen heen.

Eveneens opvallend is de bedekking van locatie 9-1_14.0 buitentalud. Hier was de bedekking in het voorjaar slechts 60%, echter in het najaar was de bedekking opgeklimmen naar 80%. Ook hier zijn de kruiden verklarend voor de toename, waarbij opgemerkt dat met name één soort hier dominant was, namelijk smalle weegbree.

Zowel de totale bedekking als het relatieve aandeel grassen en kruiden hierin is aldus sterk afhankelijk van het seizoen waarin de meting plaatsvindt. De grootschalige erosieproeven zijn uitgevoerd in de periode januari – april 2021, daarom wordt de opname van de vegetatie in het najaar 2020 in meer detail bekeken. Er is toen op 12 taluds, samen met de gastrekproeven, vegetatie en wortelonderzoek uitgevoerd ([13] en [14]). De bedekking van het taludoppervlak met grassen, kruiden, mos en kale grond is bepaald. Dit is per talud op 40 vakjes van 0,5x0,5 m gedaan. De vakjes corresponderen met de plekken waar gastrekproeven zijn uitgevoerd. De resultaten hiervan voor de taluds waarop ook grootschalige proeven zijn uitgevoerd staan in (Figuur E-1, Figuur E-2, Figuur E-3, Figuur E-4 en Figuur E-5). De totale bedekking is telkens 100% en is opgebouwd uit een aandeel grassen (blauw), kruiden (groen), mos (oranje) en kale grond (rood). De resultaten worden per locatie gegeven, samen met de resultaten van de grootschalige erosieproeven.

Locatie 53-3_103,4 buitentalud



Figuur E-1 Bedekking op locatie 53-3_103,4 buitentalud, opgebouwd uit aandelen grassen (grs), kruiden (krd), mos en kale grond (kaal).

De bedekking met grassen en kruiden is gemiddeld 89%, waarvan 61% grassen en 28% kruiden. Het aandeel grassen is dominant in de bedekking, er zijn slechts enkele kale plekjes.

Bij de golfklapproeven trad hier ondanks een gesimuleerde stormduur van 15,9 uur geen falen op. Dit was bij een gesimuleerde significante golfhoogte van 0,6 à 0,7 m. Dit talud gedroeg zich veruit het sterkst van alle door golfklappen beproefde gras op zand taluds.

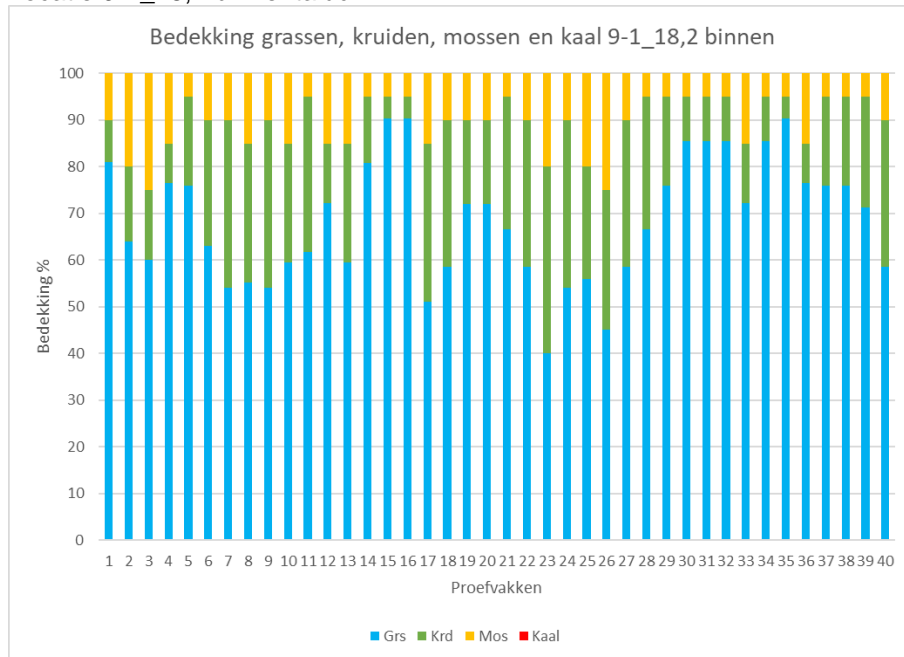
Er zijn drie golfoverslagproeven op het talud uitgevoerd. De resultaten zijn samengevat in Tabel E-2.

Tabel E-2 Samenvatting resultaten golfoverslagproeven uitgedrukt in een teruggerekende U_c (m/s)

Locatie Strook	Plek	Criterium	U_c (m/s)
53-3_103,4 1-1a Buitentalud Berkum	Kruin	geen falen	>4,5
	Kruin, vak 4	schade	4,9
	Talud	geen falen	> 6,4
	Talud, vak 14	schade	6,5 à 7
53-3_103,4 1-2 Buitentalud Berkum	Kruin	falen	5,1
	Talud	geen falen	>7,1
53-3_103,4 1-1b Buitentalud Berkum (WOS)	Kruin	geen falen	>3,9
	Talud	geen falen	>5,2
	Talud, vak 16	schade	5,6

Op deze locatie was een fietspad op de kruin aanwezig, waarbij de grasbekleding langs het fietspad mogelijk is verzwakt door een aanraking tegen het asfalt van het fietspad. Het fietspad zelf kan ook aanleiding hebben gegeven voor een belastingverhoging. Als er alleen naar het talud wordt gekeken, dan volgt op basis van schade op het talud een U_c van 5,6 m/s en 6,5 à 7 m/s. Voor niet falen van strook 1-2 volgt een U_c groter dan 7,1 m/s.

Locatie 9-1_18,2 binnentalud



Figuur E-2 Bedekking op locatie 9-1_18,2 binnentalud, opgebouwd uit aandelen grassen (grs), kruiden (krd), mos en kale grond (kaal).

De bedekking met grassen en kruiden is gemiddeld 90%, waarvan 68% grassen en 22% kruiden. Het aandeel grassen is dominant in de bedekking. Voor wat betreft de bedekking is deze locatie bijna gelijk aan locatie 53-3_103,4 buitentalud.

Er zijn op dit talud geen golfklapproeven uitgevoerd.

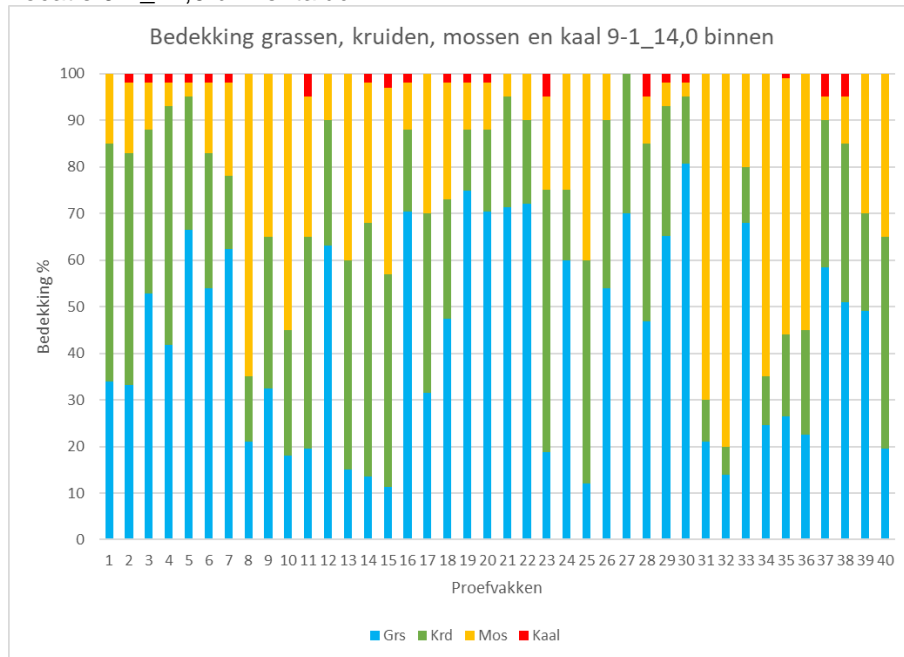
De golfoverslagproef op dit talud gaf het resultaat in Tabel E-3.

Tabel E-3 Samenvatting resultaten golfoverslagproeven uitgedrukt in een teruggerekende U_c (m/s)

Locatie Strook	Plek	Criterium	U_c (m/s)
9-1_18.2	Talud	geen falen	>5,8 à 6,6
3-1 Hessenweg binnentalud	Talud	schade	6,5

Op basis van schade aan het talud wordt een U_c teruggerekend van 6,5 m/s. Uitgaande van geen falen zou de U_c nog iets hoger kunnen zijn geweest, maar vanwege de schade waarschijnlijk niet heel veel hoger.

Locatie 9-1_14,0 binnentalud



Figuur E-3 Bedekking op locatie 9-1_14,0 binnentalud, opgebouwd uit aandelen grassen (grs), kruiden (krd), mos en kale grond (kaal).

De bedekking met grassen en kruiden is gemiddeld 73%, waarvan 43% grassen en 30% kruiden. Het aandeel grassen is dominant in de bedekking. De bedekking met grassen en kruiden is het laagst van de beproefde locaties, het aandeel mos is het hoogst. Kale plekken zijn aanwezig, maar in zeer geringe mate.

Er zijn op dit binnentalud geen golfklapproeven uitgevoerd.

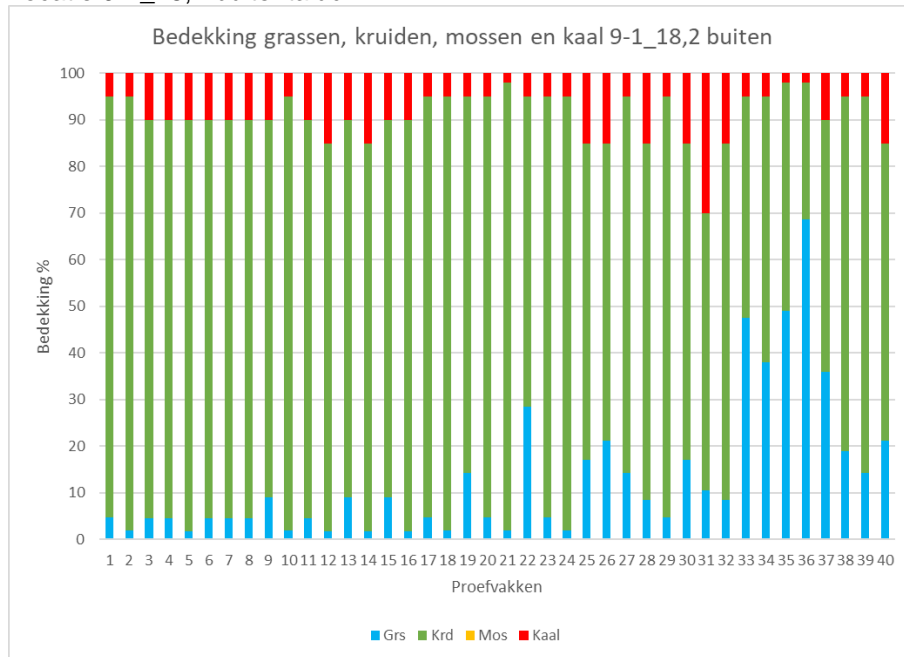
De golfoverslagproef op dit talud gaf het resultaat in Tabel E-4.

Tabel E-4 Samenvatting resultaten golfoverslagproeven uitgedrukt in een teruggerekende U_c (m/s)

Locatie Strook	Plek	Criterium	U_c (m/s)
9-1_14,0 2-2 Volkstuin binnentalud	Kruin	geen falen	>4,7
	Kruin, vak 2	schade	4,8
	Talud	geen falen	>7,4

Op deze locatie was de kruin enigszins beschadigd door veelvuldig belopen. Indien alleen het talud wordt beschouwd, waar ook de vegetatie-opname is gemaakt, dan volgt een U_c van meer dan 7,4 m/s. De relatief lage bedekking met grassen en kruiden en de relatief hoge bedekking met mos leidt niet tot een voor golfoverslag zwak talud.

Locatie 9-1_18,2 buitentalud



Figuur E-4 Bedekking op locatie 9-1_18,2 buitentalud, opgebouwd uit aandelen grassen (grs), kruiden (krd), mos en kale grond (kaal).

De bedekking met grassen en kruiden is gemiddeld 91%, waarvan een aandeel van slechts 13% grassen en maar liefst 78% kruiden. Het aandeel kruiden is veruit dominant in de bedekking, hetgeen ten opzichte van de voorgaande taluds zeer afwijkend is. Ook het aandeel kale grond is beduidend hoger dan bij de voorgaande locaties, met een uitschieter van 30% op een enkel 0,5x0,5 m vak.

Bij de golfklapproeven trad na een gesimuleerde stormduur van 8,7 uur falen op. Dit was het op één na sterkste talud onder een golfklapbelasting.

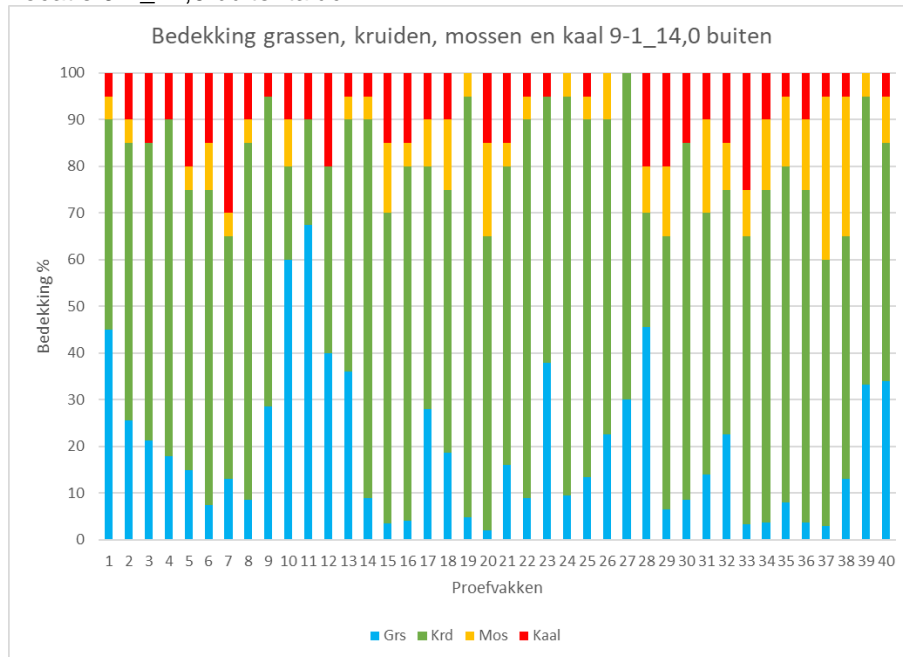
De golfoverslagproef op dit talud gaf het resultaat in Tabel E-5.

Tabel E-5 Samenvatting resultaten golfoverslagproeven uitgedrukt in een teruggerekende U_c (m/s)

Locatie Strook	Plek	Criterium	U_c (m/s)
9-1_18.2 3-2 Hessenweg buitentalud	Kruin	geen falen	>4,0
	Talud	geen falen	>6,9 à 7,3

Door het niet falen van het talud wordt een U_c berekend van meer dan 6,9 à 7,3 m/s. De dominantie in kruiden en de plekjes met kale grond, met de uitschieter van 30% op een enkel vlak van 0,5x0,5 m leidt niet tot een duidelijk zwakker talud dan de voorgaande door grassen gedomineerde taluds.

Locatie 9-1_14,0 buitentalud



Figuur E-5 Bedekking op locatie 9-1_14,0 buitentalud, opgebouwd uit aandelen grassen (grs), kruiden (krd), mos en kale grond (kaal).

De bedekking met grassen en kruiden is gemiddeld 80%, waarvan een aandeel van 20% grassen en 60% kruiden. Het aandeel kruiden is dominant in de bedekking, waarbij opgemerkt dat voor dit talud de kruiden in hoofdzaak bestond uit smalle weegbree. Het aantal soorten kruiden was zeer beperkt en daarmee afwijkend van locatie 9-1_18,2 buitentalud waar een grotere variatie aan kruiden aanwezig was. Het aandeel kale grond is beduidend hoger dan bij de locaties, met een uitschieter van 30% op een enkel 0,5x0,5 m vak. In meer vakjes zijn de percentages kale grond 20 à 25%. Het aandeel kale grond is op dit talud het hoogst.

Bij de golfklapproeven trad na een gesimuleerde stormduur van 4,4 uur falen op. Dit was van de Vechtdijktaluds het zwakste talud.

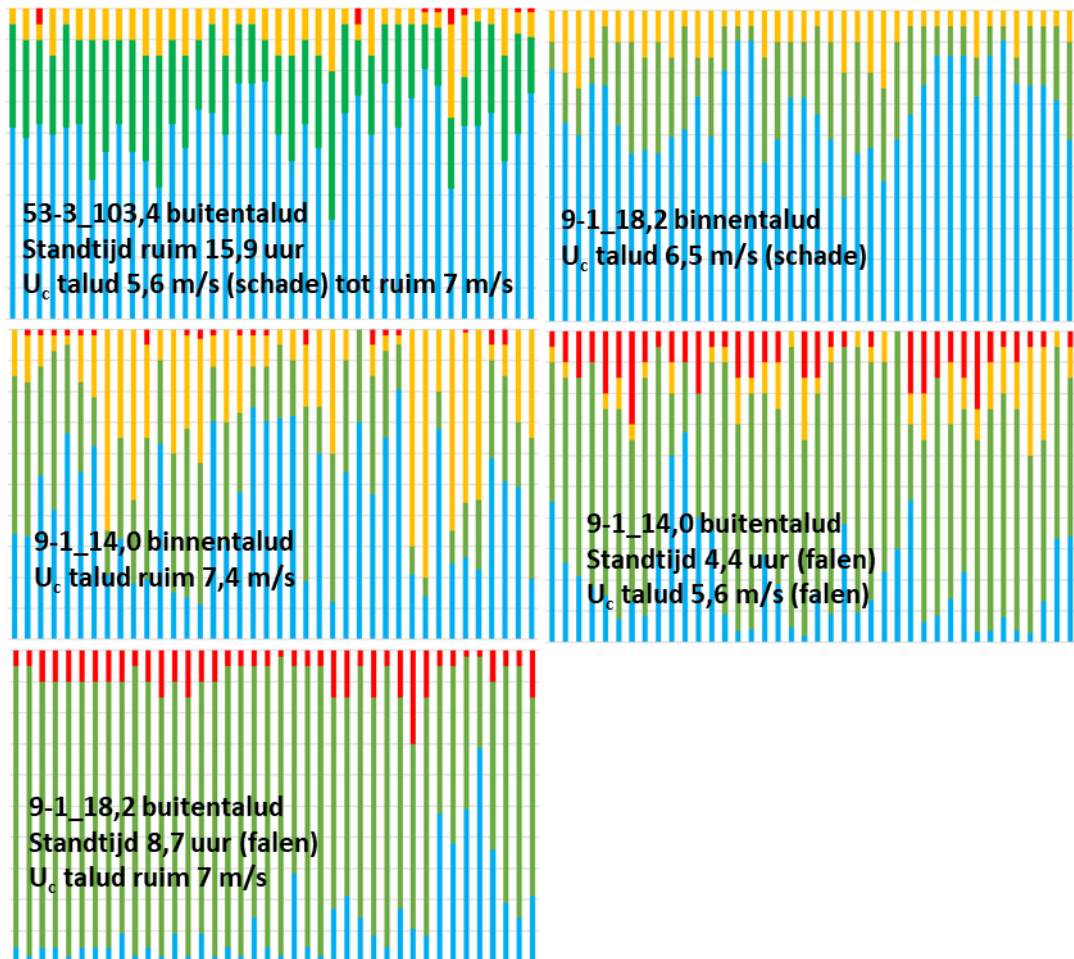
De golfoverslagproef op dit talud gaf het resultaat in Tabel E-6.

Tabel E-6 Samenvatting resultaten golfoverslagproeven uitgedrukt in een teruggerekende U_c (m/s)

Locatie Strook	Plek	Criterium	U_c (m/s)
9-1_14.0	Kruin	geen falen	>4,0
2-1 Volkstuin buitentalud	Talud, vak 8	falen	5,6

Op dit talud leidt falen tot een teruggerekende U_c van 5,6 m/s. Van de beproefde Vechtdijken in 2021 was dit ook voor golfoverslag het zwakste beproefde talud.

De grafieken met de opbouw van de bedekking met dezelfde kleurstelling als in de bovenstaande grafieken zijn naast elkaar gezet in de onderstaande Figuur E-6 waarin ook in het kort de resultaten van de grootschalige erosieproeven zijn weergegeven.



Figuur E-6 Opbouw van de bedekking van de verschillende taluds, blauw grassen, groen kruiden, geel mos en rood kale grond; en in het kort de resultaten van de grootschalige erosieproeven.

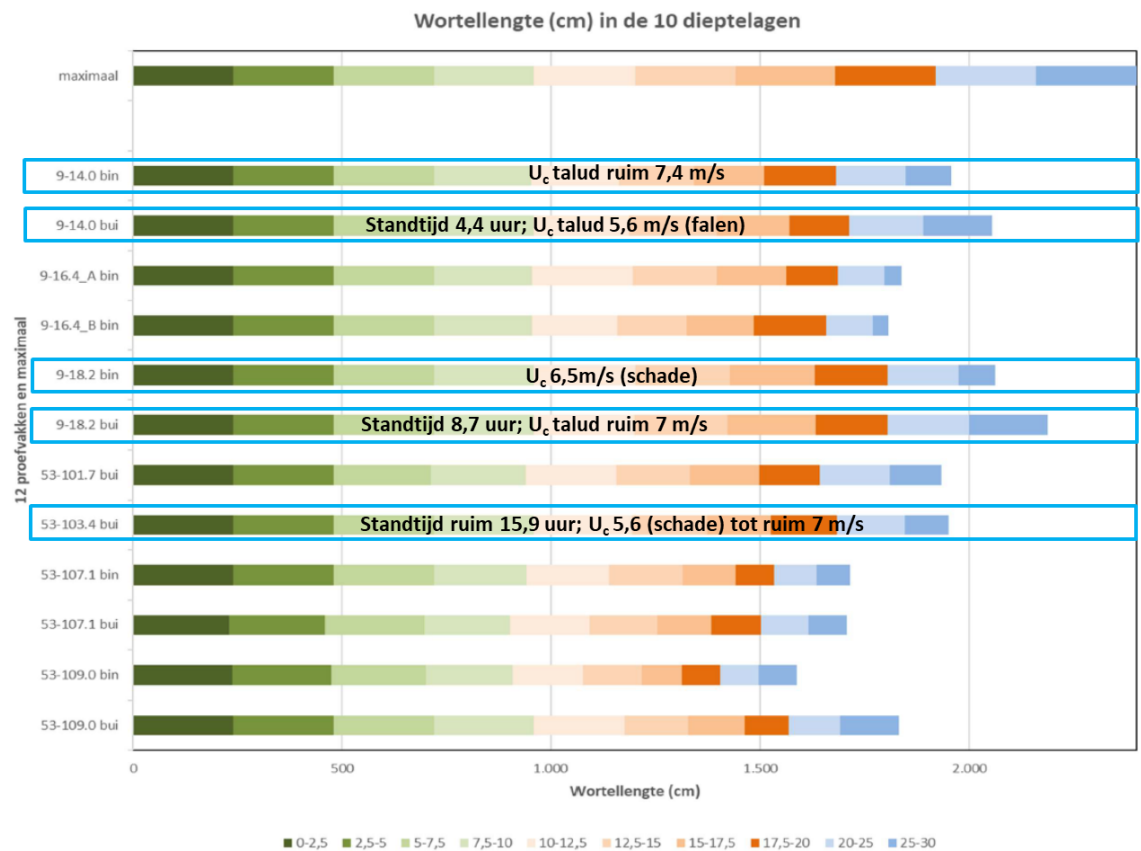
Het slechts presterende talud bij de grootschalige erosieproeven was 9-1_14,0 buitentalud. Deze locatie kenmerkt zich door een relatief hoog aandeel van kale grond in de bedekking in het najaar. Ook 9-1_18,2 buitentalud heeft kale plekken, maar wat minder dan 9-1_14,0 buitentalud.

Een relatief hoog aandeel van mos in de bedekking hoeft geen probleem te zijn gezien talud 9-1_14,0 binnentalud. Hierbij kan worden opgemerkt dat bij het steken van plaggen in het kader van de beoordeling van de kwaliteit van grasbekledingen op sterk bemoste taluds regelmatig opvalt dat de doorworteling nog verrassend goed is.

Dominantie van grassen boven kruiden in de bedekking in het najaar blijkt niet doorslaggevend ten aanzien van erosiebestendigheid met betrekking tot zowel golfklappen als door golfoverslag.

Concluderend kan worden gesteld dat met name kale grond in de bedekking waarschijnlijk ongunstig is. Dit is ook één van de criteria op basis waarvan het onderscheid wordt gemaakt tussen de kwaliteitsklassen 'gesloten zode', 'open zode' en 'fragmentarische zode' conform het WBI2017. Locaties met meer en of grotere open plekken zullen waarschijnlijk de classificatie 'gesloten zode' niet halen.

Voor een aantal locaties, waaronder de locaties waarop de grootschalige proeven zijn uitgevoerd zijn eveneens wortellengtes bepaald volgens de zogenaamde VTV-methode. De bepaling en methode is beschreven in [14]. De resultaten staan in Figuur E-7. De taluds waar de grootschalige proeven zijn uitgevoerd zijn blauw omkaderd.



Figuur E-7 Wortellengte (cm) per diepteklasse (van-tot cm) per talud afgezet tegen de maximale waarde aangegeven in de bovenste regel (VTV-methode zie [14]). Hierin ook kort de resultaten van de grootschalige erosieproeven.

Tot en met een diepte van 10 cm scoren alle locaties de maximale wortellengte en zijn alle locaties dus goed doorworteld. Dit wil overigens niet zeggen dat hier geen variaties zijn, echter de methode is niet onderscheidend. Dieper dan 10 cm treden er verschillen op. De taluds 9-1_14.0 buitentalud en 9-1_18.2 buitentalud, hebben dieper dan 10 cm een wat betere doorworteling. Dit is te verklaren door het relatief hoge aandeel kruiden, die dominant is in de bedekking tijdens de vegetatieopname in het najaar. Kruiden wortelen vaak wat dieper dan grassen. Ondanks het relatief lage aandeel van grassen in de bedekking is de doorworteling ook in de bovenste 10 cm nog altijd goed (maximale score volgens de VTV methode). Talud 53-3_103,4 met juist een dominant aandeel grassen in de bedekking scoort wat lager bij de doorworteling dieper dan 10 cm.

Er blijkt geen voor de hand liggende correlatie tussen de op de VTV manier bepaalde wortellengte en de precieze uitkomsten van de grootschalige erosieproeven. Bij de erosieproeven presteerde 9-1_14.0 buitentalud het slechtst, zowel onder golfklap- als golfoverslagbelasting. De wortellengte is echter het één na hoogste. De hoge standtijd van 53-3_103,4 buitentalud laat zich niet verklaren door juist een relatief lage diepere doorworteling. Overigens blijkt op een meer globaal niveau dat alle taluds, ondanks onderlinge verschillen, boven verwachting hebben gepresteerd bij de erosieproeven. Dit is naar alle waarschijnlijkheid verklaarbaar door de goede doorworteling van de toplaag, van zowel de bovenste 10 cm, als ook daaronder.

Samengevat wordt er geen eenduidige correlatie gevonden tussen het aandeel kruiden en grassen in de bedekking en de erosiebestendigheid. Wel lijkt het aandeel 'kale grond' in de bedekking een indicatie te zijn voor een verminderde erosiebestendigheid. Bij de veiligheidsbeoordeling worden grenzen gesteld aan de openheid van de zode, zoals aangegeven in [12], waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen een 'gesloten zode', 'open zode' en een 'fragmentarische zode'. Bij de beoordeling van een gras op zandbekleding wordt verondersteld dat er sprake is van een 'gesloten zode', waarbij bekledingen met teveel open plekken op basis van dit criterium worden uitgesloten.

De aanwezigheid van teveel open plekken vormen daarmee een aandachtspunt voor het beheer en onderhoud. Verondersteld wordt dat het beheer en onderhoud een 'gesloten zode' in stand houdt en waar nodig maatregelen neemt om tot een gesloten zode te komen.

F Herbepaling parameters standtijdlijn

F.1 Inleiding

Bij de review van het analyserapport [2] zijn een aantal vragen opgekomen ten aanzien van de gehanteerde methode voor de beoordeling van het mechanisme GEBU-golfklap. In deze bijlage beschrijven we een aantal extra analyses die wellicht licht werpen op deze vragen. De belangrijkste vragen zijn:

1. Heeft een gunstige meting (de proef met standtijd van 15.9 uur) per saldo een negatief effect op de rekenwaarde door grotere spreiding?
2. Is alle onzekerheid op de juiste wijze meegenomen in de fit?

Voor de fit van de standtijdlijn wordt gebruik gemaakt van een Bayesiaanse parameterschatting. In [2] is een standtijdlijn beschreven met parameters:

- a normaal verdeeld met gemiddelde = 0.56, standaardafwijking = 0.075.
- b deterministisch -0.07.

Er is sprake van een foutterm, het is immers vrijwel onmogelijk om 1 geparameteriseerde verdeling te vinden die door alle punten gaat, zeker omdat maar 1 van de standtijdlijnparameters een stochast is. Idealiter is deze foutterm zo klein mogelijk. Tegelijkertijd is de spreiding in de punten dermate groot dat dit bijna niet te vangen is met een opgelegde geparameteriseerde lijn die niet perse te herleiden valt uit de data. We beschouwen 4 mogelijke parameterisaties van de standtijdlijn:

1. De verdelingen uit het analyserapport [2]
2. Een fit op alle data met a als stochast en $b=-0.06$
3. Een fit op de data zonder de meest gunstige proef met a als stochast en $b=-0.06$
4. Een fit met zowel a als b als stochast

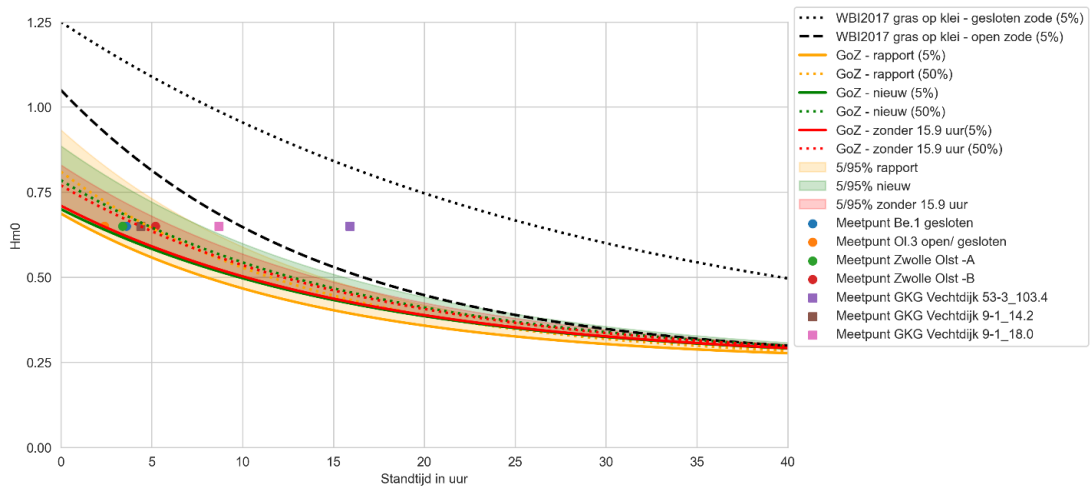
De (gefitte) kansverdeling voor a is nu als lognormaal aangenomen, dit is in overeenstemming met de Bayesiaanse schatting, maar ook een normale verdeling past goed.

F.2 Resulterende standtijdlijn

In Figuur F-1 zijn de resulterende standtijdlijnen van opties 1 tot en met 3 weergegeven. Te zien is dat de standtijdlijn uit het rapport [2] relatief wat lager ligt dan de nieuwe analyses, maar vooral voor de langere belastingduren. Vermoedelijk met name door de lagere b-waarde. Wanneer een kansverdeling wordt gefit op parameter a levert dat voor de groene lijn (inclusief alle data) een lognormale verdeling met gemiddelde 0.54, en standaardafwijking 0.057 op (5%-waarde van a wordt dan 0.45). Voor de rode lijn, waar het hoge datapunt is weggelaten leidt dit tot een lognormale verdeling van a met gemiddelde 0.52 en standaardafwijking 0.036: de spreiding wordt kleiner. De 5%-waarde van a wordt met alle datapunten 0.45, zonder het hoge punt 0.46.

Het ligt voor de hand om alle data mee te nemen in de analyse. De standtijdlijn kan dus worden beschreven met de volgende parameters:

- a: gemiddelde = 0.54, standaardafwijking = 0.057 (lognormaal verdeeld).
- b= -0.06 (determinist).
- c = 0.25 (determinist).

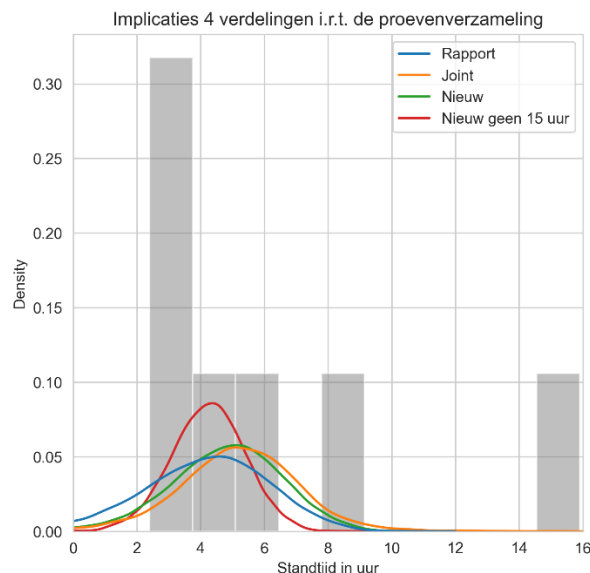


Figuur F-1 Resulterende standtijdlijnen met verschillende parameterisaties.

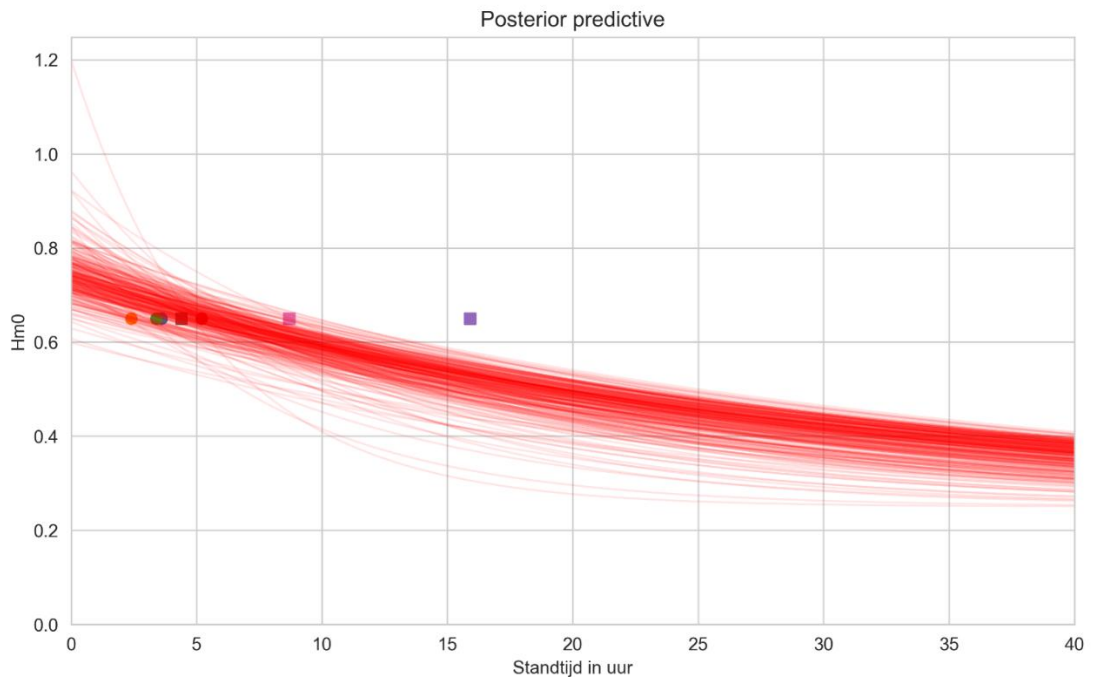
F.3 Analyse bij $H_{m0}=0.65m$

Alle proeven zijn gedaan bij een golfhoogte van 0.65 meter. We kunnen dus ook kijken welke spreiding de gevonden verdelingen impliceren bij deze golfhoogte. Dat is in Figuur F-2 weergegeven. Nu is ook de 'Joint' (dat wil zeggen a en b als gecorreleerde stochasten) meegenomen op basis van de Bayesiaanse schatting. Voor deze fit is b aangenomen als maximaal -0.03, anders is het resultaat een vrijwel horizontale lijn en dat klopt niet met de onderliggende fysica. Te zien is dat deze figuur een relatief grote spreiding heeft, maar met name dat de gefitte standtijdlijnen veel meer verschillen qua vorm (zie Figuur F-3). Dit is op zich logisch: het is immers nauwelijks mogelijk om op basis van 7 datapunten op een gelijk niveau een exponentiele functie met 2 stochasten te fitten.

Tevens is te zien dat de verdeling uit het rapport wat conservatiever is dan de nieuwe verdelingen, en dat de verdeling zonder 15.9 uur proef minder spreiding en een lager gemiddelde heeft. De fit met gecorreleerde stochasten (oranje) komt redelijk overeen met de nieuwe fit (groen).



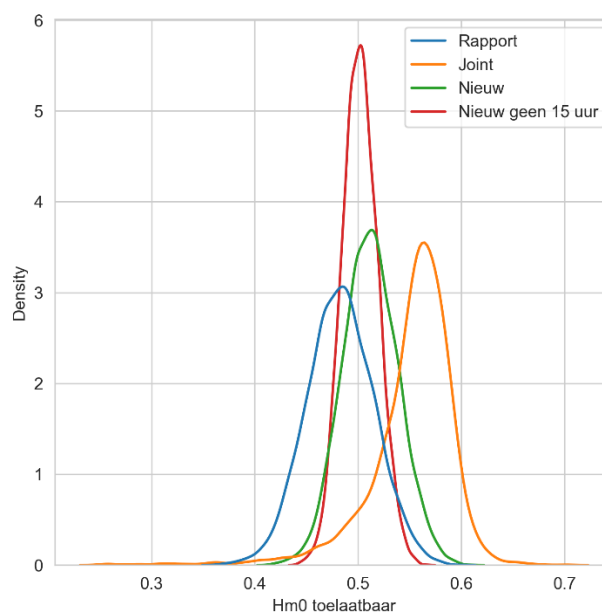
Figuur F-2 Standtijd bij een golfhoogte van 65 centimeter.



Figuur F-3 Gefitte standtijdlijnen bij gecorreleerde stochasten a en b.

F.4 Analyse bij t=12 uur

Voor de beoordeling is vooral een standtijd van 12 uur van belang. We kunnen dus ook Figuur F-4 (nu zonder data) maken voor een standtijd van 12 uur. Dit is hieronder weergegeven. Te zien is opnieuw dat de verdeling uit het P8 rapport relatief ongunstig is, en dat het hoge meetpunt leidt tot een smallere verdeling met lager gemiddelde. De gecombineerde kansverdeling is hier veel gunstiger omdat de meeste fits een veel hogere b-waarde hebben, tegen de grens van de uniforme prior aan. De reden is dat de data eigenlijk geen onderbouwing geven voor een gekromde lijn (ter illustratie: wanneer niet begrensd door de a priori verdeling wordt de lijn vrijwel horizontaal). De mate van kromming is op basis van de data lastig te onderbouwen.



Figuur F-4 Toelaatbare golfhoogte bij een belastingduur van 12 uur.

F.5 Discussie

Uit de analyses vallen een aantal zaken op. Die benoemen we hier kort:

- De fit uit het rapport leidt tot een ongunstigere verdeling voor de standtijdlijn. De reden hiervoor is onduidelijk. Een aanpassing is dat een andere b-waarde gehanteerd, wat weer kan leiden tot een iets betere fit. Echter, ook met een b-waarde van -0.07 wordt een gunstigere verdeling verkregen.
- De gecombineerde kansverdeling van a en b leidt tot andere resultaten, met name voor een standtijd van 12 uur. Daarbij is ook nog eens de harde begrenzing dat $b < -0.03$ van belang. De data geeft geen onderbouwing voor de kromming van de lijn (alle punten hebben dezelfde H_{m0}). Zeker gezien de praktische bezwaren bij het hanteren van een gecombineerde kansverdeling lijkt dit geen meerwaarde te geven².
- De nieuwe fit zonder het gunstigste datapunt (53.3_103.4) levert een standtijdlijn met minder spreiding maar een lager gemiddelde op. Dat heeft te maken met de onzekerheid in de data: de spreiding in de punten wordt veel kleiner, maar het gemiddelde ook lager.

Samenvattend: met wat verschillende uitgangspunten kunnen behoorlijk verschillende standtijdlijnen gevonden worden. De oorzaak ligt hoofdzakelijk in 2 factoren:

- Het forceren van een specifieke parameterisatie, in combinatie met
- Het enkel hebben van data voor 1 y-waarde.

Dat levert hoe dan ook beperkingen op aan de methodiek, en aan de nauwkeurigheid van een gefitte standtijdlijn. Het belangrijkste lijkt daarom dat de standtijdlijn in overeenstemming is met de inschatting van de betrokken experts.

² In dat geval moet een gecombineerde kansverdeling worden gefit (inclusief correlatie), en moeten hieruit vervolgens rekenwaarden worden bepaald. Dat is wel mogelijk, maar zeer bewerkelijk en een stuk lastiger praktisch hanteerbaar.

G Verzameling U_c

De normale kansverdeling van de kritische frontsnelheid U_c (m/s) uit het analyserapport [2] is gebaseerd op metingen van de U_c uit grootschalige erosieproeven op de Overijsselse Vechtdijk en op de IJsseldijk. Bij een aantal van de proeven is echter geen falen opgetreden, maar enkel schade of zelfs geen schade. Bij het terugrekenen van de proeven is de U_c in eerste instantie bepaald op basis van falen 1), als er geen falen was, dan op basis van schade 2) en als er ook geen schade was op basis van niet falen 3). Bij falen wordt de werkelijke kritische stroomsnelheid bepaald. Bij schade betreft het een benadering. Uit het criterium voor schade kan ook een U_c worden teruggerekend, echter deze waarde is naar verwachting minder nauwkeurig. In het laatste geval 3) is op basis van niet falen een minimale U_c bepaald. De U_c per locatie en op basis van welk criterium deze is teruggerekend staan in Tabel G-1.

Tabel G-1 U_c per locatie en per criterium

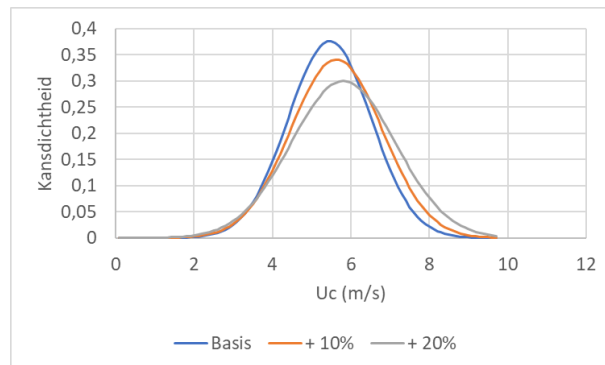
Strook	Plek	Criterium	U_c (m/s)	U_c (m/s) per locatie
1-1a Buitentalud Berkum	Kruin	geen falen	>4,5	5,1 (falen)
	Kruin, vak 4	schade	4,9	
	Talud	geen falen	> 6,4	
	Talud, vak 14	schade	6,5 à 7	
1-2 Buitentalud Berkum	Kruin	falen	5,1	5,1 (falen)
	Talud	geen falen	>7,1	
1-1b Buitentalud Berkum (WOS)	Kruin	geen falen	>3,9	5,6
	Talud	geen falen	>5,2	
	Talud, vak 16	schade	5,6	
2-1 Buitentalud volkstuin	Kruin	geen falen	>4,0	5,6 (falen)
Talud, vak 8	falen	5,6		
2-2 Binnentalud volkstuin	Kruin	geen falen	>4,7	4,8 (schade)
	Kruin, vak 2	schade	4,8	
	Talud	geen falen	>7,4	
3-1 Hessenweg binnentalud	Talud	geen falen	>5,8 à 6,6	6,5 (schade)
	Talud	schade	6,5	
3-1 Hessenweg binnentalud – graverij – zelfde strook	Talud	geen falen	>5,4	6,5 (schade)
3-2 Hessenweg buitentalud	Kruin	geen falen	>4,0	6,9 (geen falen)
	Talud	geen falen	>6,9 à 7,3	
3-3 Hessenweg binnentalud - kort gras en graverij)	Talud vak 10	falen	6,8	6,8 (falen)
	Talud vak 5	schade	5,6	
IJsseldijk 1	Talud	geen falen	>5,4	5,4 (geen falen)
IJsseldijk 2	Talud	falen	5,1	5,1 (falen)
IJsseldijk 3	Talud	geen falen	>4,0	
IJsseldijk 4	Talud	geen falen	>5,0	
Vechtdijk 2010 1 buitentalud Hs=2 m	Talud	geen falen	>5,0	5,0 (geen falen)
Vechtdijk 2010 2 binnentalud Hs=2 m boom	Talud	geen falen	>4,1	3,4 (falen)
Vechtdijk 2010 3 binnentaluds Hs=1 m	Talud	falen	3,6	
Vechtdijk 2010 3 binnentalud Hs=3 m	Talud	falen	3,4	

Van de tien locaties waarvoor een U_c is bepaald zijn er vijf op basis van falen, twee op basis van schade en drie van de U_c zijn eigenlijk geen kritische waarden, maar minimaal aangetoonde waarden.

Het beschouwen van de minimaal aangetoonde kritische waarde van U_c als werkelijke U_c leidt tot conservatisme. Door de waarden van deze U_c met 10 en 20% op te hogen wordt inzicht verkregen in de mate van conservatisme (Tabel G-2). Een visualisatie van de verdelingen wordt gegeven in Figuur G-1.

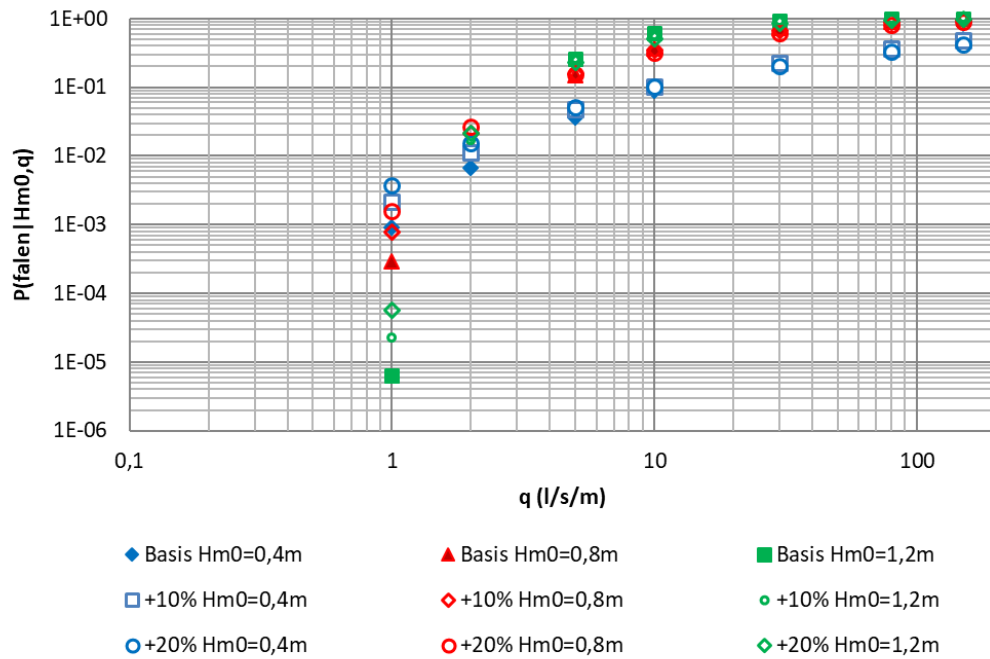
Tabel G-2 Verhoging van U_c (m/s) voor locaties zonder falen en zonder schade met 10% en 20%

	U_c Basis	U_c + 10%	U_c + 20%
falen	5,1	5,1	5,1
falen	5,6	5,6	5,6
schade	4,8	4,8	4,8
schade	6,5	6,5	6,5
geen falen	6,9	7,59	8,28
falen	6,8	6,8	6,8
geen falen	5,4	5,94	6,48
falen	5,1	5,1	5,1
geen falen	5	5,5	6
falen	3,4	3,4	3,4
Gemiddelde	5,5	5,6	5,8
Variatiecoëfficiënt	0,19	0,21	0,23



Figuur G-1 Kansdichtheid uitgaande van een normale verdeling U_c (m/s) voor de basis en waarbij de U_c op basis van niet falen 10% en 20% zijn verhoogd.

Door het ophogen van de U_c met 10% en 20% neemt het gemiddelde toe, maar ook de spreiding. De weerslag hiervan op de kansverdelingen van de q_c (l/s per 'm) staat in Figuur G-2.



Figuur G-2 Berekende faalkansen van de gras op zandbekleding gegeven diverse golfoverslagdebieten q (l/s per m), golfhoogte H_{m0} (m) en scenario's (basis, +10% en +20%)

De combinatie van een wat hoger gemiddelde en een grotere spreiding van de kansverdeling van U_c leidt nauwelijks tot afwijkingen van de berekende faalkansen gegeven een bepaald golfoverslagdebiet q (l/s per m) en golfhoogte H_{m0} (m). Bij een golfoverslagdebiet van 2 l/s per m en hoger liggen de berekende faalkansen bijna op elkaar. Alleen bij een golfoverslagdebiet van 1 l/s per m nemen de verschillen in de berekende faalkans toe, echter naar verwachting heeft dit niet of nauwelijks invloed op de faalkans of benodigde hoogte van de zanddijk met een grasbekleding. In het algemeen is de overschrijdingskans van het kritische golfoverslagdebiet in het illustratiepunt van de GEKB berekening veel hoger dan de bij 1 l/s per m berekende kans van orde 10^{-3} à 10^{-5} .

H Lengte-effect factoren

Memo

Datum

21 oktober 2021

Contactpersoon

Wouter Jan Klerk

Doorkiesnummer

+31(0)88 335 8390

E-mail

WouterJan.Klerk@deltares.nl

Aantal pagina's

1 van 13

Onderwerp

Inschatting lengte-effectfactoren gras op zanddijken (GEBU/GEKB)

1 Inleiding

Naar aanleiding van de golfoverslag en golfklapproeven langs de Overijsselse Vecht, zijn in [1] beoordelingsmethoden afgeleid voor het beoordelen van golfklap op het buitentalud (GEBU-klap) en golfoverslag (GEKB) voor gras op zanddijken. In eerste instantie is aangenomen dat dezelfde lengte-effectfactoren kunnen worden gehanteerd als voor gras op kleidijken ($N=1$ voor 53-3, en $N=2$ voor 9-1, voor zowel GEBU als GEKB). Gezien het verschil in karakter van beide bekledingen is door het reviewteam aanbevolen om dit nader te onderbouwen. Het doel van deze memo is dus om te beschouwen of de lengte-effect factoren voor gras op zanddijken gelijk kunnen worden gehouden aan gras op kleidijken, voor de mechanismen GEBU en GEKB.

Een eventueel grotere lengte-effectfactor zou nodig kunnen zijn als de bijdrage van de (ruimtelijk fluctuerende) sterkte-onzekerheid groter is en/of de sterkte-onzekerheid een kortere ruimtelijke correlatieafstand heeft. Merk op dat dit memo enige inhoudelijke achtergrond op het gebied van probabilistiek veronderstelt (zie bijv [2] voor achtergrond bij het lengte-effect).

2 Achtergrond & aanpak

2.1 Achtergrond lengte-effectfactoren voor gras op kleidijken

Het lengte-effect is de toename van faalkans met de lengte van een dijk. Deze kan toenemen doordat er binnen een traject meerdere ongecorrleerde delen zijn. Deze ongecorrleerde delen kunnen ontstaan door bijvoorbeeld verschillende belastingen (bijvoorbeeld verschillende windrichtingen) of door ruimtelijke fluctuerende sterkte eigenschappen.

Voor gras op klei worden, afhankelijk van het dijktraject lengte-effectfactoren $N=1$, 2 of 3 gehanteerd. Het onderscheid hierin is bepaald op basis van het ingeschatte aantal windrichtingen wat invloed heeft op de trajectfaalkans: omdat bij trajecten langs de kust stormen uit verschillende richtingen een bijdrage leveren aan de faalkans, kan zelfs bij volledig gecorrleerde sterkte er toch een lengte-effect optreden. Langs de rivieren speelt dit geen rol omdat hier veelal overloop dominant is bij GEKB (zowel overloop als overslag hebben een bijdrage in dit mechanisme, de verhouding is afhankelijk van de invloed van golven), daar wordt een factor $N=1$ gehanteerd: omdat bij overloop de windrichting geen rol speelt is daar geen invloed van de windrichting.

Deze lengte-effectfactoren zijn primair bepaald voor GEKB, maar later overgenomen voor GEBU, vanuit het idee dat globaal gezien dezelfde stochasten een rol spelen. De impliciete aanname bij deze factoren is dat de belasting zeer dominant is ten opzichte van de sterkte en dat eventuele ruimtelijke fluctuaties in de sterkte dus geen effect hebben op het lengte-effect.

In algemene zin is er weinig onderbouwing voor de precieze lengte-effectfactoren anders dan dat de invloed van de sterkte in VNK analyses beperkt was. Er is verder geen onderbouwing voor handen waarom er geen invloed is op de faalkans door ruimtelijk onzekere parameters. In die zin is een lengte-effectfactor van 1 per definitie wat optimistisch: de onderliggende aanname is dat er geen enkele relevante variatie in de sterkte is. Opgemerkt moet worden dat bij VNK ook veel lagere gemiddelde kritieke overslagdebieten, met relatief weinig spreiding werden gehanteerd. Met de nu gehanteerde verdelingen (hogere gemiddelde kritieke debieten, maar wel met meer spreiding) kan dat anders liggen en kan de sterkte-onzekerheid een significante bijdrage aan de faalkans geven, met een groter lengte-effect tot gevolg.

2.2 Bepalen van het lengte-effect

2.2.1 Huidige aanpak bij beoordeling en ontwerp

Lengte-effectfactoren kunnen worden gebruikt om op een simpele wijze een vertaalslag te kunnen maken tussen eisen op traject- en vak/doorsnedeniveau. Dit is nodig aangezien de eis op trajectniveau wordt gesteld, terwijl de faalkansanalyses (of daaraan gerelateerd de semi-probabilistische verificaties) plaatsvinden voor doorsneden. Door middel van dergelijke factoren kan in rekening worden gebracht dat, ook al wordt voor een aantal doorsneden de faalkans berekend, er (partiele) correlaties zijn tussen deze doorsneden, en dat deze doorsneden statistisch slechts representatief zijn voor een beperkt deel van het traject. Een dergelijke vertaalslag wordt binnen het WBI-2017 als volgt gemaakt:

$$P_{\text{eis,dsn}} = \frac{P_{\text{eis,traject}}}{N} \text{ met } N = 1 + \frac{a \cdot L_{\text{traj}}}{b}. \quad (1)$$

Hierin is N de lengte-effectfactor, a is hierbij een maat voor het deel van het traject wat gevoelig is voor het mechanisme. b is een maat voor de lengte van statistisch onafhankelijke strekkingen. Hierbij wordt voor mechanismen waarbij vooral de variatie in oriëntaties van belastingen een rol speelt (bijv. steenzettingen en overslag) vaak direct een waarde voor N gegeven. Voor mechanismen met een dominante, in de ruimte sterk variërende, sterkte (bijv. macrostabiliteit/piping) worden factoren a en b gehanteerd.

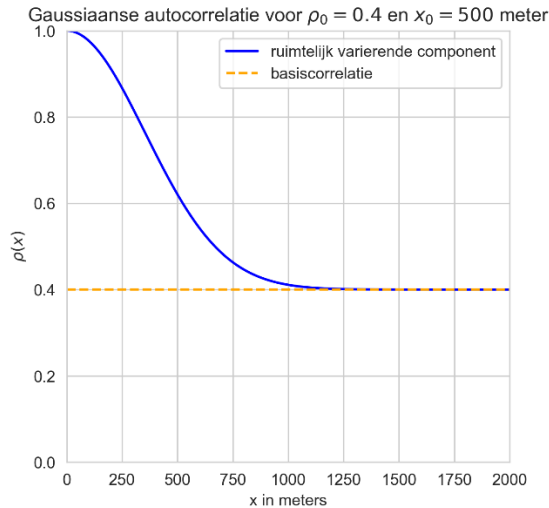
Uiteindelijk dient deze vertaalslag ervoor dat wanneer we op doorsnedeniveau faalkansen uitrekenen, we deze vergelijken met een eis die dusdanig gekozen is dat op systeemniveau aan de eis voldaan wordt. In dit memo rekenen we de 'effectieve lengte-effectfactor' uit: dit is een waarde van N (of een combinatie van a en b) voor een bepaalde systeemconfiguratie (betrouwbaarheid en onzekerheidsbijdrage voor elk dijkvak). Het bepalen van deze waarde geeft inzicht in de N -waarde die bij een bepaald type systeem zou kunnen worden gehanteerd voor het bepalen van de doorsnede-eis. Concreet betekent het dat als de doorsnede-eis wordt gebaseerd op deze factor, het systeem als geheel voldoende veilig is als elke doorsnede in ieder geval aan deze eis voldoet. We bepalen deze waarde door verschillende systemen met correlatie tussen doorsneden/vakken te simuleren, dit is verder beschreven in de volgende paragraaf. Uiteraard heeft ieder systeem een (iets) andere theoretische waarde.

2.2.2 Bepaling van de effectieve lengte-effectfactor

N wordt bepaald door ruimtelijke variatie in sterkte- en belastingeigenschappen. Deze ruimtelijk variërende onzekerheid wordt meestal door een autocorrelatiefunctie beschreven, deze geeft weer hoe snel de correlatie afneemt als functie van de afstand tussen 2 punten. In de meeste gevallen wordt de autocorrelatie tussen parameters gemodelleerd als een Gaussiaanse autocorrelatiefunctie. Andere vormen van autocorrelatie zijn ook mogelijk, maar daar is zelden (en zeker in dit geval) geen onderbouwing voor. De Gaussiaanse autocorrelatie heeft de vorm:

$$\rho(x) = (1 - \rho_0) \cdot e^{-\left(\frac{x}{x_0}\right)^2} + \rho_0, \quad (2)$$

waarin x de lengterichting van de dijk weergeeft, x_0 de correlatielengte, en ρ_0 het niet-ergodische (niet-variërende) deel van de correlatie. Figuur 2-1 geeft ter illustratie de correlatie weer voor een correlatielengte van 500 meter en $\rho_0=0.4$.



Figuur 2-1 Voorbeeld Gaussiaanse autocorrelatie

In een probabilistische berekening hangt de correlatie tussen 2 punten in de ruimte af van de bijdrage van de ruimtelijk variërende stochasten. De correlatie tussen falen (gegeven door de grenstoestandsfunctie Z) voor 2 punten i en j kan worden bepaald met de volgende formule:

$$\rho(Z_i, Z_j) = \sum_{k=1}^n \alpha_{ik} \cdot \alpha_{jk} \cdot \rho_{ijk}, \quad (3)$$

waarbij er n stochasten zijn met invloedscoëfficiënten α_{ik} en α_{jk} voor beide locaties. Deze coëfficiënten volgen uit probabilistische analyses. De correlatie ρ_{ijk} volgt dan uit bovenstaande formule(2), en kan voor iedere stochast worden bepaald, waarmee de correlatie tussen falen op beide punten wordt verkregen. Omdat dit vaak gecompliceerde berekeningen betreft worden hier benaderingsmethoden voor gehanteerd (zie bijv. [3]). Het is ook mogelijk om een dergelijke berekening te simuleren met een Monte Carlo simulatie. Wanneer we aannemen dat de grenstoestandsfunctie gelineariseerd kan worden in het ontwerp punt, krijgt deze de vorm (hier voor punt i) (zie voor achtergrond [3,4]):

$$Z_i = \beta_i + \sum_{k=1}^n \alpha_{ik} \cdot u_{ik} \quad (4)$$

met β de betrouwbaarheidsindex van de kering, en α_{ik} het relatieve belang van de stochast k voor doorsnede i , en u_{ik} de (standaardnormale) waarde van deze stochasten in het ontwerp punt. Omdat geldt dat de som van de gekwadrateerde invloedscoëfficiënten α_{ik} gelijk is aan 1, kan de sommatie worden vervangen door een standaard normale variabele zodat:

$$Z_i = \beta_i + u_i \quad (5)$$

De standaardnormale waarde u_i in deze vergelijking is echter deels gecorreleerd met de standaardnormale waarde van doorsnede j (zie vergelijking(3)), waarvoor ook geldt $Z_j = \beta_j + u_j$. Door u_j te schrijven als functie van u_i krijgen we:

$$Z_j = \beta_j - (\rho(Z_i, Z_j) \cdot u_i + \sqrt{1 - \rho(Z_i, Z_j)^2} \cdot u_j^*), \quad (6)$$

waarbij u_j^* een onafhankelijke standaardnormale variabele is. In dit memo gebruiken we een Monte Carlo simulatie om op deze wijze de faalkans van verschillende systemen met verschillende correlaties te bepalen.

De grenstoestandfunctie voor falen van een systeem met n vakken is dan: $Z_{sys} = \min_{j=1}^n(Z_j)$,

en de faalkans van het systeem $P_{f,sys} = P(Z_{sys} < 0)$. Daarbij geldt dat voor vakken moet gelden dat ofwel binnen het dijkvak de invloed van ruimtelijke variaties verwaarloosbaar is, of dat alle ruimtelijke onzekerheden binnen het vak meegenomen zijn in de kansverdelingen gebruikt in de doorsnede-berekening.

De effectieve lengte-effectfactor N kan dan worden bepaald volgens:

$$N = P(Z_{sys} < 0) / \max(P_{f,j}) \quad (7)$$

Wanneer de verschillende vakken k volledig gecorreleerd zijn geldt dat $P_{f,sys} = \max(P_{f,k})$, en dus

$N = 1$. Wanneer de vakken volledig ongecorrleerd zijn geldt dat $P_{f,sys} = 1 - \prod_{k=1}^n (1 - P_{f,k})$ (zie

ook [5,6]) en geldt voor kleine kansen dat N gelijk is aan het aantal vakken waarin het systeem is opgedeeld.

Tot slot moet worden opgemerkt dat voor het effectieve lengte-effect van belang is of de betrouwbaarheid van de verschillende vakken ongeveer gelijk is of dat deze verschilt.

Wanneer vakken ongelijke betrouwbaarheid hebben worden de zwakke schakels relatief belangrijk, waardoor ruimtelijke variaties een veel kleiner effect hebben op de systeemfaalkans. Dit is bij bijvoorbeeld piping en macrostabiliteit meegenomen door de factor α , die het deel van het traject wat gevoelig is voor het mechanisme representeert.

In de volgend paragraaf schatten we op basis van de onzekerheidscomponenten bij gras op zand de correlatie tussen dijkvakken in. We gaan er daarbij van uit dat een doorsnede-berekening van GEBU of GEKB representatief is voor een onafhankelijk dijkvak van 1000 meter lengte (d.w.z., alle variatie binnen die 1000 meter is verdisconteerd in de berekening).

2.3 Ruimtelijke onzekerheden bij gras op zand

Voor de bepaling van ruimtelijke onzekerheden wordt gekeken naar dijken, behorende tot de primaire waterkeringen, met een gras op zand bekleding. Dit betreft een beperkt areaal van de dijken in Nederland, naar schatting 60 à 70 km in het totaal. Er zijn ook secundaire waterkeringen met een gras op zand bekleding, echter deze zijn buiten beschouwing gelaten.

Er zijn veel mogelijke variaties die enige invloed zullen hebben op de vegetatie, en daarmee op de erosiebestendigheid, maar vaak zal de uiteindelijke invloed beperkt zijn. Er is een inschatting gemaakt van de schaal waarop een significante invloed wordt verwacht. Zo wordt bijvoorbeeld wel verwacht dat er verschillen kunnen zijn tussen noordelijk en zuidelijk georiënteerde taluds, wat overigens niet is aangetoond in de grootschalige proeven, maar dat er tussen zuidelijk en bijvoorbeeld zuidwestelijk niet zoveel verschil zal zijn.

De variabiliteit wordt tot op zekere hoogte gelimiteerd door ingrepen vanuit beheer en onderhoud. Uit dijkinspecties kan blijken dat de grasmat er problematisch bij ligt, bijvoorbeeld veel open plekken heeft of wordt overgenomen door ruigtebegroeiing of probleemsoorten. Dit is visueel vast te stellen, maar ook via de beoordeling van de categorie zode (gesloten, open of fragmentarisch). De beheerder zal in dat geval ingrijpen met aanpassing van beheer of een maatregel. In dergelijke gevallen is de afwijking een anomalie, omdat de zodekwaliteit daarmee buiten de toepassingsvoorwaarden van de beoordeling valt en er dus in feite niet beoordeeld mag worden (mits er open of fragmentarisch van toepassing is). We beschouwen dus in die zin enkel de ruimtelijke variaties die leiden tot een goede, ofwel een slechte gesloten zode.

De volgende bijdragen zijn (gerangschikt van meest naar minst belangrijk) relevante ruimtelijk variërende onzekerheden, met daarachter de schaal waarop dit varieert:

Factor	Ruimtelijke schaal	Opmerkingen
Gevoerde beheer, hooien, beweiden (continu of tijdelijk intensief), toepassen bemesting.	Kilometers	Verschillen in beheer komen voort uit verschillende eigenaren en/of pachters en hoe ze het grasland inzetten. Het waterschap zal wel kunnen ingrijpen als het gevoerde beheer leidt tot een onacceptabele grasmatt (fragmentarische zode, waar een open of gesloten zode nodig is) en daarmee een onacceptabel risico op een overstroming. In dat geval betreft het een 'anomalie'.
Substraat, variaties in granulaire samenstelling, organisch stof gehalte, kalkgehalte, aanwezigheid van nutriënten en dergelijke. Van belang zijn onder andere het vochtvasthoudend vermogen van de grond en het aanbod van nutriënten en sporenelementen.	kilometers	Er wordt vanuit gegaan dat zanddijken gemaakt worden met gebiedseigen grond, ofwel dekzandlagen uit de buurt van de dijk. Ook hier zal enige variabiliteit in zitten, echter het gaat om eenzelfde soort grond. Langs de Vechtdijk is maar weinig variabiliteit aangetroffen.
Vochtaanbod vanuit de grond, polderpeil, rivierpeil, breedte en hoogte van de dijk ten opzichte van maaiveld.	kilometers	Opgemerkt wordt dat er een verschil is tussen kruin en teen van de dijk. Dit is variabiliteit op meterschaal in het dwarsprofiel. Dit is meegenomen in de grootschalige proeven. In de lengterichting kan dit ook beperkt variëren.
Expositie Zuid/ Noord. Zon of schaduw.	Kilometers	Vergelijkbaar aan de variabiliteit bij de belasting door golven.
Aanbod van zaden/ soorten uit omgeving, leidend tot verschillende soorten grassen en kruiden in de bekleiding.	Honderd meter tot enkele honderden meters	Afhankelijk van gebruik omliggende percelen, hooiland, akkerland, bos, natuurgebied. Geeft variabiliteit in soortenrijkdom. De variabiliteit van de erosiebestendigheid wordt niet veel van verwacht.

Onzekerheden die als anomalie zijn aangemerkt zijn schaduwwerking van bomen en aanwezigheid van plagen/graverij. Deze leiden vermoedelijk tot een beheersingreep, wanneer deze leiden tot een grasmatt die buiten de toepassingsvoorwaarden valt. Te zien is dat van de relevante ruimtelijke onzekerheden de meesten op kilometerschaal spelen, en verschil in grassoorten/kruiden op kortere schaal. Er is geen duidelijke relatie tussen verschillende soorten en variaties in erosiebestendigheid. Het aandeel hiervan in de sterkteonzekerheid is dus vermoedelijk beperkt. Als laatste zijn er nog niet-ergodische onzekerheden die niet variëren in de ruimte. Een voorbeeld hiervan is modelonzekerheid die vaak deels als niet-ergodisch wordt aangemerkt [4]. Opgemerkt moet worden dat het praktisch lastig is om ruimtelijke variaties in de proevenverzameling die al (deels) in het model zitten te onderscheiden: de gehanteerde kansverdelingen zijn gebaseerd op een regionale proevenverzameling op verschillende plekken in het systeem. De ruimtelijke variatie veroorzaakt dus ook (deels) de variatie in de proevenverzameling. Uit de spreiding van de proeven blijkt wel een behoorlijke variatie, die zeker niet volledig te verklaren valt door ruimtelijke variaties tussen de proeflocaties.

Het precies schatten van de onzekerheidsbijdragen is lastig op basis van de beschikbare gegevens. Voor de analyse gaan we uit van 3 onzekerheidsbijdragen voor de sterkte (U_c en parameter a in de standtijdlijn):

1. niet-ergodische onzekerheid (bijv. modelonzekerheid) met een niet-ergodische correlatie ρ_0
2. ergodische onzekerheid met een correlatielengte $d_{x,1}=2000$ meter (voortvloeiend uit de eerste 4 bijdragen in bovenstaande tabel)
3. ergodische onzekerheid met een correlatielengte $d_{x,2}=200$ meter (voortvloeiend uit de laatste bijdrage in bovenstaande tabel)

2.4 Aannames voor de berekeningen

Een belangrijke basis voor de berekeningen is de invloedscoëfficiënt α van de sterkte. Bij GEKB is de sterkte meegenomen als de kritische frontsnelheid U_c , bij GEBU om parameter a van de standtijdlijn. Uit de probabilistische berekeningen in [1] blijkt dat de gekwadraterde invloedscoëfficiënten van U_c voor GEKB variëren tussen 0.03 en 0.1, en voor GEBU

(parameter a) tussen 0.001 en 0.15. Op systeemniveau is vooral de gemiddelde invloedscoefficiënt van belang. Vervolgens moet deze invloedscoefficiënt worden gesplitst in een invloedscoefficiënt voor elk van de 3 onzekerheidsbijdragen uit de vorige paragraaf. In eerste instantie gaan we uit van de volgende aannames (later volgt nog een beperkte gevoeligheidsanalyse):

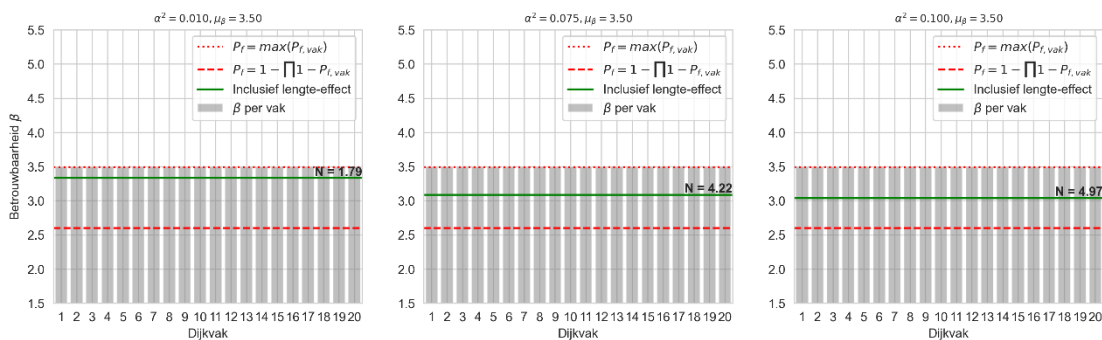
1. De gemiddelde gekwadrateerde invloedscoefficiënt van de sterkte is 0.075. We kijken aanvullend naar $\alpha^2=0.01$ en $\alpha^2=0.1$.
2. De relatieve gewichten van de 3 onzekerheidsbijdragen (w_1, w_2, w_3) zijn respectievelijk 0.5 voor niet-ergodisch, 0.4 voor ergodisch met $d_x=2000$ meter en 0.1 voor ergodisch met $d_x=200$ meter.¹
3. De overige onzekerheden (belasting) zijn volledig gecorreleerd.

We maken analyses met gelijke β voor het hele traject, en met variërende β . In paragraaf 3.1 en 3.2 onderscheiden we niet in verschillende oriëntaties maar kijken we puur naar de invloed van ruimtelijk variabele onzekerheid. Dat komt in 3.3 aan de orde, in 3.4 wordt een gevoeligheidsanalyse van enkele aannames gedaan.

3 Resultaten

3.1 Effectief lengte-effect bij gelijke β

Eerst beschouwen we een dijktraject van 20 dijkvakken van 1 kilometer lang. De β van alle vakken is 3.5. Deze situatie is conceptueel vergelijkbaar met een dijk die recent is versterkt op basis van een doorsnede-eis. Figuur 3-1 geeft de systeembetrouwbaarheid (groene lijn) voor verschillende α^2 van de gecorreleerde sterkteparameter. Te zien is dat zelfs bij een zeer kleine α^2 het effectieve lengte-effect N al bijna 2 bedraagt. Voor $\alpha^2 = 0.1$ loopt dit verder op naar ongeveer 5. De hier getoonde situatie is ongunstig: in dit geval dragen alle dijkvakken evenveel bij aan de kans op falen van het systeem. In werkelijkheid zal een dergelijke situatie niet voorkomen, maar het geeft een indicatie van het effectieve lengte-effect wat maximaal te verwachten is.

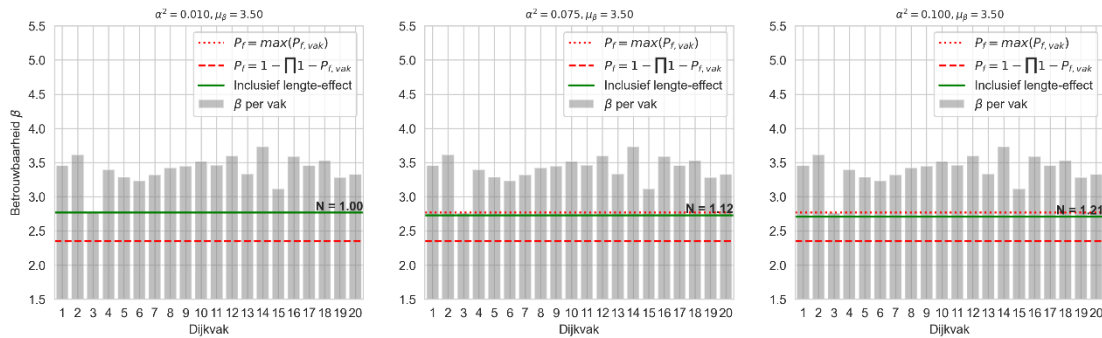


Figuur 3-1 Systeemveiligheid van een dijktraject van 20 vakken met verschillende invloedscoefficienten van de sterkte bij gelijke betrouwbaarheid.

3.2 Effectief lengte-effect bij variërende β

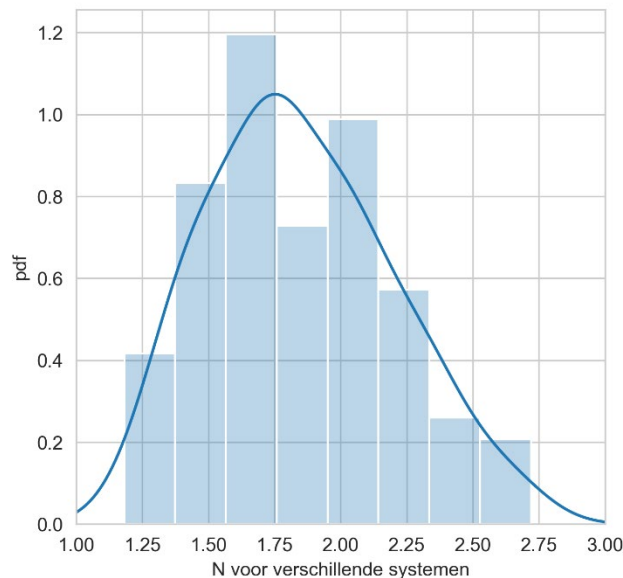
In werkelijkheid zal de betrouwbaarheid variëren per dijkvak, zeker in het geval van een beoordeling. We nemen aan dat de β gemiddeld 3.5 is, met een standaardafwijking van 0.2, en simuleren opnieuw een traject van 20 vakken. Figuur 3-2 geeft een realisatie van een dergelijk systeem, met verschillende α^2 van de sterkte. Duidelijk te zien is dat de effectieve lengte-effect factor veel kleiner wordt en in dit geval dicht bij de 1 ligt. De ruimtelijke variaties in de sterkte hebben dus nauwelijks meer invloed op de systeemveiligheid.

¹ Merk op dat deze bijdrage klein wordt verondersteld. Uiteraard zal, wanneer deze bijdrage groter wordt, ook het effectieve lengte-effect flink kunnen toenemen.



Figuur 3-2 Systeemveiligheid van een dijktraject van 20 vakken met verschillende invloedscoëfficiënten van de sterkte bij verschillende betrouwbaarheidsindices.

Uiteraard hangt in dit geval N sterk af van de precieze systeemconfiguratie (hoeveel zwakke vakken, en welke $\sigma(\beta)$ is aangenomen: in de specifieke trekking van β in Figuur 3-2 speelt het zwakke dijkvak 3 een grote rol. In Figuur 3-3 is een soortgelijke analyse gemaakt voor 100 verschillende systemen (dus honderd trekkingen van β met $\sigma(\beta)=0.2$) voor $\alpha^2=0.075$. Daaruit blijkt dat voor dergelijke systemen N varieert tussen 1.2 en 2.7 (gemiddeld 1.85). Het systeem uit Figuur 3-2 (met $N=1.12$) is dus relatief gunstig, maar in alle gevallen is de N vrij laag.



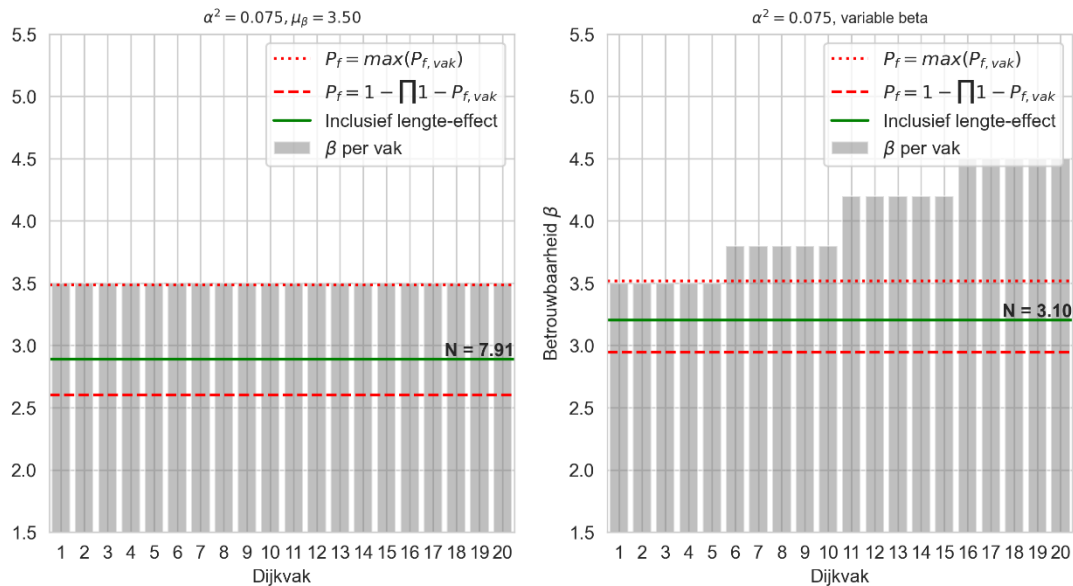
Figuur 3-3 Verdeling van N voor 100 random configuraties van een systeem van 20 dijkvakken.

3.3 Invloed van verschillende relevante windrichtingen

In probabilistische berekeningen in bijvoorbeeld Riskeer wordt de faalkans berekend voor verschillende (16 in totaal windrichtingen). In de praktijk zal bij een storm uit een bepaalde richting slechts een deel van het traject belast worden, en bij een andere windrichting een ander deel. In deze paragraaf beschouwen we dat effect, in combinatie met de eerder geïntroduceerde ruimtelijke variaties in sterkte. Uit analyses in [1] blijkt dat de faalkans voor een gegeven dijkvak grofweg bepaald wordt door een combinatie van 4 van de 16 windrichtingen: de rest leidt niet tot noemenswaardige golfbelasting/is onbelangrijk. We nemen (ongunstig) aan dat het traject een vierkant eiland beschermd, met 4 oriëntaties waarvan falen onafhankelijk is. In dat geval krijgen we, bij gelijke betrouwbaarheid van de 4 delen de linkerfiguur in Figuur 3-4: het lengte-effect wordt dan effectief $N \approx 8$ (een factor 4 door de 4 windrichtingen maal een factor 2 door de variatie in sterkte). In de praktijk zullen echter niet alle stormen uit verschillende richtingen even zwaar zijn, en is de rechterfiguur realistischer: sommige oriëntaties hebben een lage, en sommige een hoge betrouwbaarheid

per vak.² In dat geval geldt dat $N \approx 3$ (NB: uiteraard is dit een illustratieve situatie die sterk kan verschillen en afhangt van de precieze verhouding tussen de windrichtingen). In de praktijk, bijvoorbeeld langs de Vecht wordt de belasting niet volledig gedomineerd door de wind en is onderstaande situatie dus een ongunstig weergave: de grenstoestandsfuncties bij verschillende windrichtingen zijn door de afvoer van de Vecht, die niet afhangt van de windrichting, deels gecorreleerd en dus niet zoals hier aangenomen volledig onafhankelijk.

Betrouwbaarheid van het systeem bij 4 onafhankelijke windrichtingen (geen variatie)

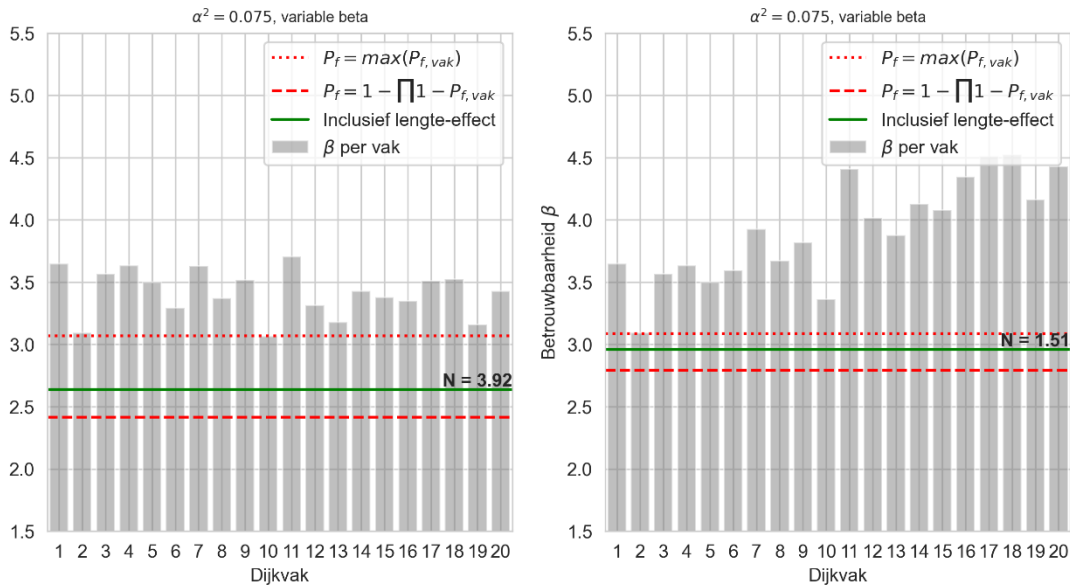


Figuur 3-4 Systeembetrouwbaarheid van een traject met 4 onafhankelijke windrichtingen met per windrichting gelijke (links) en ongelijke betrouwbaarheidsindex (rechts), zonder variatie tussen vakken.

Uiteindelijk geldt dat het effectieve lengte-effect wordt bepaald door een combinatie van variatie in oriëntaties, het relatieve belang van wind en afvoer voor de belasting op de bekleding, en ruimtelijke variaties in sterkteparameters. Wanneer we voor bovenstaande systemen wederom de betrouwbaarheidsindex laten variëren met een standaardafwijking van 0.2 leidt dat tot de situatie in Figuur 3-5 (voor 1 realisatie). Te zien is dat dit het effectieve lengte-effect weer sterk reduceert.

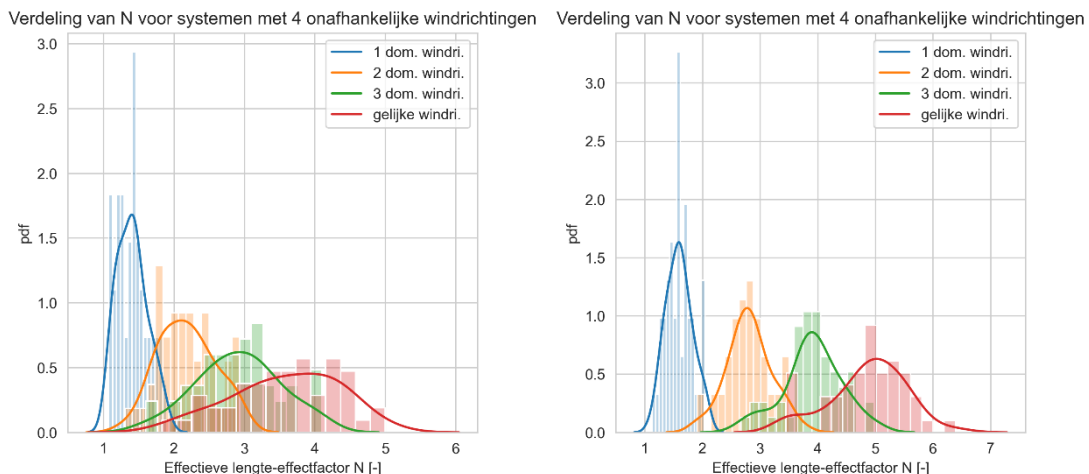
² Merk op dat dit vaak wordt verdisconteerd in de gevoelige strekkinglengte a (zie formule (1))

Betrouwbaarheid van het systeem bij 4 onafhankelijke windrichtingen (met variatie)



Figuur 3-5 Systeembetrouwbaarheid van een traject met 4 onafhankelijke windrichtingen met gelijke (links) en ongelijke (rechts) betrouwbaarheidsindex, met variatie tussen vakken.

In Figuur 3-6 is de spreiding van N weergegeven voor systemen met een verschillend aantal dominante windrichtingen. Daarbij is aangenomen dat de gehele belasting per windrichting onafhankelijk is (dus geen invloed van bijv. afvoer). Daarbij is voor dominante windrichtingen de gemiddelde β gelijk aan 3.5, en voor overige aan 4.5 (dus bijv. bij 1 dominante windrichting 5 vakken met $\beta=3.5$ en 15 met $\beta=4.5$). Te zien is dat de effectieve lengte-effectfactor gemiddeld ongeveer gelijk is aan het aantal dominante windrichtingen wanneer β tussen vakken varieert met een standaardafwijking van 0.2 (linkerfiguur). Een uitzondering is bij 1 dominante windrichting: daar gaat de invloed van ruimtelijke variatie een iets grotere rol spelen ($N \approx 1.5$). Als de standaardafwijking in β kleiner is ($\sigma(\beta)=0.1$) gaan meer vakken bijdragen en neemt het effectieve lengte-effect iets toe. Bij meer dominante windrichtingen neemt ook de spreiding (vooral naar lagere N) toe, omdat er een grotere kans is op een enkele zwakke schakel in het systeem. Opgemerkt moet worden dat de aanname van volledig onafhankelijke windrichtingen, zeker voor het gras op zand areaal erg ongunstig is omdat deze bekledingen zich alleen langs rivieren bevinden en de belasting deels door afvoer (richtingsonafhankelijk), en deels door wind (richtingsafhankelijk) wordt bepaald.

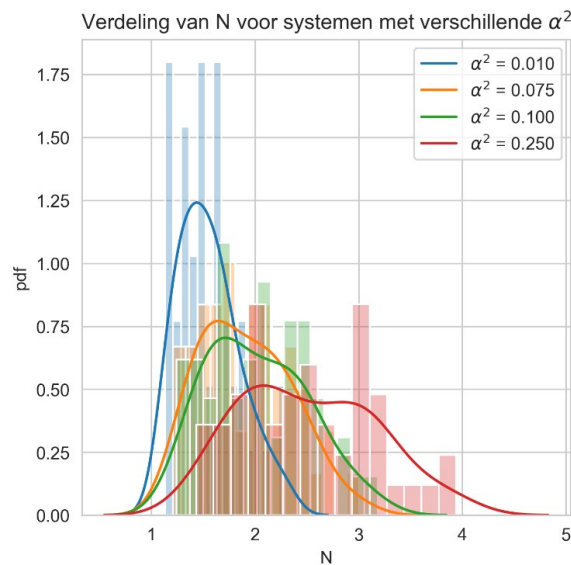


Figuur 3-6 Gevoeligheid van N voor configuraties met verschillende dominantie van windrichtingen. Links voor $\sigma(\beta)=0.2$, rechts voor $\sigma(\beta)=0.1$.

3.4 Gevoeligheidsanalyse

3.4.1 Gevoeligheid voor α^2 van de sterkte

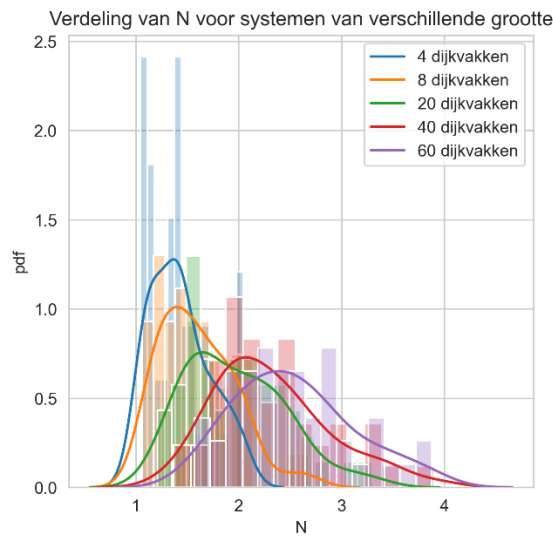
Voor de gevoeligheidsanalyses gebruiken we de configuratie van het systeem rechts in Figuur 3-5: een variërende β , met 4 ongelijk bijdragende windrichtingen (2 relatief dominante). Eerst kijken we naar verschillende onzekerheidsbijdragen van de sterkte. In Figuur 3-7 is te zien dat deze enige invloed heeft op de effectieve lengte-effectfactor, maar dat het effect zelfs voor een onrealistisch hoge gemiddelde α^2 van 0.25 relatief beperkt is. Opgemerkt moet worden dat slechts de helft van het systeem gevoelig is (zie vorige paragraaf).



Figuur 3-7 Gevoeligheid van effectieve lengte-effectfactor N voor verschillende α^2 van de sterkte.

3.4.2 Gevoeligheid voor het aantal vakken

Om beter in beeld te krijgen hoe het aantal vakken de veiligheid beïnvloedt is ook gekeken naar de invloed van het aantal dijkvakken. Daarvoor is het systeem rechts in Figuur 3-5 (4 verschillend bijdragende windrichtingen) geleidelijk groter gemaakt (gelijk verdeeld over de windrichtingen). Daarbij is telkens voor elke windrichting het aantal vakken gelijkmatig verhoogd. Figuur 3-8 geeft histogrammen van de relatie tussen N en systemen met een verschillend aantal vakken. Te zien is dat dit weliswaar enige invloed heeft, maar dat zelfs voor 60 dijkvakken de effectieve lengte-effectfactoren niet groter dan 4 worden. Vermoedelijk is de voornaamste reden hiervan dat het effectieve lengte-effect sterk bepaald wordt door de zwakste schakel, en dat de kans op een 'nog zwakker dijkvak' steeds kleiner wordt.



Figuur 3-8 Invloed van het aantal dijkvakken op de effectieve lengte-effectfactor N .

4 Discussie

Voor GEKB en GEBU bij gras op zanddijken is voorgesteld om dezelfde lengte-effectfactoren te hanteren als bij gras op kleidijken. De lengte-effectfactoren bij gras op klei zijn gebaseerd op relatief eenvoudige inschattingen en gebaseerd op het aantal oriëntaties van het traject. De onderbouwing van deze lengte-effectfactoren is mager, hoewel de ordegrrootte op basis van de analyses in dit memo wel klopt. Een nadeel van de huidige lengte-effectfactoren is dat deze door de beperkte onderbouwing niet erg betekenisvol zijn, en dat er niet echt een handelingsperspectief is om bijvoorbeeld kleinere of grotere factoren te hanteren in een specifieke situatie. Dit is een algemeen aandachtspunt bij de huidige lengte-effectfactoren.

In de analyses is gekeken naar het effectieve lengte-effect voor verschillende systemen van dijkvakken. Het effectieve lengte-effect is een functie van:

1. De variatie in betrouwbaarheid tussen verschillende vakken en de lengte van het dijktraject.
2. Het aantal (onafhankelijke) windrichtingen wat een relevante bijdrage levert aan de systeemfaalkans, en hoe groot die bijdrage is.
3. De ruimtelijke variatie van de sterkte, die wordt beïnvloedt door:
 - De invloedscoefficiënt α van de ruimtelijk variërende sterkte.
 - De mate van correlatie (correlatieafstand) van deze ruimtelijk variërende sterkte.

In dit memo zijn zowel dijktrajecten met variërende als met gelijke betrouwbaarheid per vak beschouwd. Daaruit blijkt dat de variatie in betrouwbaarheid een grote invloed heeft op de effectieve lengte-effectfactoren. Daarbij leidt de keuze voor de spreiding van β binnen een traject tot andere effectieve lengte-effectfactoren: een hogere standaardafwijking leidt tot een minder sterk lengte-effect, een lagere tot een groter lengte-effect. Idealiter wordt deze standaardafwijking nog nader onderbouwd, bijvoorbeeld door te kijken naar bestaande beoordelingsresultaten. Belangrijkste conclusie ten aanzien hiervan is echter dat voor dijktrajecten die recent versterkt zijn de invloed van het lengte-effect groter is dan voor een systeem zoals vaak in de beoordeling beschouwd, met enkele zwakke schakels. In dat opzicht ligt het voor de hand om voor beoordeling en ontwerp andere lengte-effectfactoren te hanteren.

In Figuur 3-6 zijn verdelingen gegeven voor systemen waarbij een verschillend aantal windrichtingen dominant is voor de betrouwbaarheid. Er is een duidelijke relatie te zien tussen

het aantal dominante windrichtingen en de effectieve lengte-effectfactor. Opgemerkt moet worden dat deze analyse er vanuit gaat dat de belasting in het ontwerppunt volledig gedomineerd wordt door de windsnelheid (en dat het lengte-effect dus voor een groot deel door het aantal onafhankelijke windrichtingen wordt bepaald). Dat is zeker voor het gras-op-zand areaal niet van toepassing, omdat hier ook de afvoer van de betreffende rivier een grote rol speelt bij de waterstand (en in het algemeen zijn er geen dijktrajecten met 4 dominante oriëntaties). Daarbij geldt voor GEBU dat falen langs een rivier vooral optreedt bij combinaties van enigszins verhoogde waterstanden, en zeer harde wind. Daar is dus een grotere richtingsafhankelijkheid dan bij GEKB, waar de waterstand ook sterk verhoogd moet zijn en dus de relatieve bijdrage van de windsnelheid vaak wat kleiner zal zijn. Bij GEKB speelt voorts ook nog het onderscheid tussen overloop en overslag, waarbij overloop volledig waterstandsgedreven is, en bij overslag ook de richtingsafhankelijke windsnelheid een rol speelt. Dat maakt dat voor GEBU de grotere bijdrage van verschillende oriëntaties aan het lengte-effect groter is.

De derde belangrijke factor is de ruimtelijke onzekerheid. De onzekerheidsbijdragen die gehanteerd zijn in de analyses zijn ingeschat door betrokken experts. Tegelijkertijd blijkt ook dat bij meerdere onafhankelijke windrichtingen die bijdragen aan de systeemfaalkans de extra bijdrage van de ruimtelijke onzekerheid beperkt is. Deze neemt wel iets toe als de variatie tussen betrouwbaarheid van vakken kleiner wordt. In het algemeen is de verwachting niet dat iets andere inschattingen van de onzekerheidsbijdragen tot hele andere resultaten leiden: uit de gevoeligheidsanalyses blijkt dat een veel grotere invloed van sterkte-onzekerheid, of een veel groter aantal dijkvakken zich maar beperkt door vertaalt in het effectieve lengte-effect.

Tot slot moet worden opgemerkt dat in dit memo lengte-effectfactoren zijn onderbouwd op basis van een aantal simulaties van een gesimplificeerd dijksysteem. Op basis van deze simulaties kan wel een gevoel verkregen worden voor de relatieve bijdrage van verschillende factoren die een rol spelen bij het effectieve lengte-effect van een dijksysteem. Opgemerkt moet worden dat de invloedscoëfficiënten voor de sterkteonzekerheid in probabilistische berekeningen van gras op klei en gras op zand van dezelfde orde grootte zijn. Uiteraard is het ook mogelijk om dit met bijvoorbeeld Hydra-Ring te doen, en daarbij voor een werkelijk traject op correcte wijze ook de precieze relatieve bijdrage van windrichtingen en ruimtelijke onzekerheden mee te nemen.

Samenvattend wordt gevonden dat het lengte-effect voornamelijk wordt bepaald door het aantal onafhankelijke windrichtingen, en dat voor GEBU het effect van de windrichtingen sterker is dan voor GEKB. Het voorstel wat hieruit volgt is om voor GEKB als lengte-effect het aantal onafhankelijke windrichtingen te hanteren en voor GEBU het aantal windrichtingen plus 1.

Binnen bijvoorbeeld het WBI ontbreekt vaak de precieze onderbouwing van de lengte-effectfactoren. Dat beperkt het handelingsperspectief wat er is binnen ontwerp en beoordeling: het is immers lastig te onderbouwen of en waarom een lengte-effectfactor hoger of lager zou moeten zijn. Daarom wordt aanbevolen om dit op een meer gestructureerde manier uit te werken voor de verschillende mechanismen. Dit leidt uiteindelijk tot een bruikbaarere en betekenisvollere invulling van het lengte-effect.

5 Conclusies

In dit memo is met een aantal Monte Carlo simulaties onderzocht wat geschikte lengte-effectfactoren zijn voor GEKB en GEBU bij gras op zanddijken. De precieze onderbouwing van de bestaande lengte-effectfactoren voor gras op klei is lastig te vinden. De algemene indruk is dat bij gras op zand het lengte-effect iets groter is vanwege de iets grotere invloed van sterkte onzekerheid (zie de blauwe verdelingen in Figuur 3-6).

Op basis van de analyses in dit memo leidt gras op zand ten opzicht van gras op klei tot marginaal grotere effectieve lengte-effectfactoren dan nu voor gras op klei worden gebruikt, maar kan voor een beoordeling gebruik gemaakt worden van de bestaande factoren voor gras op klei gezien de beperkte verschillen.

Voor GEBU zijn de factoren voor gras op klei gelijkgesteld aan die voor GEKB. Aangezien zeker in riviersystemen de golfaanval van groter belang is voor GEBU dan GEKB heeft de oriëntatie een wat grotere invloed. Omdat ook de invloed van de ruimtelijke variërende sterkte-eigenschappen iets groter is wordt aanbevolen om hier iets hogere lengte-effectfactoren te hanteren voor gras op zand. Op basis van de resultaten in dit memo wordt daarom aanbevolen om lengte-effectfactor $N_{GEBU}=N_{GEKB}+1$ te stellen. Concreet betekent dit dat de te hanteren lengte-effectfactoren voor GEBU en GEKB 2 en 1 zijn voor traject 53-3, en 3 en 2 voor traject 9-1.

Belangrijk om op te merken is dat de lengte-effectfactoren waarschijnlijk een beperkte invloed hebben op de uiteindelijke beoordeling: de invloed van de keuze tussen een factor 1, 2 of 3 op het veiligheidsoordeel is beperkt. Er moet wel rekening mee worden gehouden dat de hier voorgestelde factoren primair bedoeld zijn voor de beoordeling, en niet voor het ontwerp. Na ontwerp zal de variatie in betrouwbaarheid tussen vakken vermoedelijk kleiner zijn, en dat leidt tot een hogere effectieve lengte-effectfactor.

Geadviseerd wordt om voor gras op kleidijken, en voor andere faalmechanismen de bestaande lengte-effectfactoren tegen het licht te houden en waar nodig nader te onderbouwen om zo tot een bruikbaarere en betekenisvollere invulling van het lengte-effect te komen. Onderdeel daarvan is een nadere onderbouwing van de precieze bijdrage van ruimtelijk variërende onzekerheden op de sterkte. Daarbij wordt ook aanbevolen om onderscheid te maken tussen het lengte-effect bij beoordeling en bij ontwerp, of op meer algemeen niveau dit te koppelen aan de variatie in betrouwbaarheid tussen dijkvakken.

6 Referenties

1. Klerk, W.J.; van Hoven, A.; Wopereis, L. *Rekenwaarden erosieparameters gras op zand bekledingen*; 2021;
2. Kanning, W. *The Weakest Link: Spatial Variability in the Piping Failure Mechanism of Dikes*, TU Delft, Delft University of Technology, 2012.
3. Roscoe, K.; Diermanse, F.; Vrouwenvelder, T. System reliability with correlated components: Accuracy of the Equivalent Planes method. *Struct. Saf.* **2015**, *57*, 53–64, doi:10.1016/j.strusafe.2015.07.006.
4. Wojciechowska, K.A. *Hydra-Ring 19.1 Technical Reference Manual*; 2019;
5. Vanmarcke, E.H. Matrix formulation of reliability analysis and reliability-based design. *Comput. Struct.* **1973**, *3*, 757–770, doi:10.1016/0045-7949(73)90056-4.
6. Klerk, W.J.; Kanning, W.; Kok, M.; Wolfert, R. Optimal planning of flood defence system reinforcements using a greedy search algorithm. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* **2021**, *207*, 107344, doi:10.1016/j.ress.2020.107344.

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