

## Eindadvies beoordeling gras op zandbekledingen

Gras op zand onderzoek product 10



**Eindadvies beoordeling gras op zandbekledingen**  
Gras op zand onderzoek product 10

## Eindadvies beoordeling gras op zandbekledingen




Gras op zand onderzoek product 10

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

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	17-01-2022
<b>Projectnummer</b>	11204369-002
<b>Document ID</b>	11204369-002-GEO-0018
<b>Pagina's</b>	50
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)


Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	A. van Hoven	T. Stoutjesdijk	G. de Vries	
1.0	A. van Hoven 	T. Stoutjesdijk 	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 geleid tot onderbouwde erosieparameters, waarmee gras op zandbekledingen kunnen worden beoordeeld op veiligheid en waarmee scope bepalende berekeningen kunnen worden uitgevoerd voor dijkverbeteringen, zoals voor het project Veilige Vecht. Met de parameters kan worden bepaald waar een gras op zandbekleding vanuit waterveiligheid kan blijven liggen en waar deze niet voldoet en moet worden vervangen.

Het onderzoek heeft onder andere bestaan uit grootschalige erosieproeven op meerdere locaties op de Overijsselse Vechtdijken. Het onderzoek heeft geresulteerd in rekenwaarden van erosieparameters die samen met het huidige beoordelingsinstrumentarium WBI2017 kunnen worden gebruikt om een beoordeling op waterveiligheid uit te voeren voor de primaire mechanismen Gras Erosie Buitentalud (GEBU) in de golfklapzone en Gras Erosie Kruin en Binnentalud (GEKB). Met de rekenwaarden wordt de kans op falen van de grasbekleding berekend (GEKB) en middels een semi-probabilistische berekening geschat (GEBU-golfklap). De beoordeling kan worden uitgevoerd op bestaande gras op zandbekledingen. Het ontwerpen van gras op zandbekledingen wordt afgeraden.

Deze rapportage is het eindproduct (nummer 10) van het onderzoek. Er wordt een korte samenvatting gegeven van de drie fasen van het project en de negen voorgaande rapporten die in het kader van dit project zijn gepubliceerd. Dit geeft de lezer een beeld van de stappen die zijn genomen om te komen tot de gegeven rekenwaarden van de erosieparameters met de toepassingsvoorwaarden. In hoofdstuk 3 wordt de beoordelingsmethode behandeld. In hoofdstukken 4 en 5 worden de impact van dit onderzoek en de consequenties voor beheer en onderhoud toegelicht.

Beoogd wordt om de resultaten van het onderzoek breder toepasbaar te maken dan enkel voor de Overijsselse Vechtdijk. Hiertoe worden in hoofdstuk 6 wijzigingsvoorstellen gegeven voor de Schematiseringshandleiding Grasbekledingen zodat de resultaten een plek kunnen krijgen in het BOI (Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium). Het feitelijk opnemen van het resultaat van deze kennisontwikkeling is geen onderdeel van de scope van dit onderzoek.

Het onderzoek is uitgevoerd met financiering vanuit HWBP KIA (Hoogwater Beschermingsprogramma Kennis & Innovatieagenda) met Waterschap Drents Overijsselse Delta als het uitvoerende waterschap.

# Inhoud

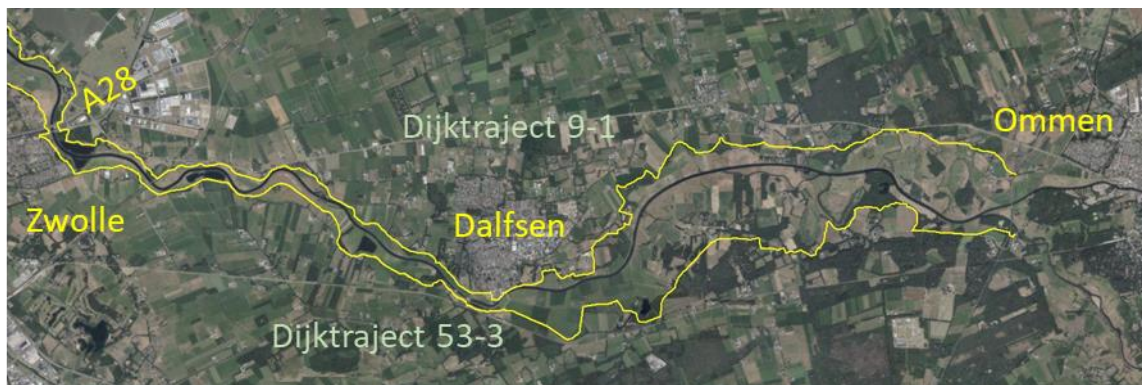
	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>7</b>
1.1	Achtergrond	7
1.2	Leeswijzer	8
1.3	Uitvoerenden	8
1.4	Kwaliteitsborging	8
<b>2</b>	<b>Samenvatting van het onderzoek</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Beoordeling gras op zandbekledingen</b>	<b>11</b>
3.1	Afbakening	11
3.2	Gras erosie kruin en binnentalud GEKB	11
3.2.1	Rekenwaarden	11
3.2.2	Toepassingsvoorwaarden	12
3.3	Gras erosie buitentalud golfklapzone GEBU	12
3.3.1	Rekenwaarden	12
3.3.2	Toepassingsvoorwaarden GEBU	13
3.4	Aanbevelingen bij een toets op maat	13
<b>4</b>	<b>Impactstudie op scope dijkversterking Vechtdijk</b>	<b>15</b>
4.1	Inleiding	15
4.2	GEKB	15
4.2.1	Traject 53-3	15
4.2.2	Traject 9-1	15
4.3	GEBU- Golfklap	16
<b>5</b>	<b>Ervaringen in het project ten aanzien van beheer en onderhoud</b>	<b>18</b>
5.1	Droogte	18
5.2	Risico gestuurd beheer en onderhoud	19
5.3	Aanvulmateriaal bij reparatie schades	19
<b>6</b>	<b>Implementatie in het BOI</b>	<b>21</b>
<b>7</b>	<b>Referenties</b>	<b>22</b>
<b>A</b>	<b>Substraat en bodemontwikkeling</b>	<b>23</b>
<b>B</b>	<b>Ervaringen met graverij</b>	<b>30</b>
B.1	Muizen en mollen	30
B.2	Grotere graverij	30
<b>C</b>	<b>Voorstel aanpassingen en toevoegingen veiligheidsbeoordeling gras op zand in het BOI</b>	<b>35</b>

<b>D</b>	<b>Samenvatting van het onderzoek naar gras op zandbekledingen</b>	<b>39</b>
D.1	Fase 1 Vooronderzoek	39
D.1.1	P1 Stand van zaken kennis gras op zand	39
D.1.2	P2 Relevantiestudie	39
D.1.3	P3 Vegetatie en bodem eigenschappen	41
D.1.4	P4 Locatiekeuze grootschalige proeven en proefprogramma	42
D.2	Fase 2 Grootschalige erosieproeven	44
D.2.1	P6 Factual report	44
D.2.2	P7 Wortelonderzoek	46
D.3	Fase 3 Analyse	46
D.3.1	P8 Analyse	46
D.3.2	P9 Kalibratie	49

# 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 de twijfel aan de veiligheid is de grasbekleding die direct op zand wortelt. Hiervoor zijn in het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017 geen modellen beschikbaar. De kennis ontbrak om de faalkans van een grasbekleding op zand te bepalen, hetgeen leidt tot een grote onzekerheid in de scope van de dijkversterking.



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

Voorafgaand aan de scopebepaling van de dijkversterking is in de periode tot en met december 2021 onderzoek gedaan naar de erosiebestendigheid van de gras op zand. De resultaten van het onderzoek hebben geleid tot een onderbouwing van erosieparameters van gras op zandbekledingen. Het projectgebied ligt tussen de kruising met de A28 in het westen tot het einde van de dijktrajecten bij Ommen in het oosten. Beoogd wordt tevens om de resultaten van het onderzoek breder toepasbaar te maken voor de beoordeling van andere dijken met een gras op zandbekleding. Hiertoe wordt een voorstel gedaan om het resultaat van de kennisontwikkeling op te nemen in het BOI (Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium). De ontwikkelde kennis vindt zijn toepassing in het beoordelen van gras op zandbekledingen. Het ontwerpen van gras op zandbekledingen wordt afgeraden.

Het onderzoek heeft grofweg bestaan 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. De voorstudie is in het winterseizoen 2020-2021.
2. Grootchalige erosieproeven met de golfklapgenerator en de golfploopsimulator, die werd ingezet als golfoverslagsimulator.
3. Worden de resultaten van de proeven en de karakterisering van de dijk gebruikt om rekenwaarden van de erosieparameters af te leiden. Deze rekenwaarden zijn nodig om de scope van de dijkversterking goed onderbouwd te bepalen.

## 1.2 Leeswijzer

Dit rapport betreft het eindrapport van het onderzoek (Product 10). Het bevat een korte samenvatting van het onderzoek om de lezer een beeld te geven van de uitgevoerde stappen (Hoofdstuk 2 en Bijlage D) om te komen tot de rekenwaarden van erosieparameters en toepassingsvoorwaarden (hoofdstuk 3). In hoofdstuk 4 wordt ingegaan op de mogelijke impact van de resultaten van het onderzoek op de dijkverbetering van de Vechtdijken. Hoofdstuk 5 bevat een handreiking voor beheer en onderhoudsaspecten voor gras op zandbekledingen en tenslotte wordt in Hoofdstuk 6 een voorstel gedaan voor wijzigingen in de Schematiseringshandleiding Grasbekledingen (SH Gras) om de resultaten mee te kunnen nemen in het BOI voor een bredere toepassing dan enkel voor de Overijsselse Vechtdijk.

## 1.3 Uitvoerenden

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 Kwaliteitsborging

De kwaliteitsborging van het onderzoek heeft bestaan uit meerdere stappen. Rapporten hebben de interne kwaliteitsborging van de opstellende partij doorlopen en ook de projectgroep heeft alle rapporten gereviewd.

Daarnaast zijn door de opdrachtgever Waterschap Drents Overijsselse Delta een klankbordgroep en een reviewteam opgericht die met name de laatste rapporten met de analyse van de grootschalige erosieproeven (P8 [8]) en de afleiding van rekenwaarden (P9 [9]) hebben gereviewd.

ENW is gedurende het project geïnformeerd en de eindproducten zijn gepresenteerd aan ENW werkgroep techniek. Het eindadvies van ENW is ten tijde van verschijnen van dit rapport nog niet beschikbaar.



## 2 Samenvatting van het onderzoek

De aanpak van het onderzoek is beschreven in het Plan van Aanpak [1]. In het plan van aanpak staan de volgende onderzoeksvragen (in iets gewijzigde vorm):

- 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 a, b en c in de standtijdlijn in de methode voor golfklappen op gras op zanddijken?
- Wat is, voor golfoverslag, de kansverdeling van  $U_c$  voor grasbekledingen op kruin en binnentalud (GEKB) op zanddijken?

Voor de toepassing in Riskeer is de kansverdeling van  $U_c$  omgezet naar een kansverdeling van het kritisch golfoverslagdebiet  $q_c$  (l/s per 'm).

Om deze vragen te beantwoorden is onderzoek uitgevoerd dat grofweg heeft bestaan uit drie fasen:

1. Een vooronderzoek.
2. Grootschalige erosieproeven op de Vechtdijk.
3. De analyse van de grootschalige proeven en het bepalen van rekenwaarden van erosieparameters.

In het kader van het onderzoek zijn tien rapporten (producten; P) opgesteld:

### Fase 1 vooronderzoek

- P1 Rapportage stand van zaken kennis over erosiebestendigheid grasbekledingen bij aanvang van het onderzoek [2].
- P2 Rapportage relevantieonderzoek. Onderzoek of andere faalmechanismen dominant worden ten opzichte van erosie van de grasmat, waardoor de kennisontwikkeling gras op zand minder relevant of irrelevant wordt voor (delen van) de Vechtdijk [3].
- P3 Rapportage ruimtelijke variabiliteit van de grasbekleding op de Vechtdijk [4]:
  - Vegetatieonderzoek.
  - Substraatonderzoek.
- P4 Rapportage keuze proeflocaties en predictie [5]:
  - Grastrekproeven.
  - Keuze proeflocaties.
  - Opzet proefprogramma.
  - Predictie erosiegedrag op basis van stand van zaken kennis (P1).
- P5 Draaiboek grootschalige proeven.

### Fase 2 Grootschalige proeven winterseizoen 2020/2021

- P6 Factual report grootschalige proeven [6].
- P7 Rapportage wortelonderzoek [7].

### Fase 3 Afleiding rekenwaarden erosieparameters

- P8 Rapportage analyse proefresultaten: [8].
  - Analyse grootschalige proeven Vechtdijk (2020/2021), met in acht name van de resultaten van eerdere proeven op de Vechtdijk (2010) en de proeven bij Zwolle – Olst (2020).
  - Voorstel karakterisering erosiebestendigheid van de grasmat met behulp van verdelingen van erosieparameters ten behoeve van de kalibratie.

- P9 Rapportage afleiding rekenwaarden erosiebestendigheidsparemeters [9]:
- Kalibratiestudie, afleiding rekenwaarden erosiebestendigheidsparemeters gras op zand in golfklapzone, voor semi-probabilistisch ontwerp en beoordeling van de erosiebestendigheid van de grasbekleding op het buitentalud.
  - Kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet voor probabilistisch ontwerp en beoordeling van de erosiebestendigheid van de grasbekleding op de kruin en het binnentalud.
- P10 Eindadvies rekenwaarden erosiebestendigheidsparemeters gras op zand (dit rapport).

In Bijlage D wordt een korte samenvatting gegeven van de bevindingen en conclusies uit de verschillende rapporten per fase. De verwijzingen per fase en product zijn opgenomen in bovenstaande lijst en zijn verder niet herhaald.

## 3 Beoordeling gras op zandbekledingen

### 3.1 Afbakening

Het onderzoek heeft zich gericht op de beoordeling van bestaande gras op zandbekledingen, niet op het ontwerp van nieuwe gras op zandbekledingen. Uit het onderzoek blijkt dat door bodemvormende processen er een situatie ontstaat, waarin bij gras op zand tot een diepte van 0,3 à 0,4 m de combinatie van wortels en het substraat een redelijke erosiebestendigheid heeft. De vorming hiervan heeft tijd nodig. Vanwege de onzekerheid over de ontwikkeling van een dergelijke bodem wordt het ontwerp van gras op zandbekledingen afgeraden.

Het onderzoek is met name bedoeld voor de beoordeling van primaire waterkeringen, echter er zullen ook regionale keringen zijn met een gras op zandbekleding. Elementen van de kennisontwikkeling kunnen worden gebruikt voor de beoordeling van regionale keringen, echter hierbij moet worden gekeken in hoeverre de belasting (duur), sterkte en het veiligheidsformat bij regionale keringen afwijkend is en er daarom een afwijkende aanpak nodig is.

De in dit onderzoek bepaalde erosieparameters, zoals gegeven in paragraaf 3.2 en 3.3, voorspellen de kans op falen van de grasbekleding door golfoverslag en door golfklappen. Falen van de grasbekleding is, net als voor gras op klei, gedefinieerd als een doorbraak van de toplaag. De toplaag bij een gras op zandbekleding heeft een dikte van ongeveer 0,3 à 0,4 m en bestaat uit een zodelaag van circa 0,1 m dikte en een hieronder gelegen doorwortelde laag waarin de combinatie van wortels en substraat samenhang vertoont onder golfoverslag en golfklapcondities. Onder de toplaag bevindt zich los zand, dat makkelijk wegspoelt (zie Bijlage D, paragraaf D.2). Reststerkte van de onderlagen viel buiten de scope van dit onderzoek. Voor golfklapbelastingen die lager op het buitentalud leiden tot falen van de gras op zandbekleding kan de sterkte van de dijken echter wel van belang zijn in de kans op een overstroming [3].

### 3.2 Gras erosie kruin en binnentalud GEKB

#### 3.2.1 Rekenwaarden

Voor de beoordeling van het mechanisme gras erosie kruin en binnentalud wordt voor gras op zand, net als voor gras op klei, gebruik gemaakt van een lognormale kansverdeling van het kritisch golfoverslagdebiet  $q_c$  (l/s per 'm). Voor gras op zandbekledingen wordt geadviseerd om gebruik te maken van de waarden in Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Rekenwaarden parameters lognormale kansverdeling van het kritisch golfoverslagdebiet voor gras op zandbekledingen

$H_{mo}$ (m)	$\mu$ (l/s per 'm)	$\sigma$ (l/s per 'm)
0-0,4	280	380
0,4-0,8	16	12
0,8-1,5	11	7

Net als gebruikelijk voor gras op klei zal op basis van kennis met betrekking tot de te beoordelen waterkering een inschatting worden gedaan voor een golfhoogteklasse, waarna met Riskeer kan worden bepaald of dit de juiste keuze was. Voor de achtergrond van deze verdelingen wordt verwezen naar [8] en [9].

In het kader van een toets op maat kan direct gebruik worden gemaakt van het erosiemodel voor grasbekledingen: de cumulatieve overbelastingmethode. Dat model gebruikt de

kansverdeling van de kritische frontsnelheid  $U_c$  (m/s). Op basis van het uitgevoerde onderzoek wordt aanbevolen om voor de kritische frontsnelheid uit te gaan van een normale verdeling met een gemiddelde van 5,5 m/s en een standaardafwijking van 1,0 (m/s) [9]. Bij toepassing van dit model wordt gekeken naar een kritische waarde van de overbelasting van 7000 ( $m^2/s^2$ ).

Voor de beoordeling op veiligheid wordt gebruik gemaakt van een lengte-effect factor, zoals gegeven in [10]. Uit onderhavig onderzoek is gebleken dat de lengte-effectfactor voor gras op zandbekledingen voor het mechanisme GEKB gelijk kan worden gekozen als die voor gras op kleibekledingen [9].

### 3.2.2 Toepassingsvoorwaarden

Voor het gebruik van de rekenwaarden voor de erosiebestendigheid bij golfoverslag gelden de volgende toepassingsvoorwaarden:

- Met een gras op zandbekleding wordt bedoeld een grasbekleding die wortelt op een substraat van zand. Het onderscheid tussen zand en klei wordt beschreven in de NEN-EN-ISO 14688. Deze norm vervangt de NEN 5104.
- Het substraat zand en de bodemontwikkeling van het substraat moeten vergelijkbaar zijn met die beschouwd zijn in het kader van dit project. Of dit het geval is kan worden bepaald door een bodemkundige. Informatie hierover en een handreiking voor nader onderzoek hiernaar is opgenomen in Bijlage A.
- De kwaliteit van de vegetatie voldoet aan de gestelde voorwaarden voor een gesloten zode, conform het WBI 2017 [10].
- In de rekenwaarden van de kansverdeling van het kritisch golfoverslagdebiet en die van de kritische frontsnelheid is het effect van een (fiets)pad op de kruin verdisconteerd. De invloed hiervan op de erosiebestendigheid hoeft niet apart in rekening te worden gebracht. Voorwaarde is dat de grasbekleding netjes aansluit op de verharding. Dit betekent dat de gesloten zode tot aan de verharding gekarakteriseerd kan worden als gesloten. Het wortelnetje blijft dicht gewoven tot aan de overgang en sluit hierop aan.
- Graverij door muizen en mollen is meegenomen in de rekenwaarden van de erosiebestendigheid.  
Vanwege de beperkte ervaring met grotere graverij (konijnen, vossen, honden en groter) bij golfoverslagproeven zijn deze uitgesloten bij de bepaling van de  $U_c$ . Ervaringen met de invloed van grotere graverij worden gegeven in Bijlage B.

## 3.3 Gras erosie buitentalud golfklapzone GEBU

### 3.3.1 Rekenwaarden

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 parameters uit Tabel 3.2. Voor de achtergrond van deze rekenwaarden wordt verwezen naar [8] en [9]. De parameters a, b en c bepalen de ligging van de standtijdlijn, waarmee de standtijd van de grasbekleding tegen een golfaanval wordt voorspeld. De standtijdlijn voor deze rekenwaarden wordt in grafiekvorm gegeven in Bijlage D.3.

Tabel 3.2 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

Voor de beoordeling op veiligheid wordt gebruik gemaakt van een lengte-effect factor, zoals gegeven in [10]. Uit onderhavig onderzoek is gebleken dat de lengte-effectfactor voor gras op zandbekledingen voor het mechanisme GEBU-golfklap met één moet worden opgehoogd ten opzichte van de waarde voor gras op kleibekledingen [9]. Afhankelijk van het traject bedraagt de lengte-effectfactor voor gras op kleibekledingen momenteel 1, 2 of 3. Dat wordt voor gras op zandbekledingen voor het mechanisme GEBU-golfklap respectievelijk 2, 3 of 4.

### 3.3.2 Toepassingsvoorwaarden GEBU

Voor het gebruik van de rekenwaarden voor de erosiebestendigheid bij golfklappen gelden de volgende toepassingsvoorwaarden:

- Met een gras op zandbekleding wordt bedoeld een grasbekleding die wortelt op een substraat van zand. Het onderscheid tussen zand en klei wordt beschreven in de NEN-EN-ISO 14688. Deze norm vervangt de NEN 5104.
- Het substraat zand en de bodemontwikkeling van het substraat moeten vergelijkbaar zijn met die beschouwd zijn in het kader van dit project. Of dit het geval is kan worden bepaald door een bodemkundige. Informatie hierover en een handreiking voor nader onderzoek hiernaar is opgenomen in Bijlage A.
- De kwaliteit van de vegetatie voldoet aan de gestelde voorwaarden voor een gesloten zode, conform het WBI 2017 [10].
- Graverij door muizen en mollen wordt verondersteld te zijn verdisconteerd in de rekenwaarden van de erosiebestendigheid. Grotere graverij zal waarschijnlijk leiden tot aanzienlijk kortere standtijden en is niet meegenomen in de gegeven rekenwaarden.

## 3.4 Aanbevelingen bij een toets op maat

Binnen een toets op maat is het mogelijk om voor het primaire mechanisme GEKB direct gebruik te maken van de cumulatieve overbelastingmethode. In veel gevallen, maar niet altijd, zal dit een scherper oordeel geven dan Riskeer in combinatie met de kansverdeling van het kritisch golfoverslagdebiet. Informatie hierover kan worden ingewonnen bij [www.helpdeskwater.nl](http://www.helpdeskwater.nl).

Bij de beoordeling op het primaire mechanisme GEBU- golfklap zijn het stormverloop en belastingduur belangrijk: 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 onderbouwing van de keuze voor een bepaald stormverloop. Wanneer een ander stormverloop wordt gehanteerd dan de hier beschouwde 'constante storm' van 12 uur, wordt 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 de faalkansen voor GEBU golfklap voor de Vechtdijk erg groot zijn. Opgemerkt moet worden dat het een relatief eenvoudige ontwikkeling is om GEBU – golfklap probabilistisch te beschouwen, al dan niet in samenhang met GEKB. Zeker het in samenhang beschouwen van beide mechanismen kan leiden tot een scherper oordeel en doelmatigere bepaling van de veiligheidsopgave.

Met de hier gehanteerde beoordelingsmethode worden net als voor gras op klei geen overstromingskansen uitgerekend maar enkel de faalkansen van de toplaag van de bekleding.

Uit enkele verkennende analyses bleek dat het dijklichaam, zeker omdat de grootste golven laag op het talud inslaan, reststerkte heeft. Daarom wordt geadviseerd te verkennen of reststerkte meegenomen kan worden, waarbij wel de kanttekening wordt gemaakt dat stroming in de Vecht het erosieproces kan versnellen.

## 4 Impactstudie op scope dijkversterking Vechtdijk

### 4.1 Inleiding

De grootste winst van het onderzoek Gras op zand is dat er nu een onderbouwing beschikbaar is van de erosiebestendigheid van de gras op zandbekledingen op de Vechtdijken. Dit betekent dat met de resultaten van het onderzoek onderbouwd kan worden waar de gras op zandbekleding echt moet worden vervangen en waar de bekleding buiten de scope van de dijkverbetering kan worden gehouden.

Gesteld zou kunnen worden dat zonder deze onderbouwing bij gebrek aan inzicht over de erosiebestendigheid de gehele gras op zandbekleding zou moeten worden vervangen, met uitzondering van plekken waar de belasting zeer laag is en de bekleding zelfs bij een heel lage sterkte evident veilig is. Uit de aan het begin van het onderzoek uitgevoerde relevantiestudie [3] bleek een dergelijke lage belasting niet voor te komen voor het buitentalud. Voor het binnentalud voldoet circa 40% van de steekproef niet aan die voorwaarde.

Om hoeveel kilometer van de gras op zandbekleding het werkelijk gaat zal echter nog moeten blijken. Daarvoor zijn zowel de sterkte als de (ontwerp)belasting nodig. Het onderzoek naar gras op zandbekledingen heeft zich alleen gericht op de sterkte, terwijl parallel hieraan onderzoek is gedaan naar de belasting. De resultaten van het belastingonderzoek zijn inmiddels bekend, maar niet meer betrokken bij deze studie. Om toch een idee te krijgen welke kant het op gaat is gebruik gemaakt van de hydraulische belasting zoals toegepast voor de wettelijke veiligheidsbeoordeling, uitgaande van de signaleringswaarde van de doorsnede-eis. De resultaten zijn voor de mechanismen GEKB en GEBU-Golfklap weergegeven in de paragrafen 4.2 en 4.3.

### 4.2 GEKB

Aan het begin van het onderzoek zijn in het kader van de relevantiestudie [3] met Riskeer voor 36 profielen langs de Vecht GEKB berekeningen uitgevoerd. Als eerste schatting van de erosiebestendigheid, zonder onderbouwing, is uitgegaan van een deterministisch kritisch golfoverslagdebiet van 1 l/s per 'm. Er is gekeken naar de signaleringswaarde van de doorsnede-eis voor GEKB en er is gebruik gemaakt van de hydraulische databases voor de wettelijke veiligheidsbeoordeling.

De Riskeerberekeningen zijn herhaald met de kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet die zijn afgeleid in het kader van het gras op zand onderzoek [9]. Daar waar nodig is de kansverdeling veranderd naar die van een passender golfhoogteklasse.

#### 4.2.1 Traject 53-3

Uit de berekeningsresultaten volgt dat bij een kritisch golfoverslagdebiet van 1 l/s per 'm 75% van de steekproef van 19 profielen voldoet aan de signaleringswaarde. Indien de resultaten van het gras op zand onderzoek worden toegepast dan voldoen alle profielen (100%). Hierbij wordt opgemerkt dat bij 3 van de 19 profielen overloop maatgevend is en bij de rest golfoverslag. De indicatieve significante golfhoogte varieert van circa 0,2 m tot 0,65 m.

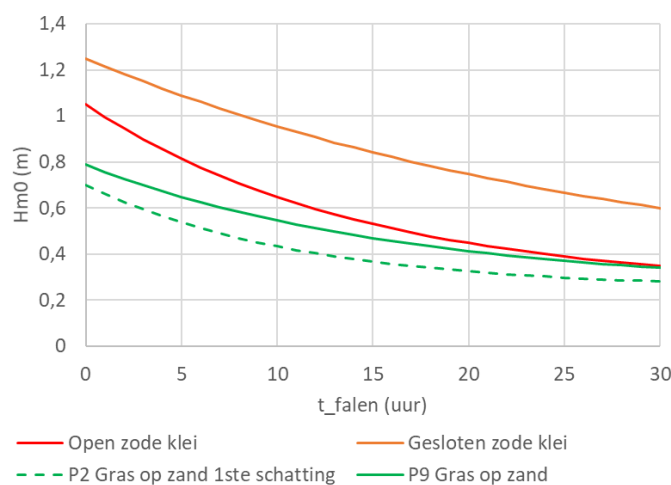
#### 4.2.2 Traject 9-1

Voor traject 9-1 volgt dat bij een kritisch golfoverslagdebiet van 1 l/s per 'm 40% van de steekproef van 17 profielen voldoet aan de signaleringswaarde. Indien de resultaten van het gras op zand onderzoek worden toegepast dan voldoen 16 van de 17 profielen (95%). Bij alle profielen is golfoverslag maatgevend boven overloop. De indicatieve significante golfhoogte is circa 0,15 m tot 0,4 m.

De resultaten laten een gunstig beeld zien. Gezien over het totaal van 36 profielen, zowel in traject 53-3 als in 9-1 blijkt met de nieuw afgeleide kansverdelingen maar 1 profiel niet te voldoen aan de signaleringswaarde van de wettelijke veiligheidsbeoordeling. Nogmaals wordt opgemerkt dat voor de werkelijke invloed op de scope van de dijkverbetering van de Vechtdijk moet worden gerekend met de nieuwe hydraulische databases voor het ontwerp. De gepresenteerde resultaten zijn dus indicatief.

### 4.3 GEBU- Golfklap

In het kader van de relevantiestudie [3], zijn enkele proefresultaten van golfklapproeven op gras op zandbekledingen uit het verleden gebundeld en is een eerste inschatting gemaakt van een mogelijke standtijdlijn. Na uitvoering van drie aanvullende golfklapproeven op de Vechtdijk en de kalibratiestudie is de uiteindelijke standtijdlijn voor gras op zandbekledingen opgesteld [9]. De standtijdlijnen zijn in Figuur 4-1 gezet, samen met de lijnen voor een gesloten en een open zode op klei.



Figuur 4-1 Standtijdlijnen voor een gesloten en een open zode op klei, de eerste inschatting voor gras op zandbekledingen [3] en de uiteindelijke lijn voor gras op zandbekledingen [9]

De waterstand op het grootste deel van de Overijsselse Vecht oostelijk van de kruising met de A28 wordt gedomineerd door een hoge afvoer. Hiervoor wordt momenteel een rekenwaarde voor de duur van de golfklapbelasting aangehouden van 12 uur. Voor de verschillende bekledingen zijn bij deze gegeven belastingduur de kritieke  $H_{m0}$  berekend (Tabel 4.1).

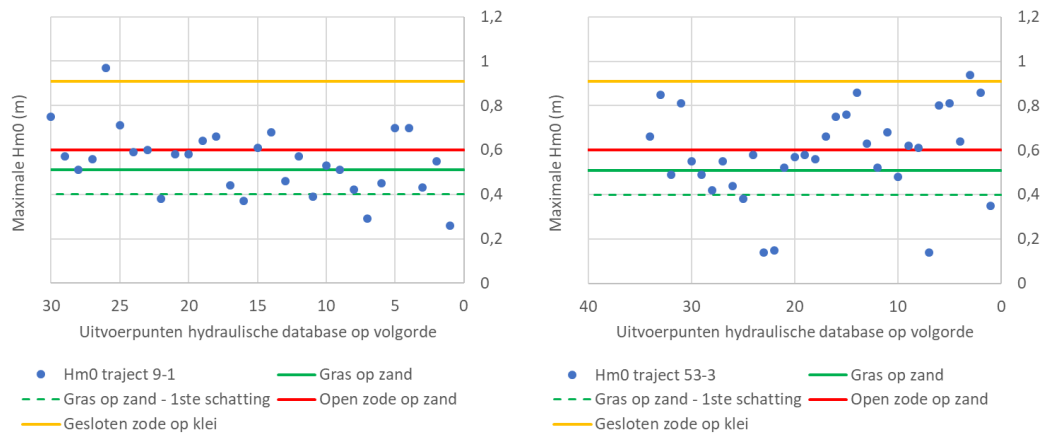
Tabel 4.1 Kritieke waarden  $H_{m0}$  (m) voor verschillende scenario's bij een belastingduur van 12 uur

Scenario	Kritieke $H_{m0}$ (m)
Gras op zand – 2019	niet beschikbaar
Gras op zand – eerste schatting [ref P2]	0,40
Gras op zand	0,51
Open zode op klei	0,60
Gesloten zode op klei	0,90

In het kader van [3] zijn voor een aantal punten langs de Vechtdijk golfrandvoorwaarden berekend met Hydra-NL. Hierbij is gebruik gemaakt van de hydraulische databases voor de veiligheidsbeoordeling en is gekeken naar de kans bij de signaleringswaarde van de doorsnede-eis voor GEBU. Er is rekening gehouden met de hoek van golfinval. Er is gekeken naar zowel traject 53-3 zuidelijk van de Vecht en traject 9-1 noordelijk van de Vecht. De golfrandvoorwaarden worden per locatie berekend op verschillende hoogtes. Omdat langs de



Vecht het hele buitentalud is voorzien van een grasbekleding is de maximale golfhoogte per locatie maatgevend. Uit de berekeningen blijkt dat de maximale golfhoogte per locatie laag op het talud optreedt. Bij hoge waterstanden wordt de rekenwaarde van de golfhoogte lager, wat duidt op een waterstand die niet gecorreleerd is met het optreden van stormcondities. Deze maximale golfhoogtes per locatie staan in Figuur 4-2, evenals de grenswaarden van de kritische golfhoogtes bij de verschillende bekleding scenario's uit Tabel 4.1.



*Figuur 4-2 Maximale golfhoogtes op tracht 9-1 (links) en 53-3 (rechts) bij de doorsnede-eis voor GEBU en de kritieke golfhoogtes bij een standtijd van 12 uur voor verschillende bekleding scenario's*

Voor aanvang van het onderzoek naar gras op zandbekledingen kon geen sterkte aan de bekleding in de golfklapzone worden toegekend. Een eerste grove schatting aan het begin van het onderzoek leidde tot een schatting dat ongeveer 15% van de gras op zandbekleding zou voldoen. Na uitvoering van het onderzoek leidt een onderbouwde standtijdlijn ertoe dat ongeveer één derde van de steekproef, zowel langs traject 53-3 als 9-1, de gras op zandbekleding voldoet aan de categorie IIv grens, ofwel aan de doorsnede-eis signaleringswaarde. Uit de resultaten blijkt verder dat bij een gesloten zode op klei de verwachting is dat vrijwel het hele areaal zou voldoen.

Naast de winst van het beschikbaar komen van een onderbouwing van de erosiebestendigheid van een gras op zandbekleding, leidt het onderzoek, indicatief, tot het kunnen handhaven van een grasbekleding op het buitentalud op mogelijk enkele 10-tallen procenten van de eerder afgekeurde lengte. Hierbij wordt nogmaals opgemerkt dat voor de scope bepalende berekeningen voor de Vechtdijk gebruik zal worden gemaakt van aangepaste hydraulische (ontwerp)databases. De resultaten geven dus enkel een indicatie van de impact van het onderzoek.

## 5 Ervaringen in het project ten aanzien van beheer en onderhoud

### 5.1 Droogte

Gras op zandbekledingen zijn gevoeliger voor droogte dan grasbekledingen op een substraat van klei. In 2018 is door droogte op ruim 6 km van de zuidelijk georiënteerde taluds van de Vechtdijk de vegetatie afgestorven. Het betrof zowel strekkingen van het buitentalud van de noordelijke Vechtdijk als binnentaluds van de zuidelijke Vechtdijk. Over een groter deel van de zuidelijke taluds was de vegetatie aangetast, maar niet dood. Ook 2019 was aan de droge kant en aan het begin van het gras op zandproject (voorjaar 2020) en tijdens de grootschalige proeven in het winterseizoen van 2020-2021 was de vegetatie op deze plekken nog herstellende.

Binnen het gras op zandproject is afgesproken om de strekkingen met een in 2018 door droogte afgestorven vegetatie buiten de scope te houden. Op deze strekkingen zit nog wel het (dode) wortelnet van de afgestorven vegetatie en nieuwe plantjes beginnen weer te groeien, maar de indruk was dat deze bekleding nog zeer kwetsbaar en erosiegevoelig zou zijn. De strekkingen met een aangetaste vegetatie (niet afgestorven) zijn wel meegenomen in het project en ook grootschalig beproefd. Dit waren taluds met relatief veel open plekken (lage bedekking) en een relatief hoog aandeel kruiden ten opzichte van grassen (bijvoorbeeld smalle weegbree en duizendblad). Uit het onderzoek blijkt dat een lage bedekking in het najaar indicatief is voor een lagere erosiebestendigheid, maar dat de erosiebestendigheid niet heel slecht hoeft te zijn [9].

Er wordt vanuit gegaan dat extreme droogte, zoals opgetreden in 2018, incidenteel kan voorkomen. Volgens [11] en [12] was de kans op een droogte zoals in 2018 ongeveer 1/30 jaar voor de omgeving van de Overijssels Vechtdijk. Voor schade door incidentele droogte (of andere oorzaken) zijn bij het waterschap omvangrijke noodmaatregelen in de vorm van kilometers aan krammatten beschikbaar. Deze kunnen worden ingezet bij een combinatie van een dreigend hoog water en/ of hoge golven en een beschadigde of afgestorven vegetatie. Het op voorhand aanbrengen van de krammatten op een beschadigde of dode vegetatie, zonder dreiging van hoogwater, wordt afgeraden omdat dat het natuurlijk herstel van de bekleding belemmert. Van belang is dat wanneer door middel van noodmaatregelen de veiligheid moet worden gewaarborgd, in acht moet worden genomen dat er voor een hoogwater slechts beperkte tijd beschikbaar is, en de capaciteit toereikend moet zijn om op alle bekledingdelen met dode of beschadigde vegetatie tijdig krammatten aan te brengen. Hierbij is een mogelijke verbetering om op basis van het veiligheidsoordeel risicogestuurd de beschadigde dijkvakken te prioriteren (zie ook [3]).

Naast het voorhanden hebben van de noodmaatregelen worden momenteel bemestingsproeven uitgevoerd, waarmee wordt beoogd om de gras op zandbekledingen in de loop der tijd robuuster te maken tegen droogte. Door jarenlang maai- en afvoerbeleid is de bodem soms dermate verschaald dat herstel van de vegetatie na de droogte moeizaam verliep. Door een toename van het organisch stofgehalte in de bodem zal naar verwachting het vocht beter kunnen worden vasthouden wat de vegetatie ten goede komt.

Fotomateriaal van grasbekledingen tijdens de droogte van 2018 en herstellend in het najaar, ook die van de Vechtdijk, is te vinden op <https://handreikinggrasbekleding.nl/> van Stowa (Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer).

## 5.2 Risico gestuurd beheer en onderhoud

In het kader van het gras op zand onderzoek is gekeken naar risico gestuurd beheer en onderhoud. Hierbij wordt specifiek gekeken naar de invloed van verschillende schades aan de bekleding op de overstromingskans, waarbij inspecties, beheer en onderhoud, reparaties, ontwerpaspecten en crisismangement mogelijkheden bieden om als beheerder 'in controle' te zijn. De algemene aanpak van risico gestuurd beheer en onderhoud van dijkbekledingen is beschreven en de gras op zandbekleding langs de Vechtdijk is als case uitgewerkt. Deze analyse is gerapporteerd in hoofdstuk 4 van [8] en bijlage D van [8]. De ervaringen van de beheerder van de Vechtdijk zijn hierin meegenomen. Deze paragraaf bevat in het kort enkele bevindingen die specifiek voor gras op zandbekledingen van belang kunnen zijn.

Een overstroming geïnitieerd door schade aan een gras op zandbekleding kan alleen optreden als na falen van de bekleding ook de dijk zelf erodeert en er een bres ontstaat. Voor het binnentalud wordt verwacht dat een combinatie van golfoverslag en falen van de bekleding snel leidt tot erosie van de zandkern en een bres. Dit maakt schades van het binnentalud risicovol op het moment dat golfoverslag optreedt en risicoloos als er geen golfoverslag is. Bij de grootschalige golfoverslagproeven op de Vechtdijk is in beperkte mate ervaring opgedaan met gemaakte schade in combinatie met golfoverslag (zie bijlage B). Voor deze schade was een afname van de sterkte waarneembaar, maar de sterkte van de bekleding is nog steeds aanzienlijk in vergelijking tot de relatief lage overslagbelastingen langs de Vecht. Voor kleinere schades zoals gemaakt in de proeven is dus niet te verwachten dat deze tot een grote risicotoename leiden.

Bij het buitentalud leidt golfaanval op een beschadigde bekleding tot afslag van het kernzand. Net zoals bij klei wordt een afslagprofiel verwacht met een terras iets onder de waterlijn en een klif die zich de dijk in vreet. Dit erosieproces gaat bij zanddijken aanzienlijk sneller dan bij kleidijken, en leidt uiteindelijk tot een overstroming. Uit analyses in de relevantiestudie [3] blijkt dat door de beperkte golfhoogtes er een behoorlijk reststerkte is na falen van de bekleding. Tegelijkertijd leidt schade aan de bekleding op het buitentalud wel potentieel tot sterke afname van de erosiebestendigheid van de grasmat, vooral bij bijvoorbeeld grotere graafschade door konijnen, of de eerder genoemde droogte. Eventuele maatregelen moeten zich dan met name richten op het gedeelte van de bekleding wat zich in de golfklapzone bevindt. Daarbij zijn de risico's extra groot wanneer de dijk relatief smal is (steilere taluds, smalle kruin) en waar hoge golven voorkomen, wat afhankelijk is van strijklengtes en de dijkoriëntatie. De focus van risicogestuurde inspecties en noodmaatregelen zou dus op die locaties moeten liggen. Opgemerkt moet worden dat het gevolg van eventuele langsstroming op het afslagprofiel niet is beschouwd. Voor de Overijsselse Vecht is bekend dat deze langsstroming op veel plekken nauwelijks een rol speelt, echter dit is allicht niet altijd het geval (zie [3]).

Er zijn er diverse mogelijkheden om de kans op een overstroming geïnitieerd door schade te beperken (inspecties, beheer en onderhoud, ontwerp, crisismangement). Voor de mogelijkheden wordt verwezen naar Bijlage D van [8]. Met betrekking tot inspecties wordt opgemerkt dat de betrouwbaarheid hiervan flink kan worden verbeterd door inspecteurs gericht te laten inspecteren. Bijvoorbeeld door de inspectie te richten op alleen het buitentalud en alleen op de (gras)bekleding. Onderzoek hiernaar is gerapporteerd in [13]. Dit sluit tevens goed aan op de eerder benoemde meer risicogestuurde benadering van de omgang met schade in bijv. de golfklapzone, en op locaties met een potentieel hoge golfbelasting.

## 5.3 Aanvulmateriaal bij reparatie schades

Het ontwerp van gras op zandbekledingen wordt afgeraden, omdat er grote onzekerheden zijn over de benodigde tijd voor de ontwikkeling van een erosiebestendige bekleding. Mogelijk duurt het tientallen jaren voordat de erosiebestendigheid op een niveau is waarbij de gegeven erosiebestendigheidsparementen worden gehaald. Bij bestaande gras op

zandbekledingen kunnen echter schade optreden, waarbij een beperkte aanvulling van het bekledingsmateriaal nodig is. Gedacht kan worden aan het aanvullen van gaten door grote graverij door bijvoorbeeld honden en vossen of bij het vlakken en aanvullen van diepe rijsporen. Onbekend is hoe lang het duurt voordat een beperkte aanvulling weer helemaal op sterkte is, echter vanwege de beperkte omvang wordt verwacht dat dit aanzienlijk sneller is dan bij een volledig nieuwe bekleding.

Aanbevolen wordt om reparaties in de vorm van beperkte aanvullingen uit te voeren met materiaal dat zo goed mogelijk overeenkomt met het materiaal dat al op de dijk aanwezig is. De gedachte hierbij is dat de rondom de schade aanwezige vegetatie gedijt in het reeds aanwezige substraat en daarom makkelijk zal aanslaan in het nieuwe materiaal. Hierbij gaat het zowel om nieuwe gras- en kruidenplanten, als ook het uitbreiden van het bestaande wortelnet rondom de schade in het aanvul materiaal.

Voor de Overijsselse Vechtdijken worden bijvoorbeeld de volgende drie criteria gehanteerd voor het aanvulmateriaal:

- Vergelijkbaar met de aanwezige grond.
- Zand, licht leemhoudend en mag wat organisch stof bevatten.
- Schone grond.

Er worden geen specifieke eisen gesteld aan korrelgrootte en organisch stof gehalte. Voor een 'vergelijkbare' grond zal het echter vooral gaan om matig fijn zand (150-210  $\mu\text{m}$ ), zoals hoofdzakelijk aangetroffen in de bekleding van de Overijsselse Vechtdijk.

## 6 Implementatie in het BOI

De wens bestaat om de resultaten van de kennisontwikkeling voor gras op zandbekledingen te implementeren in het BOI (Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium). Het feitelijk opnemen hiervan valt buiten de opdracht van dit onderzoek naar gras op zandbekledingen. In het kader van het onderzoek is wel gekeken waar mogelijke aanvullingen en wijzigingen nodig zijn in de Schematiseringshandleiding Grasbekledingen (SH Gras) [10], Riskeer en de BM Gras buitentalud. Omdat ontraden wordt om nieuwe gras op zandbekledingen mee te nemen in het ontwerp, is niet nader ingegaan op ontwerpaspecten.

Een punt van aandacht voor het mechanisme GEKB is de toepassingsvoorwaarde voor de gedetailleerde beoordeling, Stap G.1. in Bijlage iii van de ministeriële regeling. Deze bevat de voorwaarde:

Taludhelling flauwer dan 1V:4H **of** kleilaagdikte  $\geq 0,4$  m.

Omdat bij gras op zandbekleding er geen kleilaag aanwezig is, kan dit worden geïnterpreteerd als een kleilaagdikte  $< 0,4$  m, waardoor niet wordt voldaan aan de toepassingsvoorwaarde en er geen gedetailleerde beoordeling van een gras op zandbekleding mogelijk is. Een andere interpretatie is dat indien er geen kleibekleding aanwezig is, er ook geen eisen kunnen worden gesteld aan de dikte hiervan. Mogelijke opties zijn om de beoordeling van gras op zand als een toets op maat te beschouwen, of in de SH Gras uit te leggen dat de tweede interpretatie relevant is en daarom wel een gedetailleerde beoordeling mogelijk is. Dit is een keuze voor het BOI.

Het onderzoek heeft zich voor wat betreft het buitentalud alleen gericht op gras op zandbekledingen in de golfklapzone, niet in de golfoploopzone. Mocht het toch noodzakelijk blijken om gras op zandbekledingen in de golfoploopzone te beoordelen op veiligheid, dan zullen er aanvullende werkzaamheden noodzakelijk zijn met betrekking tot de kalibratie van de erosieparameter  $U_c$  voor de golfoploopzone en het verdisconteren van de voor golfoploop onvermijdelijke overgang tussen de harde bekleding en de gras op zandbekleding. Dit was buiten de scope van dit onderzoek. De kansverdeling van de  $U_c$  zoals gegeven in paragraaf 3.2.1 kan voor deze aanvullende werkzaamheden als uitgangspunt worden gebruikt.

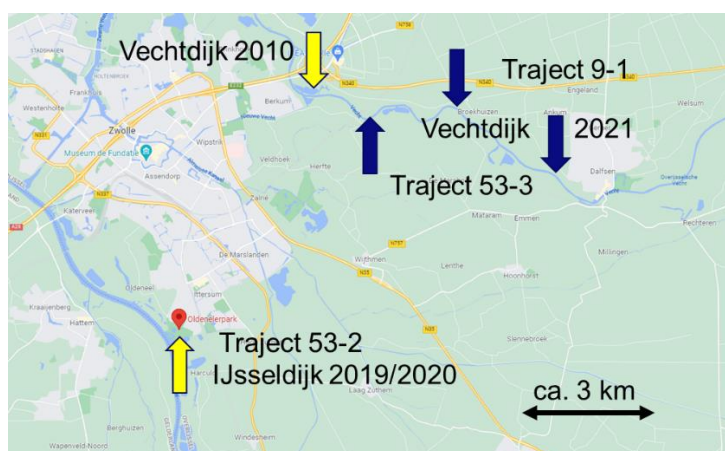
Er zijn geen software aanpassingen noodzakelijk. Alle wijzigingen kunnen worden ondervangen in aanwijzingen in de SH Gras. De voorstellen voor wijzigingen en aanvullingen staan in Bijlage C, uitgaande van een keuze voor een gedetailleerde beoordeling van gras op zandbekledingen.

## 7 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] Stand van zaken kennis gras op zand, Product 1, Deltares projectnummer 11204369-002, definitief versie 1.0, 7-7-2020.
- [3] Relevantie-onderzoek gras op zand, Product 2, Deltares projectnummer 11204369, Definitieve versie 1.0, 12 augustus 2020.
- [4] Gras op Zand P3: Ruimtelijke variabiliteit, vegetatie en bodemonderzoek, Nils van Rooijen (WUR), Cyril Liebrand (Eurecoadvies), Maurice Evers (Lumbricus), Eric Visser, Hans de Kroon (Radbouduniversiteit Nijmegen).
- [5] Gras op zand, voorbereiding grootschalige proeven. Locatiekeuze, proefprogramma en predictie, Deltares kenmerk 11204369-002-GEO-0012, definitief 23-3-2021
- [6] FACTUAL REPORT PRAKTIJKPROEVEN GRAS OP ZAND, Infram Hydren, 19i824, versie 2.0, 8 juni 2021
- [7] Onderzoek Gras op Zand, P7: Doorworteling en treksterkte, N. van Rooijen, C. Liebrand, M. Evers, E. Visser, N. Bisschops en H. de Kroon
- [8] Analyse golfklapproeven en golfoverslagproeven Gras op zand onderzoek product 8, Deltares projectnummer 11204369, definitief v1.0, 13 september 2021.
- [9] Rekenwaarden erosieparameters gras op zandbekledingen, Gras op zand onderzoek product 9, Deltares rapportnummer 11204369-002-GEO-017, PM Versie Def.
- [10] Schematiseringshandleiding grasbekleding WBI 2017, Rijkswaterstaat, versie 28 mei 2021, Definitief.
- [11] Kramer, N.; Mens, M.; Beersma, J.; Kielen, N. H2O-Online. August 2019.
- [12] KNMI De droogte van 2018 - Een analyse op basis van het potentiële neerslagtekort; 2018.
- [13] Klerk, W.J.; Kanning, W.; Kok, M.; Bronsveld, J.; Wolfert, A.R.M. Accuracy of visual inspection of flood defences. Struct. Infrastruct. Eng. 2021.

## A Substraat en bodemontwikkeling

De erosiebestendigheid van gras op zandbekledingen wordt voor een substantieel deel bepaald door de samenhang in de toplaag tijdens golfoverslag- en golfklapcondities. De toplaag bij gras op zandbekledingen is circa 0,3 à 0,4 m dik en bestaat uit een zode van circa 0,1 m dikte en de hieronder gelegen doorwortelde laag tot een diepte van 0,3 à 0,4 m onder het maaiveld. De samenhang in de toplaag zorgt ervoor dat deze niet als los zand tussen de wortels wegspoelt, en treedt ook op bij lage lutumgehaltenes (1 à 4%). Waargenomen is dat deze samenhang ervoor zorgde dat kleine gaatjes in de zode, ofwel door mollen en muizen, ofwel door initiële schade door erosie, niet direct leiden tot falen van de grasbekleding. Nadat de sterk doorwortelde zode over een deel van het taludoppervlak was verdwenen verliep het erosieproces van het hieronder gelegen deel van de toplaag geleidelijk, totdat de toplaag doorbrak en het losse zand onder de toplaag bloot kwam te liggen. Dit losse zand spoelde vervolgens snel weg. Deze typering van het erosieproces van de toplaag is op alle locaties waar grootschalige proeven zijn uitgevoerd aangetroffen (Figuur A-1).



Figuur A-1 Grootschalige erosieproeven gras op zandbekledingen (blauwe pijlen langs de Vecht in het kader van onderhavig project 2021, gele pijlen eerdere proeven)

Er zijn meerdere aspecten die, al dan niet in combinatie met elkaar, waarschijnlijk verantwoordelijk zijn voor de geobserveerde samenhang van het zand in de toplaag en de daarmee gepaard gaande erosiebestendigheid. Deze aspecten onderscheiden de toplaag van het onder de toplaag gelegen losse zand.

Ten eerste komen in de toplaag tot een diepte van 0,3 à 0,4 m relatief veel wortels voor ten opzichte van grasbekledingen op klei. Met name kruiden leveren de diepere wortels [7]. De aanwezigheid van een percentage kruiden, bijvoorbeeld te meten in de bedekking, is echter niet onderscheidend gebleken voor de erosiebestendigheid en de dikte van de toplaag. Op drie van de vijf locaties die zijn beproefd met golfoverslag was slechts een heel gering aandeel van de bedekking afkomstig van kruiden. Hierbij wordt opgemerkt dat het percentage bedekking met kruiden afhankelijk is van het seizoen, omdat van sommige kruiden de bovengrondse plantdelen afsterven in de winter. Ondanks dat de worteldichtheid onder de zode veel lager is dan in de zode, is het waarschijnlijk dat de aanwezigheid hiervan positief gecorreleerd is met de erosiebestendigheid. Dit kan zowel door de fysieke sterkte van de wortels die zorgen voor een samenhang van het substraat op de schaal van centimeters (de afstand tussen de wortels) als door de wisselwerking tussen de wortels en de bodem via schimmels en afscheidingen uit de wortels die zorgen voor een kleefkracht op de schaal van zandkorrels.

Ten tweede spelen zich vooral in de bovenste 0,3 à 0,4 m bodemvormende processen af die kunnen zorgen voor samenhang tussen het granulaire materiaal. Dit betreft onder andere de inspoeling van organisch materiaal en afbraakproducten hiervan. Voor 55 locaties langs de Vechtdijk zijn bodemprofielen opgesteld, waarin onderscheid is gemaakt in verschillende horizonten (horizont: laag die is gevormd door bodemvorming) [4]. Voor de locaties waar de grootschalige erosieproeven hebben plaatsgevonden zijn deze weergegeven in Bijlage Figuur A-2, Figuur A-3, Figuur A-4.

De benaming van de hier onderscheiden horizonten is als volgt:

- Ah Bovenste laag waarin zich in het zand humusdeeltjes (h) of organisch materiaal heeft opgehoopt.
- B Laag waarin de eigenschappen van het moedermateriaal zijn veranderd door inspoeling van klei- en humus deeltjes uit de bovengelegen laag.
- C Moedermateriaal. Materiaal is niet veranderd door bodemvormende processen.

Tussen de beelden van de bodemprofielen zijn de schadeebeelden als gevolg van de erosieproeven geplaatst, waarin het bodemprofiel weer is te herkennen. Het moedermateriaal C-horizont is het losse materiaal dat makkelijk wegspoelt. De A en B horizonten zijn, in elk geval onder golfoverslag- en golfklapcondities, samenhangend en erosiebestendig.

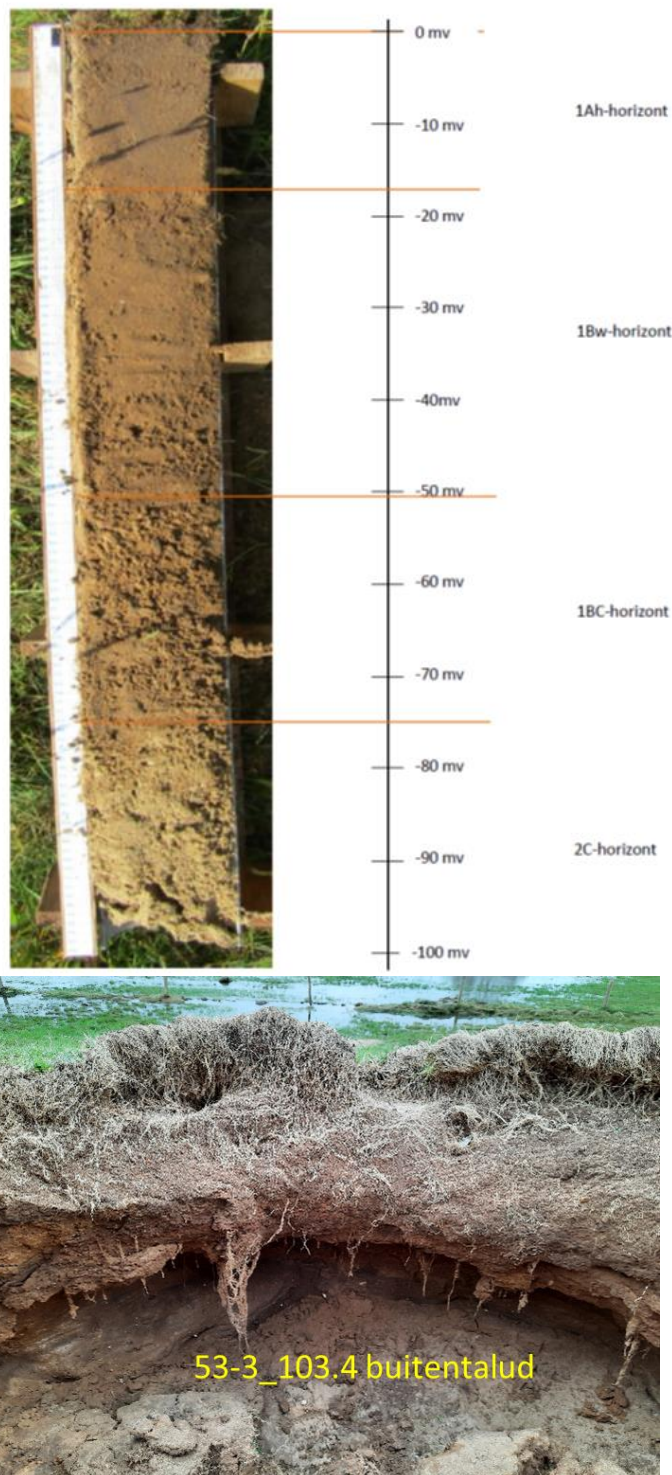
In de 55 bodemprofielen [4] is in alle gevallen sprake van een A of een A en B horizont boven het moedermateriaal C. Verwacht wordt dat de A horizont en mogelijk in mindere mate de B horizont zich samenhangend gedraagt, net als op de 5 beproefde taluds in het kader van onderhavig onderzoek, de taluds van de Vechtdijk in 2010 en de proeflocaties op de IJsseldijk.

Ten derde, waarnemingen in het veld tijdens grootschalige golfoverslagproeven duiden op een mogelijk mechanisme dat leidde tot meer bescherming van de toplaag genaamd "interne slemp". Tijdens de golfoverslagproef zorgde de grote hoeveelheid water mogelijk voor het suspenderen van fijne delen (lutum en silt, en soms ook ijzerdeeltjes) die aanwezig zijn in de toplaag, waarna de grond meer "in elkaar zakke" en er een glad oppervlak ontstond, welk voor water moeilijk indringbaar was. Het gevolg was veel afstroming van water en niet of nauwelijks verzwakking van de toplaag. Het mechanisme van interne slemp is een hypothese. De gevoeligheid voor slemp op basis van correlaties met de granulaire samenstelling laat zien dat deze gering is [4]. Waarschijnlijk zijn ook het effect van bodemvorming en wortels van belang bij de erosiebestendigheid van de toplaag.

Onbekend is welke van de drie genoemde aspecten in welke mate bepalend is voor de geobserveerde erosiebestendigheid.

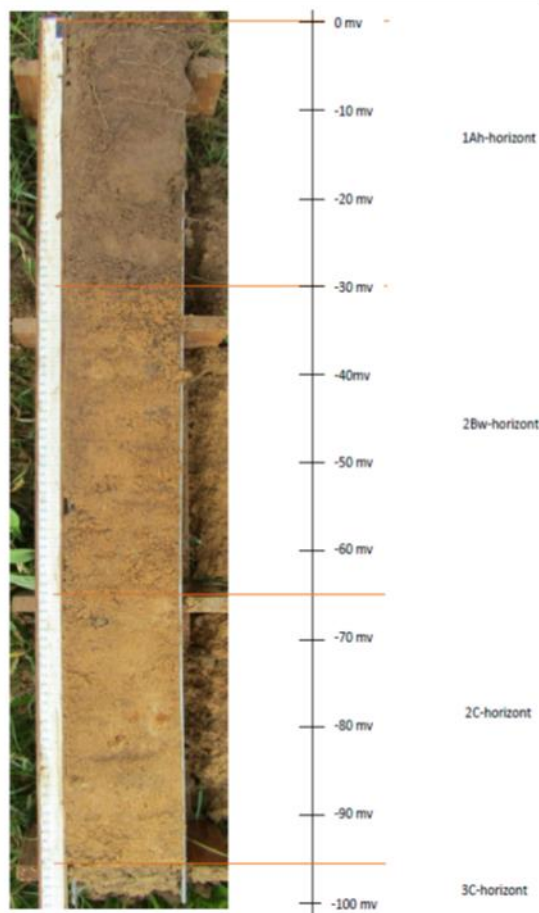


## 103.4 buiten

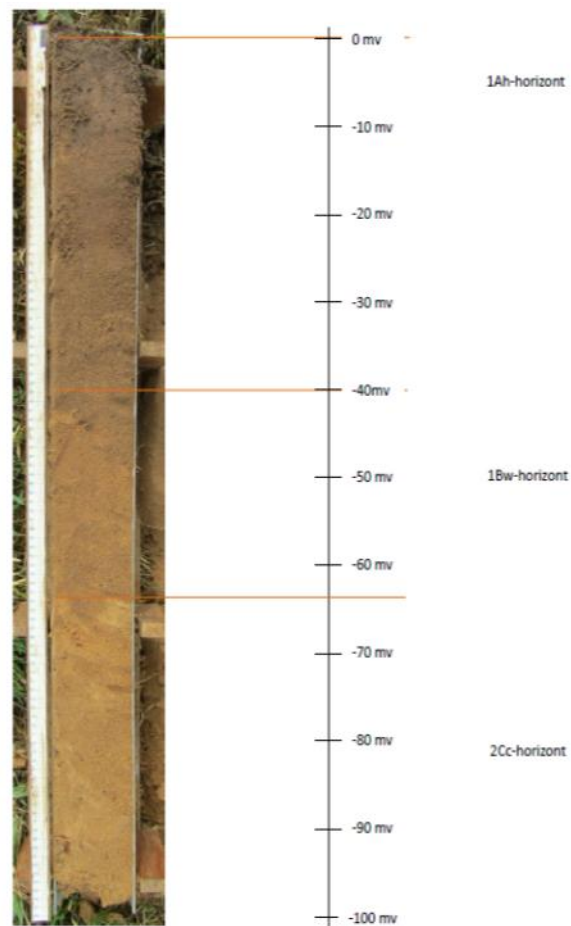


Figuur A-2 Bodemprofiel 53-3 103.4 buiten (boring gestoken voorafgaand aan de erosieproef)

## 14.0 binnen



## 14.0 buiten

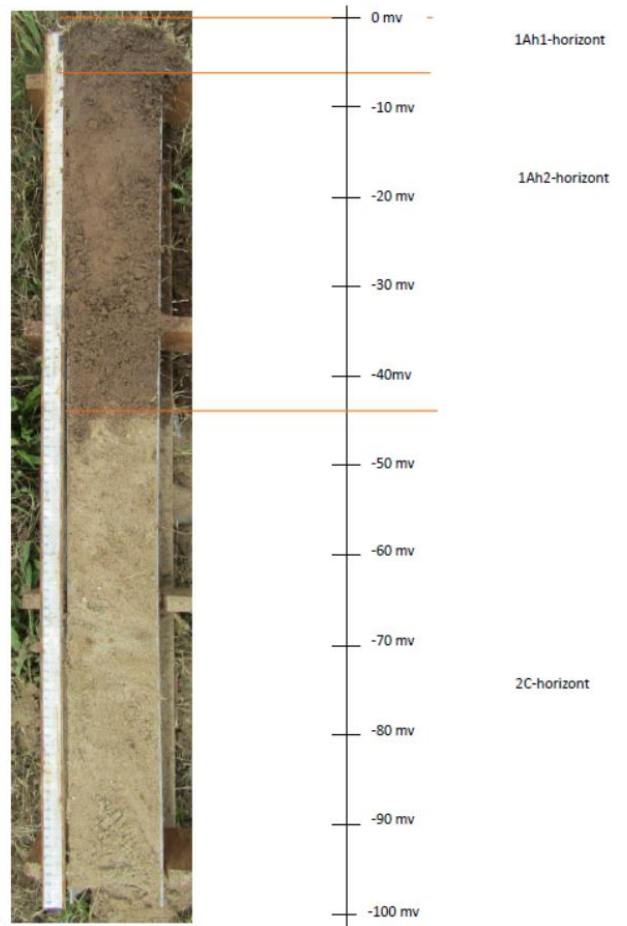


Figuur A-3 Bodemproefiel 9-1 14.0 binnentalud strook 2-2 en buitentalud strook 2-1 (boringen gestoken voorafgaand aan de erosieproef)

## 18.2 binnen

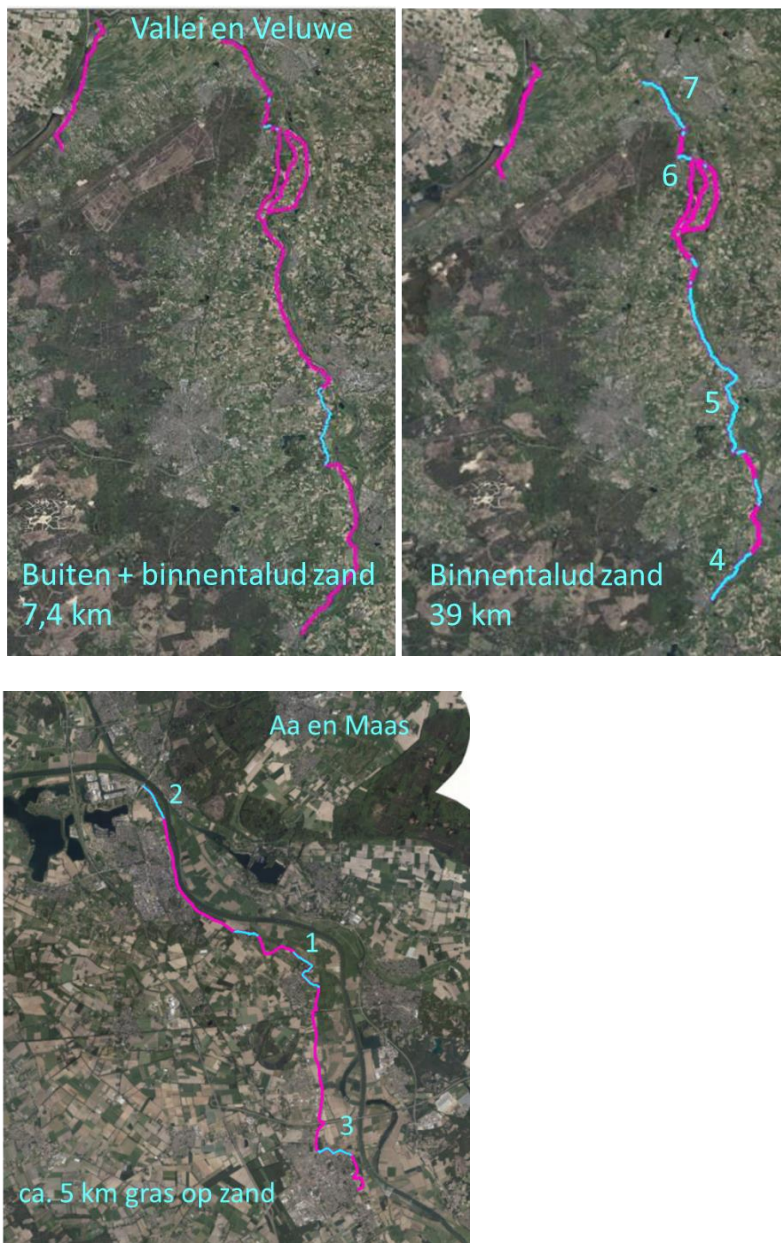


## 18.2 buiten



Figuur A-4 Bodemproefiel 9-1 18.2 buiten stroken 2-1 buitentalud en 2-2 binnentalud (boringen gestoken voorafgaand aan de erosieproef)

Voor de toepassing van de rekenwaarden van de erosieparameters op andere gras op zand dijken in Nederland is het van belang dat deze bekledingen vergelijkbaar zijn met de onderzochte dijktaaluds langs de Vecht en IJssel. Het overige areaal van gras op zandbekledingen ligt voor zover momenteel bekend langs de westzijde van de IJssel en langs de Maas (Figuur A-5).



Figuur A-5 Areaal gras op zandbekledingen langs de IJssel (boven) en Maas (onder). Gras op zandbekledingen aangegeven in turquoise trajectdelen

Een kwantitatieve methode om met kleine proeven de erosiebestendigheid van de toplaag aan te tonen is binnen de kaders van dit project niet uitgewerkt. Indien de hypothese van interne slemp inderdaad verklarend is, dan zou hiernaar kunnen worden gekeken door het uitvoeren van een combinatie van een vloeigrensbepaling en een druppeltest. Grenswaarden hieraan kunnen echter nog niet worden gesteld. Met betrekking tot de bodemvorming en het voorkomen van wortels tot een wat grotere diepte kan worden gekeken in hoeverre deze vergelijkbaar zijn met de gemeten waarden op de Vechtdijk. Ook hiervoor zijn geen kwantitatieve grenswaarden uitgewerkt. De vergelijkbaarheid kan door deskundigen op het gebied van bodemkunde en dijkvegetaties wel worden aangetoond en eventueel ondersteund met veldproeven. Enkele handreikingen hierbij:

- Het substraat van de gras op zandbekleding bestaat uit lokaal voorhanden dekzanden die in de omgeving van de dijk aan het oppervlak voorkomen. Dit is waarschijnlijk het geval voor het hele Nederlandse areaal van bestaande gras op zandbekledingen. Uit een grote hoeveelheid boorbeschrijvingen van boringen in de Vecht- en IJsseldijk blijkt dat het

zand meestal wordt omschreven als 'matig fijn' (150-210  $\mu\text{m}$ ), een enkele keer komt ook matig grof (210-300  $\mu\text{m}$ ) en zeer fijn (105-150  $\mu\text{m}$ ) voor. Het lutumgehalte kan laag zijn (1-4%), verwacht wordt dat een wat hoger lutumgehalte niet nadelig is voor de erosiebestendigheid.

- De bodemontwikkeling kan worden gecontroleerd middels het uitvoeren van (hand)boringen en beschrijving hiervan door een bodemkundige. De gezamenlijke dikte van de A en eventueel B horizont zijn in de orde van 0,3 à 0,4 m. Indien de laag met bodemontwikkeling dikker is, zoals op enkele plekken langs de Vecht en IJssel ook is aangetroffen, dan is dat waarschijnlijk gunstig voor de erosiebestendigheid. Het verdient de aanbeveling de boorbeschrijvingen te vergelijken met die zijn gerapporteerd in [4].
- De doorworteling bijvoorbeeld middels de VTV-methode worden uitgevoerd, waarbij de stekken niet 0,2 maar 0,3 m diep gaan (zie [7]). De resultaten kunnen worden vergeleken met de resultaten zoals gepresenteerd in [7].
- Door het graven van een proefsleuf kunnen de bodemontwikkeling en doorworteling over een groter oppervlak in samenhang worden bekeken. Een proefsleuf geeft daarnaast de mogelijkheid om te kijken of door middel van spoelen met water een samenhangende toplaag kan worden aangetoond. Hierbij wordt opgemerkt dat dit in de praktijk nog niet is geprobeerd en er in het kader van onderhavig project geen kwantitatieve methode voor het spoelen met water is afgeleid (emmers water/ 'tuinslang' / jet-test en dergelijke).
- De uitgevoerde grastrekproeven op de Vechtdijk en IJsseldijk volgens het protocol dat is ontwikkeld voor grasbekledingen op klei gaven een schatting van de  $U_c$  aan de lage kant, ten opzichte van de grootschalige proeven. Een mogelijke oorzaak hiervan is dat de grastrekproeven mogelijk vooral iets zeggen over de erosiebestendigheid van de zodelaag en de verbinding hiervan met de ondergrond, dan over de wat dieper gelegen delen van de toplaag, onder de ca. 0,15 m. Desondanks wordt verwacht dat deze kleine veldproeven een oordeel ten aanzien van de vergelijkbaarheid van een gras op zandbekleding met de onderzochte dijken langs de Vecht en IJssel goed kunnen ondersteunen. Een kwantitatieve grenswaarde is ook hiervoor niet afgeleid in het kader van dit project.

De verwachting is dat gras op zandbekledingen die verder langs de IJssel en Maas voorkomen, tientallen jaren (of langer) geleden zijn opgetrokken uit lokale dekzanden met een vergelijkbare korrelgrootte ook een vergelijkbare erosiebestendigheid zullen hebben. Het doel van de aanbevolen handreikingen is daarom vooral om te kijken of er redenen zijn waarom de gras op zandbekledingen zouden afwijken.

## B Ervaringen met graverij

### B.1 Muizen en mollen

Graverij door muizen en mollen is niet uit te sluiten. Ook op de proefstroken voor golfoverslag waren muizen en molgangen aanwezig. Het effect van graverij door muizen en mollen is verdisconteerd in de erosieparameters [8].

Muizen en molgangen waren (zeer) vertegenwoordigd in de eerdere Vechtdijkproeven 2010, maar ook op de IJsseldijk en bij strook 1-2 en 2-1, bij de recent uitgevoerde proeven op de Vechtdijk (2021). De mol en muizengangen zijn zodanig klein dat de stroming er geen vat op heeft. De stroming schiet er als het ware overheen. De randen van de gangen zijn erosiebestendig door het rondom het gat aanwezige wortelnet.

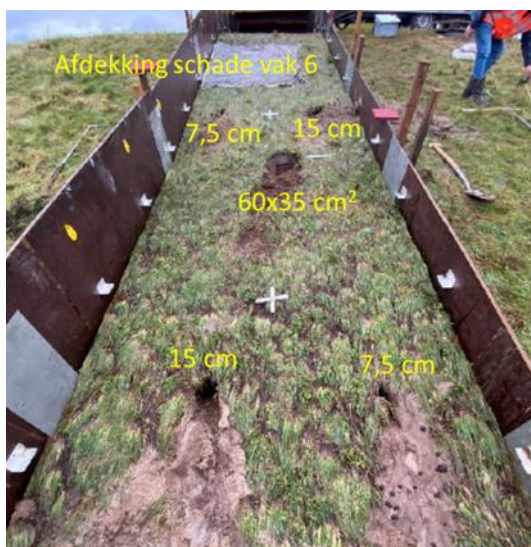
Het uitspoelen van zand door de gangen is in beperkte mate waargenomen. Water dat ergens een molgang in loopt en ergens lager op het talud uittreedt nam soms aanvankelijk wat zand mee, maar na het schoonspoelen van de gang leverde dit verder geen falen van de grasbekleding op. De erosiebestendigheid van de wanden van het gat in combinatie met de geringe schuifspanning door de waterstroming heeft niet tot erosie en ondermijning van de grasbekleding geleid.

### B.2 Grotere graverij

Met grotere graverij wordt bedoeld graverij door bijvoorbeeld konijnen, honden, vossen, dassen en bevers. Voor de Overijsselse Vechtdijk zijn met name konijnen en honden als frequent aanwezige gravers aangegeven.

Bij de proeven in 2021 op de Overijsselse Vechtdijk zijn op twee proefstroken schades aangebracht.

Bij de eerste strook is dat gedaan nadat de reguliere proef niet tot falen had geleid. De grasbekleding had toen al een hoge golfoverslagbelasting gehad, tot en met de hoogste belasting van 5 uur 190 l/s per 'm bij een gesimuleerde significante golfhoogte van 1 m. Vervolgens zijn in de teststrook schades aangebracht om graverij door konijnen (diameter 0,075 m), vossen (diameter 0,15 m) en honden (60x35x24 cm) na te bootsen Figuur B-1. De diepte van de konijnen- en vossenholen was circa 1 m iets aflopend ten opzichte van horizontaal. De schade door een hond had een diepte van 0,24 m, ofwel minder diep dan de dikte van de top laag.



Figuur B-1 Aangebrachte graafschade konijn, vos en hond naar inzicht van de dijkbeheerder

Nadat de schade is aangebracht is een golfoverslagproef uitgevoerd bij een gesimuleerde stormduur van 5 uur, een golfoverslagdebiet van 1 l/s per 'm bij een significante golfhoogte  $H_s$  van 0,5 m. Omdat er geen noemenswaardige toename van de schade optrad is de volgende storm gesimuleerd: 5 uur, golfoverslagdebiet van 60 l/s per 'm en  $H_s$  van 0,5 m. Hierbij is de schade van de 'hond' 0,2 m langer geworden, maar niet dieper. De andere schades zijn niet veranderd. Vervolgens is een stormconditie gesimuleerd met een golfoverslagdebiet van 190 l/s per 'm bij  $H_s = 1$  m. Na 1,5 uur was de schade door de 'hond' wel groter geworden, maar niet dieper. De andere schades waren niet veranderd (Figuur B-2).



Figuur B-2 Schade na 1,5 uur 190 l/s per 'm bij  $H_s = 1$  m

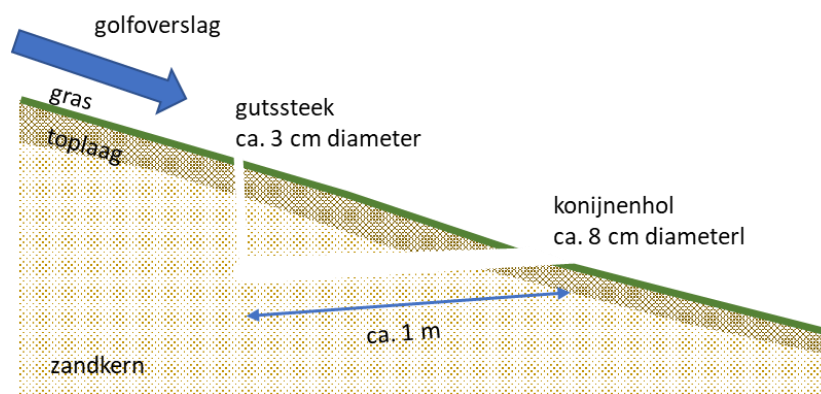
Hierop zijn in de toplaag nog twee gaten aangebracht met een afmeting van 0,15 x 0,15 m en 0,45 m diep (door de toplaag heen) en 0,3 x 0,3 m en 0,45 m diep. De schades zijn aangebracht op de kale plek die was ontstaan als gevolg van het afstropen van de zode vanaf de graafschade door de 'hond'. Hierna is nog een half uur storm gesimuleerd met een golfoverslagdebiet van 60 l/s per 'm bij  $H_s = 0,5$  m. Dit heeft geleid tot verdieping van de aanvullende schades. Het beeld wordt gegeven in Bijlage Figuur B.1 . De andere schades zijn gedurende de proef niet veranderd.



Bijlage Figuur B.1 Schades aan het einde van de proef

Op een tweede strook op dezelfde locatie is een proef uitgevoerd waarbij vanaf het begin van de proef schade is aangebracht. Voorafgaand aan de proef is het gras zo kort mogelijk gemaaid. Dit kwam neer op een geschatte representatieve lengte van 3 cm, waarbij af en toe kale plekken ontstonden door wegmaaien van al het bovengrondse materiaal. In de proefstrook zijn in vak 11 (op een afstand van 11 m van de uitstroomopening van de simulator) gaten aangebracht met een diepte van 1 m en afmetingen van 25x15 cm, 20x20 cm en 8x8 cm (konijnen). Daarnaast is ook een vosgraverij gesimuleerd met een afmeting van 45x20 cm. Alle hollen liepen ten opzichte van horizontaal iets naar beneden door de toplaag tot ruim één meter in de zandkern.

Om te kijken of uitspoeling van zand door de hollen en ondermijning en instorten van de toplaag een risico is, zijn twee van de konijnenhollen met elkaar in verbinding gebracht en zijn in het talud boven de ingangen van de hollen gutssteken met een diameter van 3 cm in verbinding gebracht met de konijnenhollen. Water kan dus door de gutssteken naar het konijnenhol om lager op het talud door het konijnenhol uit te treden (Figuur B-3).



Figuur B-3 Schematische weergave verbinding tussen konijnenhol en gutssteek

De aangebrachte schade en de ontwikkeling hiervan tijdens de proef staat in Figuur B-4. Tijdens de proef werden achtereenvolgens de volgende stormcondities gesimuleerd (Tabel B.1).



Tabel B.1 Gesimuleerde stormcondities, achtereenvolgens opgelegd van klein naar groot

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

Voor de stormcondities wordt de volgende naamgeving gehanteerd : GO60\_0,5 betekent Golfoverslag, 60 l/s per 'm bij een gesimuleerde significante golfhoogte van 0,5 m.



Figuur B-4 Aangebrachte schade vak 11 (linksboven), eerste schade vak 5 na 2,5 uur GO100\_1,0 (rechtsboven), 0,25 uur GO190\_1,0 (linksonder) en falen na 1 uur GO190\_1,0 in vak 10 (rechtsonder)

Grotere in het kader van de proeven gemaakte schades bleken niet snel tot falen van de toplaag te leiden, echter wel tot een verzwakking van de toplaag. Uitspoeling van materiaal door de konijnenholen is niet zichtbaar dan wel ondermijnend opgetreden, ondanks de gutssteken die hoger op het talud met de konijnengangen in contact waren gebracht. Het verhang over de in- en uitgang van de hollen waren onvoldoende om een significante

hoeveelheid zand te transporteren. Hierbij wordt opgemerkt dat de stroming veelal een zodanige snelheid heeft dat het water over de gaten heen schiet, waardoor het verhang in de gaten allicht beperkt blijft. Het aantal proeven met schades was echter beperkt en er is twijfel of toevalligheden rondom de geometrie van deze graverij en/of de flauwe taludhelling hierin hebben geholpen.

Vanwege de beperkte ervaring met grotere graverij (konijnen, vossen, honden en groter) bij golfoverslagproeven op de Vechtdijk worden deze uitgesloten. De inzichten met de gemaakte schades geven echter een zeker vertrouwen dat een schade niet heel snel tot catastrofaal falen leidt. Een enkel konijnenhol zal waarschijnlijk geen significante verhoging van de faalkans opleveren, evenals een ondiepe beschadiging door een hond. Dit is van belang voor het gevoerde beheer en onderhoud. Een concentratie van konijnen of graverij door honden zou mogelijk wel kunnen leiden tot een significante verhoging van de faalkans, dit is echter onzeker en binnen de kaders van dit project niet bepaald.

# C Voorstel aanpassingen en toevoegingen veiligheidsbeoordeling gras op zand in het BOI

## **BM Gras buitentalud golfklapzone**

De BM Gras buitentalud kan zonder aanpassingen worden gebruikt voor gras op zandbekledingen in de golfklapzone, waarbij gebruik wordt gemaakt van de voor gras op zand afgegeven waarden voor de parameters a, b en c (paragraaf 3.3.1). Vanzelfsprekend wordt voor de dikte van de kleilaag 0 m ingevuld. In de SH Gras moet worden gaangegeven dat het zandgehalte er bij gras op zandbekledingen niet toe doet. Hier kan alles tussen 0 en 0,99 (-) worden ingevuld, dit heeft geen effect op de berekening.

De BM Gras buitentalud gebruikt de hydraulische belasting die wordt gegenereerd met Riskeer. Aandachtspunt hierbij is de lengte-effectfactor. Deze is in Riskeer invulbaar, echter er wordt door Riskeer wel een default waarde ingevuld (voor gras op kleibekledingen), afhankelijk van het traject, conform Bijlage C van de SH Gras. Voor gras op zandbekledingen moeten de lengte-effectfactoren van gras op kleibekledingen met één worden opgehoogd. De waarden zijn voor gras op klei respectievelijk 1, 2 of 3, afhankelijk van het traject. Voor gras op zandbekledingen moet dit worden respectievelijk 2, 3 of 4. Dit moet een plek krijgen in de SH Gras.

## **Riskeer**

Riskeer kan zonder wijzigingen worden gebruikt voor de beoordeling van gras op zandbekledingen voor GEKB. Bij de sterkteberekening worden de voor gras op zand gegeven verwachtingswaarde en de standaardafwijking ingevuld (paragraaf 3.2.1).

Aandachtspunt bij de bepaling van de hydraulische belasting met Riskeer is de lengte-effectfactor. Deze is in Riskeer invulbaar, maar er wordt door Riskeer een default waarde ingevuld voor gras op kleibekledingen, afhankelijk van het traject, conform Bijlage C van de SH Gras. Zoals aangegeven bij de BM Gras buitentalud golfklapzone moeten de factoren met één worden opgehoogd, hetgeen in de SH Gras een plek moet krijgen.

## **Schematiseringshandleiding grasbekledingen (SH Gras)**

Aanpassingen en toevoegingen per paragraaf in de SH Gras [10].

- Paragraaf 4.3 verwijderen: “Voor grasbekledingen op zand is géén *gedetailleerde toets* beschikbaar en is, als bij de *eenvoudige toets* geen oordeel kan worden geveld, een *toets op maat* noodzakelijk.”
- Paragraaf 4.5 toevoegen bullet “Substraat van zand of van klei.”
- Paragraaf 4.5 Wijzigen “Zanddijken en zanddijken met een heel dunne kleibekleding, dunner dan 0,4 m, zijn gevoeliger voor erosie dan kleidijken en zanddijken met een dikkere kleibekleding, ondanks de aanwezigheid van een graszode. Ook de taludhelling is hierbij van belang. Zanddijken met een binnentalud steiler dan 1:4 en zanddijken met een kleibekleding dunner dan 0,4 m en steiler dan 1:4 kunnen alleen in een toets op maat worden beoordeeld. Deze eigenschappen kunnen aldus dienen als grenzen voor dijkvakken.” in :
- “Zanddijken en zanddijken met een heel dunne kleibekleding, dunner dan 0,4 m, zijn gevoeliger voor erosie dan kleidijken en zanddijken met een dikkere kleibekleding, ondanks de aanwezigheid van een graszode. Deze eigenschappen kunnen aldus dienen als grenzen voor dijkvakken.”
- Paragraaf 5.2 wijzigen: “In zowel de golfklap- als golfoploopzone wordt de erosiebestendigheid van de grasbekleding geschematiseerd door deze in te delen in één van de drie categorieën: gesloten zode, open zode en fragmentarische zode. De indeling wordt gemaakt op basis van visuele kenmerken eventueel gecombineerd met het steken

van een zodeplag, zie daarvoor par. 6.5.1. Afhankelijk van kwaliteit krijgt de zode een vaste rekenwaarde van de parameter die in het betreffende model de erosiebestendigheid voorstelt.” in :

- “In zowel de golfklap- als golfploopzone wordt de erosiebestendigheid van de grasbekleding geschematiseerd door deze in te delen in één van de volgende categorieën: gesloten zode, open zode en fragmentarische zode. Hierbij wordt daarnaast onderscheid gemaakt in het substraat, klei of zand. De indeling met betrekking tot de geslotenheid van de zode (gesloten, open of fragmentarisch) wordt gemaakt op basis van visuele kenmerken eventueel gecombineerd met het steken van een zodeplag, zie daarvoor par. 6.5.1. Het onderscheid in het substraat, zand of klei, wordt eveneens beschreven in paragraaf 6.5.1. Afhankelijk van kwaliteit krijgt de zode een vaste rekenwaarde van de parameter die in het betreffende model de erosiebestendigheid voorstelt. Voor grasbekledingen op een substraat van zand worden alleen parameters gegeven indien sprake is van een gesloten zode.”.
- Paragraaf 5.2 wijzigen: “De sterkte van de grasbekleding wordt gekarakteriseerd door een kansverdeling van het kritisch overslagdebiet. De verwachtingswaarde en de standaardafwijking van deze kansverdeling zijn afhankelijk van de kwaliteit van de zode (open zode of gesloten zode), het substraat waarop de bekleding groeit (klei of zand) en van de golfhoogteklasse waar de dijk in valt (zie verder paragraaf 6.7).”
- Paragraaf 6.2 wijzigingen afhankelijk van de studie naar de lengte-effectfactor. Deze paragraaf verwijst naar Bijlage C waarin voor gras op klei de factoren per traject worden gegeven.
- Paragraaf 6.5.1 Wijzigen in:

#### *Graskwaliteit*

##### Wat is het

De kwaliteit van de graszode is fragmentarisch, open of gesloten. De kwaliteit betreft de erosiebestendigheid van de zode onder golfwerking. De erosiebestendigheid wordt hoofdzakelijk bepaald door de dichtheid van het wortelnet in de toplaag.

Voor de golfploopzone is de graskwaliteit open en gesloten zode gekoppeld aan de kritische stroomsnelheid  $U_c$  [m/s] die wordt gebruikt in het erosiemodel. De volgende rekenwaarden moeten bij de gedetailleerde toets worden gebruikt (Bijlage Tabel C.1). Bij deze rekenwaarden wordt uitgegaan van een substraat van klei. Aan het zandgehalte van de klei worden geen eisen gesteld. Gras op zand kan alleen worden beoordeeld in een toets op maat.

*Bijlage Tabel C.1 Rekenwaarden  $U_c$  gedetailleerde toets oplooptberekening (gras op klei)*

	<b>Gesloten zode</b>	<b>Open zode</b>
$U_c$ [m/s]	6,6	4,3

Voor de golfklapzone is de graskwaliteit gekoppeld aan de parameters a, b en c die worden gebruikt in het erosiemodel. De onderstaande rekenwaarden moeten bij de gedetailleerde toets worden gebruikt (Bijlage Tabel C.2). Er wordt onderscheid gemaakt tussen een substraat van zand of een substraat van klei.

*Bijlage Tabel C.2 Rekenwaarden a, b en c gedetailleerde toets golfklapberekening*

	<b>Gesloten zode op klei</b>	<b>Open zode op klei</b>	<b>Gesloten zode op zand</b>
<b>a</b>	1	0,8	0,538
<b>b</b>	-0,035	-0,07	-0,06
<b>c</b>	0,25	0,25	0,25

Bij een fragmentarische zode kan niet worden uitgegaan van een noemenswaardige erosiebestendigheid. Plaatsen waar eigenlijk geen sprake is van een zode, bijvoorbeeld tuinen, parken, struiken of ruigtebegroeiing vallen in de categorie 'fragmentarische zode'. Een gesloten zode is de meest erosiebestendige zode en deze komt op de primaire keringen het meeste voor. De open zode is een tussencategorie die grofweg 10 à 20% minder erosiebestendig is dan een gesloten zode.

De kwaliteit van de zode is effectief te beïnvloeden door het (veranderen van het) beheer. Over het beheer van grasbekleding is veel literatuur te vinden, bijvoorbeeld via [4]. Gelet op de veiligheid van de kering, zou het beheer moeten worden gericht op het verkrijgen van een dicht wortelnet, ofwel een gesloten zode.

Het is mogelijk dat aan het binnen- en het buitentalud verschillende graskwaliteiten worden toegekend.

#### Hoe te bepalen

##### *Substraat klei of zand*

Het onderscheid tussen een substraat van zand en een substraat van klei kan worden bepaald op basis van de NEN-EN-ISO 14688.

##### *Graskwaliteit bepalen door visuele inspectie*

Verder zonder wijzigingen tot deel Aandachtspunten, daar moet de laatste bullet worden verwijderd.

- Paragraaf 6.7.1 toevoegen:

##### *Kleilaagdikte*

De kleilaagdikte wordt gebruikt in de toepassingsvoorwaarde van de gedetailleerde toets. Voor deze parameter wordt verwezen naar paragraaf 6.6.4, met dien verstande dat alleen de laagdikte van belang is voor het toetsspoor GEKB. Indien er sprake is van een zanddijk met een gras op zandbekleding en een gesloten zode (paragraaf 6.5.1) dan is er geen kleilaagdikte en kan wel een gedetailleerde beoordeling worden uitgevoerd.

- Paragraaf 6.7.3 wijzigen:

##### *Graskwaliteit*

De graskwaliteit is een kwaliteitsoordeel voor de erosiebestendigheid van de grasbekleding. Deze kan 'gesloten', 'open' of 'fragmentarisch' zijn. Tevens wordt onderscheid gemaakt in het substraat waarop de vegetatie groeit, klei of zand. De graskwaliteit wordt gebruikt in de toepassingsvoorwaarde voor de gedetailleerde beoordeling en voor de keuze van het gemiddelde en de standaardafwijking van het kritisch overslagdebiet (zie paragraaf 6.7.4). Voor de verdere beschrijving wordt verwezen naar paragraaf 6.5.1. Voor een fragmentarische zode is een toets op maat noodzakelijk.

Paragraaf 6.7.4 wijzigen:

##### *Parameter kritisch overslagdebiet*

##### Wat is het

De verwachtingswaarde en standaardafwijking van het kritisch overslagdebiet bepalen de ligging van de kansverdeling van het kritisch overslagdebiet. Deze kansverdeling representeert de erosiebestendigheid van de kruin en het binnentalud bij golfoverslag. Er wordt gebruik gemaakt van een lognormale kansverdeling. De eenheid van beide parameters is  $m^3/s/m'$ . De parameters worden gebruikt bij de gedetailleerde beoordeling in Ringtoets.

##### Hoe te bepalen

De verwachtingswaarde  $\mu$  en de standaardafwijking  $\sigma$  van het kritisch overslagdebiet zijn gekoppeld aan de graskwaliteit, het substraat (zie paragraaf 6.7.3) en de golfhoogteklasse (zie paragraaf 6.7.2). Gegeven de graskwaliteit, substraat en de golfhoogte volgen de parameters voor de gedetailleerde toets uit Bijlage Tabel C.3.

Bijlage Tabel C.3 Parameters ( $\mu$  en  $\sigma$ ) lognormale kansverdeling kritiek overslagdebiet bij verschillende Golfhoogteklassen, zodekwaliteit en substraat

Golfhoogte-klasse	Gesloten zode op klei		Open zode op klei		Golfhoogte-klasse	Gesloten zode op zand	
	$\mu$ (m <sup>3</sup> /s/m')	$\sigma$ (m <sup>3</sup> /s/m')	$\mu$ (m <sup>3</sup> /s/m')	$\sigma$ (m <sup>3</sup> /s/m')		$\mu$ (m <sup>3</sup> /s/m')	$\sigma$ (m <sup>3</sup> /s/m')
<b>0 tot 1 m</b>	0,225	0,250	0,100	0,120	<b>0 - 0,4 m</b>	0,236	0,636
<b>van 1 tot 2 m</b>	0,100	0,120	0,070	0,080	<b>0,4 – 0,8 m</b>	0,012	0,009
<b>van 2 tot 3 m</b>	0,070	0,080	0,040	0,050	<b>0,8 – 1,5 m</b>	0,009	0,006

Voor een gesloten zode op zand is de aanwezigheid van een wegverharding op de kruin verwerkt in de gegeven waarden. Voorwaarde hiervoor is dat het wortelnet netjes aansluit op de wegverharding, ofwel dat de graskwaliteit tot aan de wegverharding kan worden gekarakteriseerd als een 'gesloten zode'. Voor gras op een substraat van klei wordt voor het in rekening brengen van overgangen en objecten verwezen naar paragraaf 7.3.

Grasbekledingen die vallen onder de categorie fragmentarische zode of een open zode op zand kunnen alleen in een toets op maat worden beoordeeld.

- Bijlage C wijzigen op basis van studie naar lengte-effectfactor.

# D Samenvatting van het onderzoek naar gras op zandbekledingen

Deze bijlage geeft een korte samenvatting van de fasen en rapporten van het onderzoek naar gras op zandbekledingen. De verwijzing naar de rapporten staat in de hoofdttekst Hoofdstuk 2.

## D.1 Fase 1 Vooronderzoek

### D.1.1 P1 Stand van zaken kennis gras op zand

In deze eerste fase is het bestaande onderzoek naar gras op zandbekledingen verzameld en samengevat. Dit betrof bijvoorbeeld golfoverslagproeven op de Overijsselse Vechtdijk uit 2010, golfoverslagproeven op de IJsseldijk voor het project Zwolle Olst in het winterseizoen 2019-2020, golfklapproeven op gras op zanddijken en golfgoot onderzoek bij een beperkte golfhoogte op enkele proefstukken met een gras op zandbekleding. Het beeld dat hieruit ontstond is dat gras op zand een redelijke erosiebestendigheid heeft, die echter wat minder is dan die van gras op kleibekledingen. Ook het faalgedrag van gras op zand blijkt niet abrupt, maar geleidelijk. Het zand in de bovenste circa 0,3 à 0,4 m blijkt in combinatie met wortels redelijk erosiebestendig. Dit is in Fase twee van het onderzoek wederom geconstateerd. De datapunten uit het onderzoek uit het verleden zijn meegenomen in de analyse fase van dit project.

### D.1.2 P2 Relevantiestudie

Een tweede deel van de voorstudie betrof het relevantie onderzoek gevolgd door een go of no-go beslissing. In het kader van deze studie is gekeken naar inhoudelijke redenen waarom een aantoonbaar significante erosiebestendigheid van gras op zand niet zou leiden tot een impact op de scope. Redenen hiervoor zijn:

#### **Geotechnische instabiliteit (GABI of STBI) binnenwaarts wordt maatgevend.**

Steekproefsgewijs is gekeken naar de stabiliteit van het binnentalud in combinatie met golfoverslag. Op basis van de uitgevoerde studie blijkt dit voor circa 90 à 95% van de steekproef niet speelt. Doordat de binnentaluds van de Vechtdijk flauw zijn en de kans op golfoverslag relatief klein, voldoen veruit de meeste profielen aan de gestelde eisen. De uitzonderingen betreffen de relatief steile ondertaluds, van berm naar achterland of van berm naar teensloot, op enige afstand van de kruin. Omdat de dijk uit zand bestaat en gekeken wordt naar de combinatie met golfoverslag, kan dit door erosie mogelijk toch een significante bijdrage leveren aan de overstromingskans.

#### **Hydraulische belasting heel hoog of laag**

Steekproefsgewijs zijn hydraulische belastingen bepaald. Grofweg kunnen de hydraulische belastingen in drie categorieën worden verdeeld:

1. Zeer lage hydraulische belasting.  
Er zijn geen golven van betekenis, waardoor er ook geen bekleding van betekenis nodig is. Onderzoek naar de erosiebestendigheid van gras op zand is niet relevant.
2. Middelmatige hydraulische belasting.  
De hydraulische belasting is zodanig dat op basis van de verwachte, maar nog niet aangetoonde, sterkte van gras op zand, deze de belasting kan weerstaan. Onderzoek naar de erosiebestendigheid van gras op zand is wel relevant.
3. Zeer hoge hydraulische belasting.  
De hydraulische belasting is zodanig dat het gras geen kans heeft. Onderzoek naar de erosiebestendigheid van gras op zand is niet relevant.

#### *Hydraulische belasting GEKB*

Steekproefsgewijs is gekeken naar de hydraulische belasting op de kruin en het binnentalud. Als de sterkte gras op zand van de Vechtdijk in lijn is met het proefresultaat uit 2010, dan voldoet 75% van de profielen. Bij twee van de 61 profielen (3%) is sprake van overloop en mag worden verwacht dat gras op zand zeker niet zal voldoen. Onderzoek ter ondersteuning van veronderstelde erosiebestendigheid is zeker relevant.

#### *Hydraulische belasting GEBU*

Steekproefsgewijs is gekeken naar de golfbelasting op het buitentalud. Hierbij is rekening gehouden met het effect van de hoek van golfval. Voor 20 van de 64 profielen (ca. 30%) is de maximale golfhoogte kleiner dan 0,5 m en voor 60% van de berekeningen is deze kleiner dan 0,6 m. Een golfhoogte van 0,5 à 0,6 m is op basis van de kennis tot dusver waarschijnlijk het maximaal haalbare voor gras op zand, zonder ook de reststerkte in rekening te brengen. Voor enkele profielen 3 van 64 (5%) is de golfhoogte minder dan 0,25 m. De golfhoogtes tussen 0,25 m en 0,6 m zijn relevant voor nader onderzoek, dit is ruim 50% van de steekproef.

#### *Hydraulische belasting langsstroming*

Uit de zeer grofstoffelijke studie volgt dat voor 5 à 6 locaties, van elk honderd à enkele honderden meters, stroomsnelheden optreden die de erosiebestendigheid mogelijk te boven gaan. Hoewel erosie door langsstroming geen faalmechanisme is waarmee in het WBI2017 rekening wordt gehouden, wordt onderkend dat een zanddijk met een grasbekleding hiervoor extra kwetsbaar is, waardoor het mogelijk wel een significante bijdrage levert aan de overstromingskans. Voor de meeste dijkstrekkings is de stroomsnelheid echter zo laag dat verwacht mag worden dat erosie door langsstroming geen significante verhoging van de overstromingskans oplevert.

#### **Reststerkte voldoende**

Er is gekeken naar de reststerkte van een zanddijk onder golfwerking:

1. Om te kijken in hoeverre de bekleding op het buitentalud relevant is.
2. In hoeverre een schade aan de bekleding op het buitentalud direct catastrofaal is.

Uit de modelberekeningen blijkt dat de afslaglengte, gegeven de locatie specifieke golfcondities en dwarsprofielen, in de orde van 10 à 15 m is. Om deze 10 à 15 m wordt nog een flinke onzekerheidsmarge verwacht. Dit zal naar verwachting voor een significant aantal profielen mogelijk leiden tot een doorbraak. Omdat de dijken vrij breed zijn, en de hoogste golven laag op het talud optreden zal dit niet overal het geval zijn en is het waarschijnlijk niet zo, dat zeer snel catastrofaal falen zal optreden. Er is ruimte voor noodmaatregelen. Als belangrijke kanttekening wordt hier genoemd dat niet is gekeken naar de combinatie van langsstroming en golfafslag. Deze combinatie kan mogelijk veel sneller tot een doorbraak leiden.

#### **Schades, beheer en onderhoud**

De meest relevante voorkomende schades langs de Overijsselse Vecht die een direct effect hebben op de overstromingskans zijn graverij van konijnen, honden en kale plekken door droogte/engerlingen. Het is niet realistisch om deze schades met een intensief inspectieregime volledig uit te sluiten. Direct catastrofaal falen van de dijk bij aanwezigheid van schade in combinatie met hoogwater is niet waarschijnlijk, ondanks dat het een zanddijk betreft. Het ontstaan van het afslagprofiel vergt namelijk de nodige tijd. De golfcondities zijn niet extreem, de dijk is vrij breed door flauwe taluds en soms ook een brede kruin en de kans op golfoverslag is relatief gering. Aanbevolen is om de invloed van schades mee te nemen in de grootschalige erosieproeven, wat ook is gedaan.

Het scenario waarbij de grasbekleding door een extreem droge zomer gedeeltelijk afsterft en zijn erosiebestendigheid grotendeels verliest wordt door het waterschap gezien als een incident. Hiertegen zijn maatregelen getroffen (beschikbaarheid van grote hoeveelheden bekrammingsmateriaal) en te treffen: besproeien en proeven met mestgiften om de hoeveelheid organische stof en daarmee het vochtvasthoudend vermogen van de bekleding te verhogen. In Fase 2 zijn grasbekledingen die in de zomer van 2018 waren afgestorven uit



de scope van het project gehaald. Grasbekledingen die beschadigd zijn en herstellend zijn wel meegenomen in de grootschalige proeven in Fase 2 van het onderzoek.

De rapportage van P2 Relevantiestudie heeft de beslissing voor een 'go' ondersteund.

### D.1.3 P3 Vegetatie en bodem eigenschappen

Op 55 locaties langs de Vechtdijk zijn vegetatieopnames gedaan en is bodemonderzoek uitgevoerd. Het doel hiervan was om de ruimtelijke variabiliteit in beeld te brengen en tot een keuze te komen voor 10 nader te onderzoeken locaties voor grastrekproeven en aanvullend wortelonderzoek. Uit deze 10 locaties zijn vervolgens 5 locaties bepaald voor onderzoek met grootschalige erosieproeven.

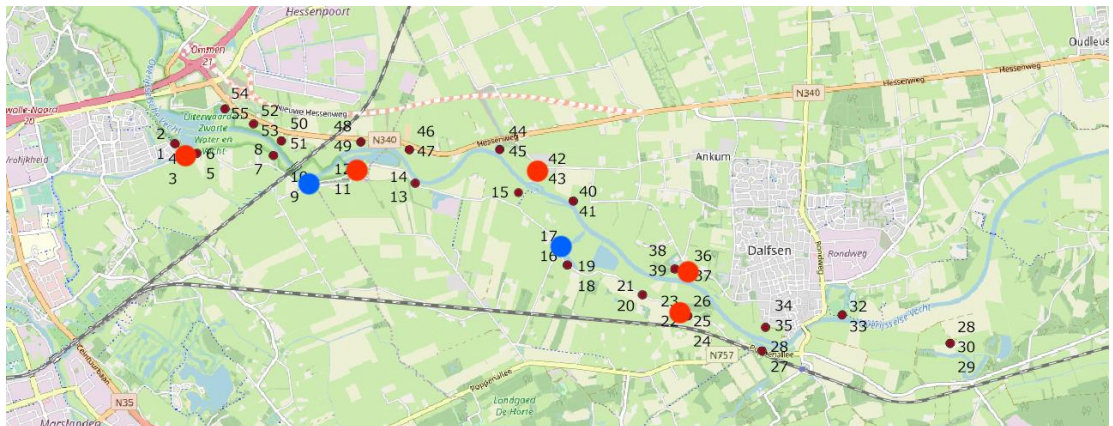
Op basis van kwantitatieve analyses, waarin vooral gekeken is naar de ruimtelijke spreiding van soorten aantallen en bedekkingen en bodemsamenstellingen is er binnen beide normtrajecten een vrij gelijkwaardige situatie. Opvallend is hierbij dat de variatie van vegetatie tussen de trajecten nauwelijks verschilt, maar dat zelfs binnen- en buitentaluds slecht te onderscheiden zijn op basis van de soortencombinaties. Hierdoor lijkt expositie weinig effect te hebben op algemene bedekkingen en bovengrondse biomassa. De nutriëntenbeschikbaarheid in de bovenste 15 cm van de toplaag, lijkt vrij homogeen te zijn en verhoudt zich nauwelijks tot verschillen in de soortensamenstelling. Dit geldt ook voor de verhoudingen van bodemgranulering over het gehele spectrum van locaties binnen de normtrajecten. Hoewel omgevingsfactoren niet verklarend zijn voor deze variatie, zijn deze bodemfactoren van invloed op de soortensamenstelling.

Toch is er wel degelijk variatie. Dit zijn met name kwalitatieve verschillen in onder meer de soortensamenstelling. Deze variatie kan ecologisch een grote impact hebben op het functioneren van de grasbekleding met betrekking tot doorworteling en daarmee de sterkte van de zode. De soortenrijkdom verschilt aanzienlijk met in sommige opnamen 6 en in andere 30 soorten en dit is positief gecorreleerd met de totale bedekking van de zoden. Wél heeft expositie een belangrijk effect op de soortensamenstelling. Mogelijk spelen ook niet gemeten factoren een rol in de verklaring voor de verschillen. Zo kan de droogte tijdens de afgelopen groeiseizoenen mogelijk een verklaring zijn voor de aanwezigheid van open pionierssituaties met weinig soorten, meestal op arme bodems. Ook kan de conditie van de zode samenhangen met het onderliggende bodemprofiel. Holtpodzol en Slikvaaggronden leiden tot weinig onderscheid in bekleding maar op Slikvaaggronden (micropodzol) is vaker een open vegetatie te vinden. Deze verschillen in vegetatie kunnen resulteren in verschillen in de doorworteling en worden daarom meegenomen in de afweging van de advieslocaties voor vervolgonderzoek. Verschillende zand-, lutum en siltgehalten correleren met verschillen in de soortensamenstelling, met name de kruiden. Binnen de trajecten zijn er de afgelopen jaren (externe) verstoringen opgetreden, waarvan de extreme droogte het meest in oog springt. Enkele plekken binnen de trajecten zijn dusdanig beïnvloed door de droogte dat ze nog herstellende zijn (hergroei van de vegetatie uit zaden of wortels) en daarom zijn niet alle locaties representatief voor het gehele dijktraject of het beeld van de vegetatie op langere termijn.

Een verschillende combinatie van soorten, met name in de verhoudingen tussen (bedekkende) kruiden en grassen, zijn mogelijk direct te relateren aan doorworteling en mogelijk erosiebestendigheid. Een groter aandeel kruiden, vaak zelfs soortafhankelijk, leidt potentieel tot een andere doorworteling dan een vegetatie waar grassen dominant zijn. Niet alleen zijn kruiden in staat om dieper te wortelen, maar ook kan de verdeling van wortels van kruidachtige plantensoorten over het bodemprofiel beter zijn. Waar de bulk van de wortels in door gras gedomineerde bekledingen vaak beperkt is tot de bovenste vijf centimeter, kunnen kruiden meerdere lagen verankeren. Verschillen in bodemtypen kunnen hier effect op hebben, niet alleen ruimtelijk, maar ook temporeel. Een voorbeeld is dat tijdens een droogte een lutumrijkere bodem voor een hoger watervasthoudend vermogen kan zorgen, dat de vegetatie enkele dagen langer kan onderhouden vergeleken met zeer zandige bodems. Dit

vertaalt zich terug in de soortensamenstelling. Om tot een goed beeld te komen van de situatie op de Vechtdijken dient deze variatie te worden meegenomen in verder onderzoek.

Om tot een advies voor een tiental verder te testen locaties te komen is een stapsgewijze redenering gevolgd. Om de variatie op de dijktrajecten binnen de scope van dit onderzoek te vangen en tevens een goede correlatie te kunnen maken tussen soortensamenstelling, doorworteling en erosiebestendigheid, dienen de locaties die het meest van elkaar verschillen meegenomen te worden in het verdere onderzoek. De soortensamenstelling is hierbij de leidraad, omdat deze verantwoordelijk is voor de doorworteling. Hiertoe worden locaties aangewezen die zowel in soortenrijkdom en kruidenbedekking van elkaar verschillen (meer kruiden betekent mogelijk een diepere doorworteling) als ook de soortensamenstelling zelf (op basis van dissimilariteit). Op basis hiervan is gekomen tot 10 voorkeur locaties voor nader onderzoek en 4 reservelocaties (Bijlage Figuur D.1 ).



Bijlage Figuur D.1 Locaties van de geadviseerde proefvlakken. Voorkeur (rood) en reservelocaties (blauw)

#### D.1.4 P4 Locatiekeuze grootschalige proeven en proefprogramma

In voorbereiding op de keuze voor de grootschalige erosieproeven zijn op dertien van de veertien voorgeselecteerde locaties grastrekproeven uitgevoerd. De resultaten zijn samen met de eerdere bepaalde bedekkingsgraad en granulaire samenstelling samengevat in Bijlage Tabel D.1. De grastrekproeven geven een schatting van de kritische stroomsnelheid en daarmee van de erosiebestendigheid van de grasbekleding. De gemarkeerde locaties uitgekozen voor grootschalige erosieproeven. De keuze is gemaakt op basis van een representatieve verzameling op basis van de grastrekproefresultaten, bedekking, bodemtype en uitvoerbaarheid.

Bijlage Tabel D.1 Samenvatting parameters vooronderzoek voor eerste selectie locaties (De gemarkeerde locaties zijn de locaties voor grootschalige erosieproeven). Mos wordt niet meegenomen in de totale bedekkingsgraad

Locatie	Bedekking (%)				Bodemtype	Granulair (%)			U <sub>c,grastrekpr.</sub> (m/s)
	Tot.	Gras	krd.	mos		Lutum	Silt	Zand	
9-1_14.0_bita	82	96	4	70	Slikvaaggr.	1,2	8,1	90,7	5,4
9-1_14.0_buta	60	50	50	60	Holtpodz.	1,3	8,2	90,5	5,5
9-1_18.2_bita	84	98	2	70	Slikvgr. Micropz.	2,4	9,9	87,7	5,7
9-1_18.2_buta	83	74	26	2	Slikvgr. Micropz.	3,3	10,2	86,5	5,8
53-3_101.7_buta	97	96	4	4	Slikvaaggr.	4,1	9,9	86,0	5,1
53-3_103.4_buta	93	91	9	45	Slikvaaggr.	3,1	11,2	85,7	5,9
53-3_107.1_bita	88	93	7	2	Holtpodz.	2,5	7,7	89,8	-
53-3_107.1_bita	-	-	-	-	-	7,0	29,0	61,0	5,4
53-3_107.1_buta	93	83	17	30	Holtpodz.	2,7	8,7	88,6	4,0
53-3_108.9_bita	85	96	4	40	Slikvaaggr.	3,7	9,0	87,3	4,9
53-3_108.9_buta	65	97	3	45	Slikvaaggr.	3,2	8,7	88,1	5,0
9-1_16.4_bita_A	50	73	27	85	Slikvgr. Micropz.	1,5	8,2	90,3	5,7
9-1_16.4_bita_B*	-	-	-	-	**	2,0	14,0	80,0	4,9

De taluds bevatten naar verwachting relatief erosiebestendige en minder erosiebestendige grasbekledingen binnen de beschouwde dijken, waardoor een breed beeld wordt verkregen. Verwacht wordt dat met de resultaten van grootschalige proeven op deze taluds een binnen de projectmogelijkheden zo compleet mogelijk beeld van de erosiebestendigheid wordt verkregen.

Het proefprogramma voor golfoverslag is zodanig bepaald dat dit naar verwachting zou leiden tot falen binnen de voorziene proefduur en daarnaast ook aansluit bij de maatgevende condities langs de Vechtdijk. Bij golfoverslag worden langs de Vechtdijk golfhoogtes H<sub>m0</sub> (m) verwacht tot circa 0,5 m, maar veelal wat lager. De opgelegde belasting bestond uit opvolgende toenemende golfoverslagdebieten van 1 l/s per m tot en met 190 l/s per m bij een gesimuleerde significante golfhoogte van 0,5 m en 1 m (Bijlage Tabel D.2). Elke stormconditie duurt 5 uur. De significante golfhoogte van 1 m werd noodzakelijk geacht om voldoende zekerheid te hebben dat falen van de grasbekleding wordt bereikt op basis van het vooronderzoek P1.

Bijlage Tabel D.2 Karakterisering golfoverslagbelasting

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

Het proefprogramma voor de golfklapproeven is overgenomen van de proeven die zijn uitgevoerd voor het project Zwolle-Olst en bestaat uit het simuleren van de hoogste circa 1/3 van de golven, gekarakteriseerd door een significante golfhoogte van 0,6 à 0,7 m. Verwacht werd dat de grasbekleding langs de Vechtdijk slechts enkele uren zal standhouden.

Een mogelijk belangrijk aspect bij het functioneren van een gras op zandbekleding is de invloed van schade aan de grasbekleding op het faalgedrag. Schade door droogte en graverij door mollen was aanwezig op de gekozen locaties.

## D.2 Fase 2 Grootschalige erosieproeven

### D.2.1 P6 Factual report

In het winterseizoen van 2020-2021 zijn grootschalige erosieproeven uitgevoerd. De feitelijke rapportage van deze proeven betreft P6. Op de vijf geselecteerde locaties zijn op 8 stroken golfoverslagproeven uitgevoerd. De resultaten staan samengevat in Bijlage Tabel D.3.

De proeven zijn hoofdzakelijk uitgevoerd met de golfploopsimulator, één proef is uitgevoerd met de golfoverslagsimulator (WOS). De keuze voor de golfploopsimulator is gemaakt vanwege de grote hoeveelheid relatief kleine golfoverslagvolumes dat moest worden gesimuleerd en waarvoor het klepmechanisme van de golfploopsimulator beter geschikt is.

Gekeken is wanneer gedurende de proef eventuele schade en of falen van de grasbekleding optrad. Ondanks dat op voorhand was ingeschat dat het belastingprogramma waarschijnlijk tot falen zou leiden bleek dit toch vaak niet het geval (Bijlage Tabel D.3). De aanduiding van de proef in de tabel is als volgt: GO190\_1,0 betreft de Golfoverslagproef met een golfoverslagdebiet van 190 l/s per 'm bij een gesimuleerde significante golfhoogte van 1,0 m. Alle voorgaande proeven (zie Bijlage Tabel D.2) heeft de proefstrook dan al gehad.

*Bijlage Tabel D.3 Overzicht golfoverslagproeven en momenten van falen of het optreden van schade*

Strook	Moment schade tijdens proefprogramma	Moment falen tijdens proefprogramma
<b>53-2 103.4</b> <b>1-1a Buitentalud Berkum</b>	3 uur GO190_1,0 vak 4 en 14	Geen falen
<b>53-2 103.4</b> <b>1-2 Buitentalud Berkum</b>	5 uur GO50_1,0 vak 5	1,5 uur GO190_1,0 vak 5
<b>53-2 103.4</b> <b>1-1b Buitentalud Berkum (WOS)</b>	5 uur GO190_1,0 vak 16	Geen falen
<b>9-1_14.0</b> <b>2-1 Buitentalud volkstuin</b>	5 uur GO50_1,0 vak 8	2 uur GO100_1,0 vak 8
<b>9-1_14.0</b> <b>2-2 Binnentalud volkstuin</b>	5 uur GO100_1,0 vak 2	Geen falen
<b>9-1_18.2</b> <b>3-1 Hessenweg binnentalud</b>	3,25 uur GO190_1,0 vak 6	Geen falen
<b>9-1_18.2</b> <b>3-2 Hessenweg buitentalud</b>	Geen schade	Geen falen
<b>9-1_18.2</b> <b>3-3 Hessenweg binnentalud - kort gras en graverij)</b>	2,5 uur GO100_1,0 vak 5 en 6	1 uur GO190_1,0 vak 10

Bij de strook 9-1\_18.2 zijn na afloop van de reguliere proef schades aangebracht. Hier wordt verder op ingegaan in Bijlage B.

Bij elke strook zijn de frontsnelheden gemeten voor verschillende volumes en op verschillende afstanden langs het talud.

Op de buitentaluds zijn naast de golfoverslagproeven ook golfklapproeven uitgevoerd. Hiervoor is gebruik gemaakt van de golfklapproefgenerator, waarmee een golfklapbelasting kan worden opgelegd die vergelijkbaar is met een golfaanval met een significante golfhoogte van 0,6 à 0,7 m. De proefresultaten in termen van standtijd, inclusief hierbij te plaatsen opmerkingen, zijn samengevat in Bijlage Tabel D.4.

Bijlage Tabel D.4 Samenvatting resultaten golfklapproeven

Locatie	Standtijd golfklapproef (uur)	Opmerkingen
53-3 dijkpaal 103,4 – Testsectie 1A	15,9	Geen falen
9-1 dijkpaal 14.0 – Testsectie 2A	4,4	Falen
9-1 dijkpaal 18.2 – Testsectie 3A	8,7	Falen

Naast de proefresultaten in termen van belasting waarbij schade of falen optrad hebben de grootschalige proeven veel inzicht gegeven in het faalgedrag van gras op zandbekledingen. De gras op zandbekleding gedraagt zich onder een erosieve belasting door golfoverslag of door golfklappen als een twee lagen systeem. Deze twee lagen zijn samen de toplaag met een dikte van 0,3 à 0,4 m en bestaat uit een bovenste laag van circa 0,1 m (de zode) met een zeer fijn wortelnet en een hieronder gelegen laag van circa 0,2 à 0,3 m met veel minder wortels. Deze onderlaag die ook uit zand bestaat, gedraagt zich echter als samenhangend (Bijlage D.2).



Bijlage Figuur D.2 Illustratie schade en doorbraak van de toplaag op de Vechtdijk, onderscheid tussen zode, toplaag en kernmateriaal (zode is onderdeel van de toplaag). Linksboven: toplaag doorgebroken; rechtsboven: schade; linksonder: toplaag doorgebroken; rechtsonder: toplaag doorgebroken

Het falen van de gras op zandbekleding gebeurt in twee fasen, als eerste ontstaat er bij een hoge belasting ergens een gaatje in de zode. Deze schade breidt zich vooral in oppervlakte uit, met name in stroomafwaartse richting (bij golfoverslag) of van het impactpunt af (bij golfklappen). De zode wordt als het ware afgestroopt. Bij een doorgaande belasting slijt de tweede laag langzaam door totdat ook deze laag doorbreekt. Dit faalgedrag komt overeen met grasbekledingen op een substraat van klei, echter de toplaag is bij gras op klei in de orde van 0,2 m, dus wat dunner dan bij gras op zand. Onder de toplaag bevindt zich los zand en als de stroming hier vat op krijgt, dan gaat erosie ineens veel sneller. De samenhangende toplaag van circa 0,3 à 0,4 m dikte wordt ondermijnd en brokkelt af in de erosiekuil. De observatie van een samenhangende toplaag met een dikte van 0,3 à 0,4 m is gezien bij alle beschikbare erosieproeven op grasbekledingen op een substraat van zand. Gedacht wordt dat het mechanisme van interne slemp verantwoordelijk kan zijn voor de samenhang in het zand in de toplaag. Ook is gezien dat de doorworteling tot deze diepte van 0,3 à 0,4 m komt. Waarschijnlijk zijn de diepere wortels met name afkomstig van de aanwezige kruiden. Grassen wortelen in het algemeen minder diep.

Door deze opbouw van de toplaag blijkt een gras op zandbekleding niet heel gevoelig voor kleine beschadigingen die niet door de toplaag heen gaan (zie Bijlage B). Het faalgedrag van de toplaag is ten opzichte van gras op klei ook niet anders. Soms was het verschil tussen schade en falen toplaag bij klei zelfs korter dan bij de gras op zand proeven.

#### **D.2.2 P7 Wortelonderzoek**

Na het vegetatie en bodemonderzoek in fase 1 is gelijktijdig met en op dezelfde locaties als de grastrekproeven wortelonderzoek uitgevoerd. Het doel van dit onderzoek was het vinden van relaties tussen vegetatie, het wortelstelsel dat wordt gekarakteriseerd met diverse parameters (lengte/ massa/ dichtheid, totaal en per diepte) en de resultaten van de grastrekproeven.

De studie leidt tot de conclusie dat op basis van de hier beproefde locaties de zandige dijken langs de Overijsselse Vecht vrijwel overal goed doorworteld zijn. Op basis van de vegetatie van de hier bestudeerde proeflocaties en de opnamen die in P3 (Fase 1) zijn gepresenteerd, wordt verwacht dat de homogene vegetatie een eveneens homogene doorworteling representeert over de beide dijktrajecten. Zeker in de bovenste 10 cm is de doorworteling vrijwel overal gelijk. In diepere lagen zorgen kruidachtige plantensoorten voor meer wortels. Op proefvlakniveau heeft de doorworteling, en met name de wortellengte en de worteldichtheid, een positief verband met de kritische normaalspanning uit de grastrekproeven. Proefvlakken met een wat hoger lutumgehalte hebben een wat geringere worteldichtheid en ook lagere kritische normaalspanning. De minimale doorworteling correleert goed met de berekende kritische stroomsnelheid op basis van de grastrekproeven. Op subplot niveau is deze relatie niet aantoonbaar, mogelijk spelen hier andere ruimtelijke processen, die mogelijk minder relevant zijn voor het bepalen van de erosiebestendigheid. Over het algemeen is de variatie tussen de proefvlakken relatief klein, waardoor binnen deze studie er een goed beeld is verkregen van het, over het eveneens homogene spectrum aan grasbekledingen op de zanddijken langs de Overijsselse Vecht.

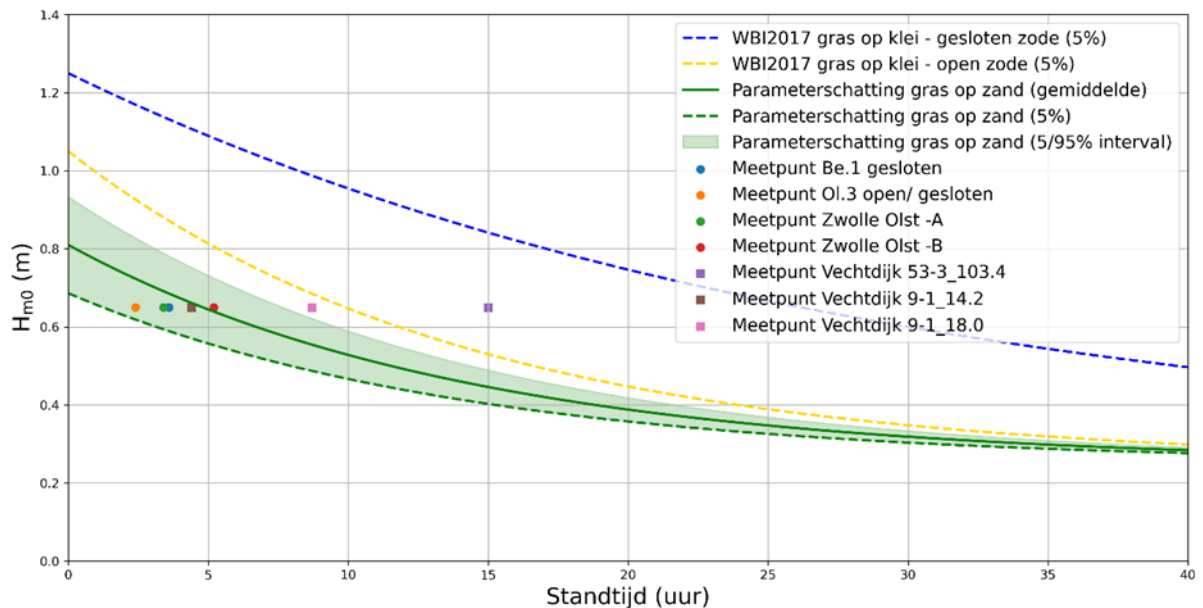
### **D.3 Fase 3 Analyse**

#### **D.3.1 P8 Analyse**

De resultaten van de grootschalige golfoverslagproeven en golfklapproeven zijn samen met de eerdere onderzoeken die zijn gerapporteerd in Fase 1 geanalyseerd en gerapporteerd in P8. Op hoofdlijnen zijn de beschikbare grootschalige proefresultaten en de bestaande erosiemodellen voor gras op klei gebruikt om de sterkte van gras op zandbekledingen terug te rekenen. Ook is gekeken of er duidelijke correlaties waren tussen vegetatie-, bodem- of wortelparameters, de erosieparameter  $U_c$  uit grastrekproeven en de erosieparameters op basis van grootschalige erosieproeven. Dit leidde echter niet tot eenduidige relaties, anders

dan dat de  $U_c$  uit de treksterkte een schatting aan de lage kant geeft van de  $U_c$  op basis van grootschalige golfverslagproeven.

Voor de onderbouwing van standtijdlijnen voor gras op zand in de golfklapzone waren negen proefresultaten beschikbaar; twee proefresultaten bij een kleine golfhoogte in een golfgoot en zeven proefresultaten met de golfklapgenerator, waarvan drie in het kader van dit project op de Vechtdijk. De spreiding in de standtijden bij de golfklapgeneratorproeven is relatief groot. De proeven waren niet voldoende in aantal en onderscheidend naar een bepaalde parameter om onderscheidende verzamelingen te maken. Alle data is als één set beschouwd. Dit heeft geleid tot standtijdlijnen welke afhankelijk van de gewenste onderschrijdingskans kunnen worden bepaald. Voor de 5% onderschrijdingskans en voor het gemiddelde staan de lijnen en parameters a, b en c in Bijlage Figuur D.3 .



Bijlage Figuur D.3 Schatting van de standtijdlijnen gras op zand op basis van de 5% ondergrens en het gemiddelde en de bijbehorende parameters a, b en c (rechts)

De verdeling van standtijdlijnen is gebruikt voor het bepalen van rekenwaarden in een semi-probabilistische beoordeling voor gras op zand in de golfklapzone in P9.

Bij het gebruik van de standtijdlijnen geldt het voorbehoud van een gesloten zode (op zand) conform de WBI2017 omschrijving.

Er is bij deze standtijdlijnen geen rekening gehouden met de invloed van schades, bijvoorbeeld door graverij. Zonder nadere onderbouwing kan worden verondersteld dat een gras op zandbekleding in de golfklapzone significant verzwakt zal worden door graverij indien dat voorkomt. In een apart hoofdstuk over risico gestuurd beheer en onderhoud zijn handvatten gegeven over hoe hiermee kan worden omgegaan, waarbij wordt gekeken naar de overstromingskans in relatie tot het negatieve effect van graverij, het ondervangen hiervan door inspecties en reparaties, het in rekening brengen van reststerkte en de invloed van noodmaatregelen voor en tijdens hoogwater.

Voor erosie door golfverslag waren voor de onderbouwing van de kansverdeling van de kritische frontsnelheid  $U_c$  voor gras op zand 17 proeven beschikbaar op 10 locaties. Vier proeven op de Vechtdijk uit 2010, vier op de IJsseldijk voor het project Zwolle Olst en negen in het kader van dit project, eveneens op de Vechtdijk. In de meeste gevallen was er geen sprake van falen van de grasbekleding. Dit ondanks een opgelegde golfverslagbelasting die ruim uit gaat boven wat voor de Vechtdijk voorstelbaar is.

Voor proeven waar geen falen van de grasbekleding optrad, maar wel schade, is de  $U_c$  gebaseerd op het (minder betrouwbare) criterium voor schade. Daar waar ook geen schade optrad is teruggerekend welke  $U_c$  minimaal aanwezig was en is deze gebruikt. Op deze manier zijn voor de 17 proeven en 10 locaties 10 waarden van  $U_c$  berekend. De verzameling geeft een gemiddelde van 5,5 m/s en een variatiecoëfficiënt van 0,19 (-). Er wordt uitgegaan van een normale verdeling. Dit is een wat lager gemiddelde dan voor een open zode op klei (6 m/s) en de variatiecoëfficiënt is groter (0,125 voor gras op klei).

De kanttekeningen en voorwaarden bij de kansverdeling van  $U_c$  zijn als volgt samengevat:

- Afbakening substraat. De granulaire bodemsamenstelling (verouderde NEN5104) en vooral de eigenschappen (vigerende NEN-EN-ISO 14688) van het substraat van de IJsseldijk en de Vechtdijk vallen in de definitie zand. Voor klei gelden de  $U_c$  en  $q_c$  voor gras op klei, zoals gegeven in het WBI2017. Voor gras op veen en gras op leem bestaan geen rekenwaarden. Er vanuit gaande dat gras op leem een resultaat geeft tussen gras op klei en gras op zand, kan veiligheidshalve worden uitgegaan van de rekenwaarden voor gras op zand, of kan specifiek onderzoek worden verricht naar beter passende rekenwaarden.
- De bodemontwikkeling van het substraat tot aan het moedermateriaal moet vergelijkbaar zijn met die bepaald in het kader van dit project [4].
- De kwaliteit van de vegetatie voldoet aan de gestelde voorwaarden voor een gesloten zode, conform het WBI2017. Hierbij is het visuele aspect van de geslotenheid van de bovengrondse plantdelen niet doorslaggevend, net zoals in het WBI2017, maar de stevigheid van het wortelnet, te beoordelen door het steken van een plag. Ook voor gras op zand geldt het voorbehoud dat ruigtebegroeiing, pionierssoorten zoals bijvoorbeeld brandnetel en distels, worden uitgesloten. Over de erosiebestendigheid hiervan is onvoldoende bekend. Deze soorten worden met beheer en onderhoud gericht op de ontwikkeling van een grasmat bestreden. Correlaties met andere vegetatieparameters, soortensamenstelling of de verhouding tussen kruiden en grassen, zijn niet voldoende uitgediept om hier een helder criterium uit af te leiden.
- (Fiets)paden op de kruin: Conform de scope van het project worden overgangen van op de kruin liggende (fiets)paden wel meegenomen bij de bepaling van de  $U_c$ . Dit betekent dat voortijdig falen van de grasbekleding als gevolg van het aanwezig zijn van deze overgang is verdisconteerd in de (kans)verdeling van de  $U_c$ . Dit heeft geleid tot een wat lagere  $U_c$ . De resultaten van de proeven op de IJsseldijk gaven wel schade, maar geen falen op deze overgang. Ook hier is het effect beperkt. Dit betekent dat voor dijken zonder een (fiets)pad de rekenwaarden voor de  $U_c$  iets aan de lage kant zullen zijn. Verwacht wordt dat dit in een veiligheidsbeoordeling niet veel zal uitmaken. Daarnaast was voor locatie 9-1\_14.0, zonder (fiets)pad op de kruin, wel een verzwakking aanwezig door veelvuldig betreden van de kruin door wandelaars. Ook dit effect zit in de  $U_c$  verwerkt door de resultaten van strook 2-1 en 2-2. Voorwaarde voor het meenemen van de overgang tussen het fietspad en de kruin is een nette aansluiting van de grasbekleding op de verharding. Dit betekent dat de gesloten zode tot aan de verharding gekarakteriseerd kan worden als gesloten. Het wortelnetje blijft dicht gewoven tot aan de overgang en sluit hierop aan. *Opgemerkt wordt dat de gekozen aanpak om het effect van een fietspad op de kruin mee te nemen in de  $U_c$  in plaats van in invloedsfactoren  $\alpha_M$  en  $\alpha_S$  een afwijking is van de reguliere modellering de cumulatieve overbelasting. Er moet worden opgelet dat in de toekomst hierdoor geen dubbeltelling gaat optreden als de cumulatieve overbelasting direct in het BOI wordt geïmplementeerd en voor de aanwezigheid van een fietspad aanvullend invloedsfactoren voor het fietspad worden gehanteerd.*
- Graverij: Net zoals voor gras op klei wordt bij de  $U_c$  bepaling uitgegaan van de onvermijdelijke aanwezigheid van dierlijke graverij tot en met het formaat van muizen en mollen. In veel van de proefstroken waren mollengangen aanwezig. In enkele proefstroken zelfs veel mollengangen. Dit heeft op twee stroken geleid tot eerder falen van de grasbekleding en daarmee tot een lagere  $U_c$ . Grotere graverij is niet



verdisconteerd in de kansverdeling van de  $U_c$ . De proeven die uitgevoerd zijn op gesimuleerde graverij van konijnen, honden en vossen geven wel aan dat de graverij zeker niet altijd direct kritisch is. Net als voor schades bij golfklappen wordt in een apart hoofdstuk over risicogestuurd beheer en onderhoud aandacht besteed aan deze schade, inspectie, reparatie, reststerkte en noodmaatregelen in het licht van het risico op een overstroming. Het advies is om in het kader van beoordeling en scopebepaling het geschetste handelingsperspectief voor de Vechtdijken expliciet af te wegen om zo te komen tot een doelmatige combinatie van beheer en onderhoud en versterkingsmaatregelen.

### D.3.2 P9 Kalibratie

Op basis van de gevonden kansverdeling voor  $U_c$  in P8 en de aanpak voor de afleiding van kansverdelingen voor het kritisch golfoverslagdebiet zoals uitgevoerd in het kader van het OI2014 versie 4, zijn voor gras op zand kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet bepaald (Bijlage Tabel D.5).

*Bijlage Tabel D.5 Rekenwaarden parameters lognormale kansverdeling van het kritisch golfoverslagdebiet voor gras op zandbekledingen*

$H_{m0}$ (m)	$\mu$ (l/s per 'm)	$\sigma$ (l/s per 'm)
0,4	236	636
0,8	12	9
1,2	9	6

Net 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) 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 (Bijlage Tabel D.6).

*Bijlage Tabel D.6 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 kalibratie heeft zich gericht op de situatie op de Overijsselse Vecht, echter gras op zandbekledingen komen ook elders voor. De resultaten van de kalibratie zijn geldig voor de belastingsituatie zoals voorkomt langs de Vecht, met name de belastingduur, en ze zijn geldig voor sterktes die vergelijkbaar zijn met die langs de Vecht. Voor het toepassen van het resultaat voor andere dijken dan de Overijsselse Vechtdijk worden daarom aanvullende eisen gesteld, namelijk dat deze zich langs rivieren bevinden (gelijkwaardige belastingduur), en dat deze een vergelijkbare sterkte hebben (gesloten zode, substraat van zand, een bodemstructuurvorming vergelijkbaar met die op de Vechtdijk).

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

**Deltares**

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