

Eindadvies beoordeling gras op zandbekledingen



Eindadvies beoordeling gras op zandbekledingen

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

Documentgegevens

Versie	2.0
Datum	22-11-2022
Projectnummer	11204369-009
Document ID	11204369-002-GEO-009
Pagina's	80
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord
0.1	A. van Hoven	T. Stoutjesdijk	G. de Vries
1.0	A. van Hoven	T. Stoutjesdijk	G. de Vries
2.0	A. van Hoven 	T. Stoutjesdijk  Vera van Bergeijk (Bijlage E en F) 	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 ontwerpen van gras op zandbekledingen wordt afgeraden.

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. Deze rapportage is het eindproduct 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.

Naar aanleiding van het advies van ENW (Expertisenetwerk Waterveiligheid), d.d. 15 februari 2022, kenmerk ENW-22-03 zijn aanvullende analyses uitgevoerd naar de versnelling van golfvolumes op het binnentalud, het effect van een hoge grondwaterstand op erosie van de grasbekleding en een variatiestudie gericht op gras op zandbekledingen op het areaal van gras op zandbekledingen buiten de Vechtdijken. De analyses zijn als Bijlage E, F en G toegevoegd in deze versie 2.0 van het rapport.

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

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	Leeswijzer	8
1.3	Uitvoerenden	8
1.4	Kwaliteitsborging	8
2	Overzicht van het onderzoek	9
3	Beoordeling gras op zandbekledingen	11
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	13
3.4	Aanbevelingen bij een toets op maat	13
4	Gevolgen van deze studie voor dijkversterking Vechtdijk	15
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
5	Ervaringen in het project ten aanzien van beheer en onderhoud	18
5.1	Droogte	18
5.2	Risico gestuurd beheer en onderhoud	19
5.3	Aanvulmateriaal bij reparatie schades	19
6	Implementatie in het BOI	21
7	Referenties	22
A	Substraat en bodemontwikkeling	23
B	Ervaringen met graverij	30
B.1	Muizen en mollen	30
B.2	Grotere graverij	30
C	Voorstel aanpassingen en toevoegingen veiligheidsbeoordeling gras op zand in het BOI	35

D	Samenvatting van het onderzoek naar gras op zandbekledingen	39
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
E	Optimalisatie frontsnelheden	50
E.1	Inleiding	50
E.2	Erosiemodel voor grasbekledingen	50
E.3	Golfoverslagvolumes en frontsnelheden op de kruin	51
E.4	Berekening versnelling op het talud	53
E.5	Metingen frontsnelheid op de Vechtdijk	55
E.6	Narekenen gemeten versnellingen	59
E.7	Aangepaste kansverdelingen van q_c	62
F	Effect hoge buitenwaterstand en uittredend grondwater op erosie van de grasbekleding door golfoverslag	64
F.1	Inleiding	64
F.2	Waterspanning bij golfoverslagproeven	64
F.3	Waterspanning in de dijk bij hoogwater en golfoverslag	65
F.4	Waterspanningen op en net onder het talud door golfoverslag	68
F.5	Analyse bijdrage uittredend grondwater aan erosie	70
F.6	Conclusie	71
G	Variatiestudie	72
G.1	Inleiding	72
G.2	Areaal gras op zand dijken	72
G.3	Berekeningen gras op zandbekleding	74
G.3.1	Golfoverslag	74
G.3.2	Golfklappen	76
G.4	Samenvatting en conclusie	79

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. Grootschalige erosieproeven met de golfklapgenerator en de golfploopsimulator, die werd ingezet als golfoverslagsimulator.
3. Analyse van de proefresultaten en de afleiding van rekenwaarden van de erosieparameters. Deze rekenwaarden zijn nodig om de scope van de dijkversterking goed onderbouwd te bepalen.

Na de definitieve rapportage versie 1.0 zijn op advies van ENW drie aanvullende analyses uitgevoerd. Dit betreft de analyse van de versnelling van golfvolumes op het binnentalud, het effect van een hoge grondwaterstand op erosie van de grasbekleding en een korte variatiestudie voor gras op zandbekledingen buiten de Overijsselse Vechtdijken. Deze aanvullende analyses zijn toegevoegd als Bijlage E, F en G.

1.2 Leeswijzer

Dit rapport betreft het eindrapport van het onderzoek. 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 is 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. Dit heeft onder andere geleid tot de analyses in Bijlage E, F en G.

2 Overzicht 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]:
 - Gastrekproeven.
 - 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 erosiebestendigheidsparementers [9]:
 - Kalibratiestudie, afleiding rekenwaarden erosiebestendigheidsparementers 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 erosiebestendigheidsparementers gras op zand (dit rapport).

In Bijlage D bij dit rapport wordt een korte samenvatting gegeven van de bevindingen en conclusies uit de verschillende rapporten per fase.

Naar aanleiding van het advies van ENW (Expertisenetwerk Waterveiligheid), d.d. 15 februari 2022, kenmerk ENW-22-03 zijn drie aanvullende analyses uitgevoerd. Dit betreft ten eerste de versnelling van golfvolumes op het binnentalud. Waargenomen is dat kleine golfvolumes (lage golven) vertragen op het talud in plaats van de standaard aangenomen versnelling. Dit heeft geleid tot een optimalisatie (Bijlage E). Daarnaast is gekeken naar de mogelijke invloed van een hoge grondwaterstand in de dijk op erosie van de grasbekleding.

Voorts is er bij golfoverslagproeven geen hoge buitenwaterstand aanwezig, waardoor er minder uittredend grondwater is te verwachten. Er is gekeken hoe de constante stromingsdruk van uittredend water op het binnentalud zich verhoudt tot het duw- en trekspanningen aan de zode door de turbulente stroming bij grote golfoverslagvolumes en tot de benodigde uittrekkraft van een zode. Op basis van de analyse in Bijlage F wordt vermoed dat de bijdrage van uittredend grondwater aan erosie van de grasbekleding zeer gering is.

Tenslotte is een korte variatiestudie uitgevoerd voor dijken met een gras op zandbekleding, buiten de Vechtdijken. Hier gelden andere hydraulische belastingen. Ook met de erosiebestendigheid van de grasbekleding is gevarieerd. Geconcludeerd wordt dat gras op zandbekledingen op buitentaluds in de golfklapzone zelden zullen voldoen aan de norm. Voor golfoverslag is het beeld wisselend. Dit is verder beschreven in Bijlage G.

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 dijk kern echter wel van belang zijn in de kans op een overstroming [3].

De erosiebestendigheid van een gras op zand bekleding is meer dan bij een grasmat op klei afhankelijk van de gevolgen van extreme droogte. In 2018 zijn delen van de grasbekleding op de Vechtdijk door extreme droogte beschadigd en op enkele kilometers van de zuidelijke hellingen ook afgestorven. De beschadigde en weer bijgetrokken grasbekledingen zijn meegenomen in het onderzoek (grootschalige proef), de afgestorven bekledingen zijn buiten beschouwing gelaten. Een droogte zodanig dat de bekleding op zuid georiënteerde hellingen afsterft is binnen het kader van dit project gezien als een incident, waarvoor noodmaatregelen kunnen worden getroffen (zie ook paragraaf 5.1). De controle of de bekleding beschadigd of dood is kan visueel gebeuren, ondersteund door het steken van een plag (zie toepassingsvoorwaarde 'gesloten zode').

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)	μ (l/s per 'm)	σ (l/s per 'm)
0-0,4	236	636
0,4-0,8	12	9
0,8-1,5	9	6

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 frontsnellheid U_c (m/s). Op basis van het uitgevoerde onderzoek wordt aanbevolen om voor de kritische frontsnellheid 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 (m²/s²).

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 frontsnellheid 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

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.

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 (de combinatie van rekenwaarden van de belasting en sterkte) 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 of de faalkans juist overschat.

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 faalkans 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.

In Bijlage G staat een korte variatiestudie, waarin enkele aanvullende kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet worden gegeven. Dit betreft onder andere een optimalisatie waarbij de frontsnelheden op het binnentalud nauwkeuriger worden beschreven (onderbouwing in Bijlage E). Met name voor kleine golfoverslagvolumes (lage golven) leidt dit tot een wat gunstiger kansverdeling. Aanbevolen wordt om te kijken of en in hoeverre de aanvullende kansverdelingen beter passend zijn bij de beschouwde situatie.

4 Gevolgen van deze studie voor 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

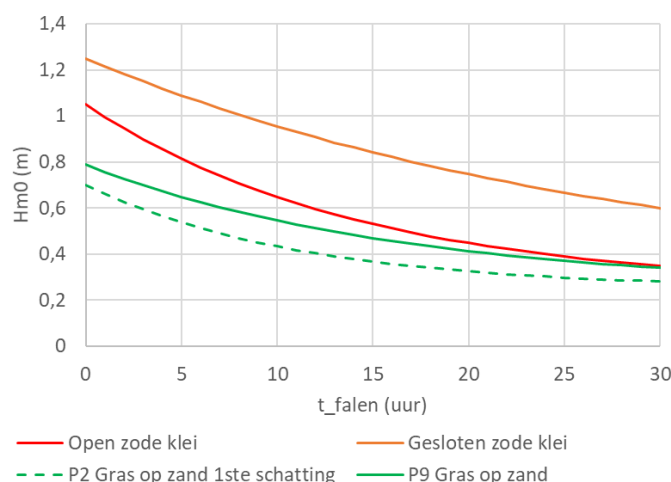
Voor traject 9-1 volgt dat bij een kritisch golfoverslagdebiet van 1 l/s per 'm 40% van de steekproef van 17 profielen voldoet aan de signaleringswaarde. Indien de resultaten van het gras op zand onderzoek worden toegepast dan voldoen 16 van de 17 profielen (95%). Bij alle

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].

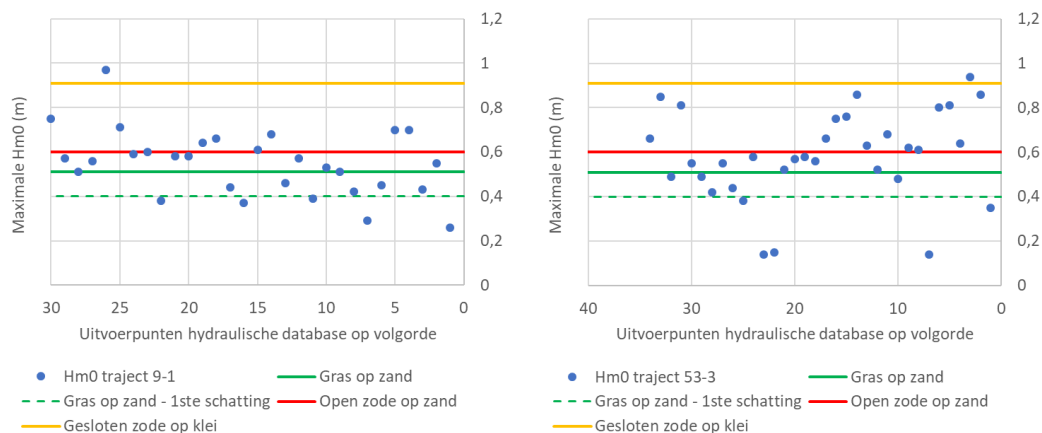
De waterstand op het grootste deel van de Overijsselse Vecht oostelijk van de kruising met de A28 wordt gedomineerd door een hoge afvoer. Hiervoor wordt momenteel een rekenwaarde voor de duur van de golfklapbelasting aangehouden van 12 uur. Voor de verschillende bekledingen zijn bij deze gegeven belastingduur 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 golfbrandvoorwaarden 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 gerichter 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 erosiebestendigheidsparementers worden gehaald. Bij bestaande gras op

zandbekledingen kunnen echter schades 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 μm), 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 golfploopzone. Mocht het toch noodzakelijk blijken om gras op zandbekledingen in de golfploopzone te beoordelen op veiligheid, dan zullen er aanvullende werkzaamheden noodzakelijk zijn met betrekking tot de kalibratie van de erosieparameter U_c voor de golfploopzone en het verdisconteren van de voor golfploop 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.

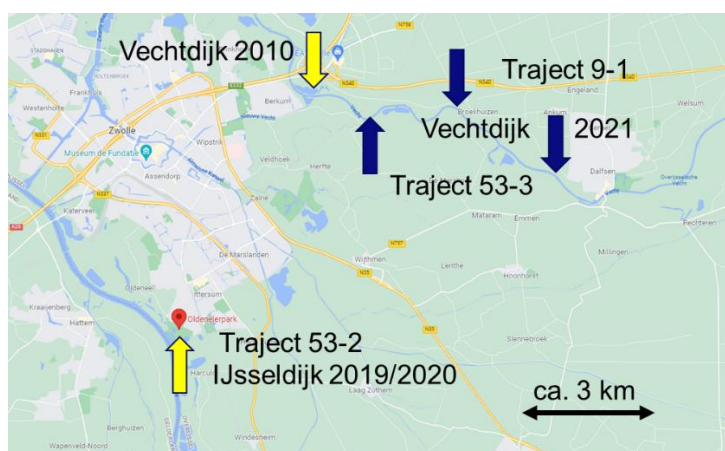
Er zijn geen software aanpassingen noodzakelijk. Alle wijzigingen kunnen worden ondervangen in aanwijzingen in de SH Gras. De voorstellen voor wijzigingen en aanvullingen staan in Bijlage C, uitgaande van een keuze voor een gedetailleerde beoordeling van gras op zandbekledingen.

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.
- [14] Van Bergeijk, V. M., J. Warmink, J.M.H. Hulscher, The effects of transitions in cover type and height on the wave overtoppingload on grass-covered flood defences, Applied Ocean Research, <https://doi.org/10.1016/j.apor.2022.103220>
- [15] EurOtop, 2018. Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B., www.overtopping-manual.com.
- [16] Onderbouwing kansverdelingen kritisch overslagdebiet ten behoeve van het OI2014v4, Deltaresnummer1230090-011-GEO-0006-jvm, versie 3, februari 2017.
- [17] Van der Meer, J.M., Golfoverslagproeven op de Vechtdijken, Hydraulische metingen voor de golfoverslag- en golfploopsimulator, versie 2.0, 3 mei 2021, projectnummer vdm19500
- [18] SBW Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding Fase 4D Evaluatie Vechtdijk, Deltares nummer 1201841-000-GEO-0024, versie 4, december 2010
- [19] Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken deel 1 – bovenrivierengebied, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), ISBN 90-12-05169-X
- [20] Evaluation and Model Development Grass Erosion Test at the Rhine dike, Deltares projectnummer 1207811-002-HYE-0007, versie 2, December 2013
- [21] Van der Meer, J. W., Hardeman, B., Steendam, G. J., Schüttrumpf, H., & Verheij, H. (2010). Flow depths and velocities at crest and landward slope of a dike, in theory and with the wave overtopping simulator. Coastal Engineering Proceedings 2010

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 kleeftkracht 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 Figuur A.2, Figuur A.3, en Figuur A.4.

De benaming van de hier onderscheiden horizonten is als volgt:

- A 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.

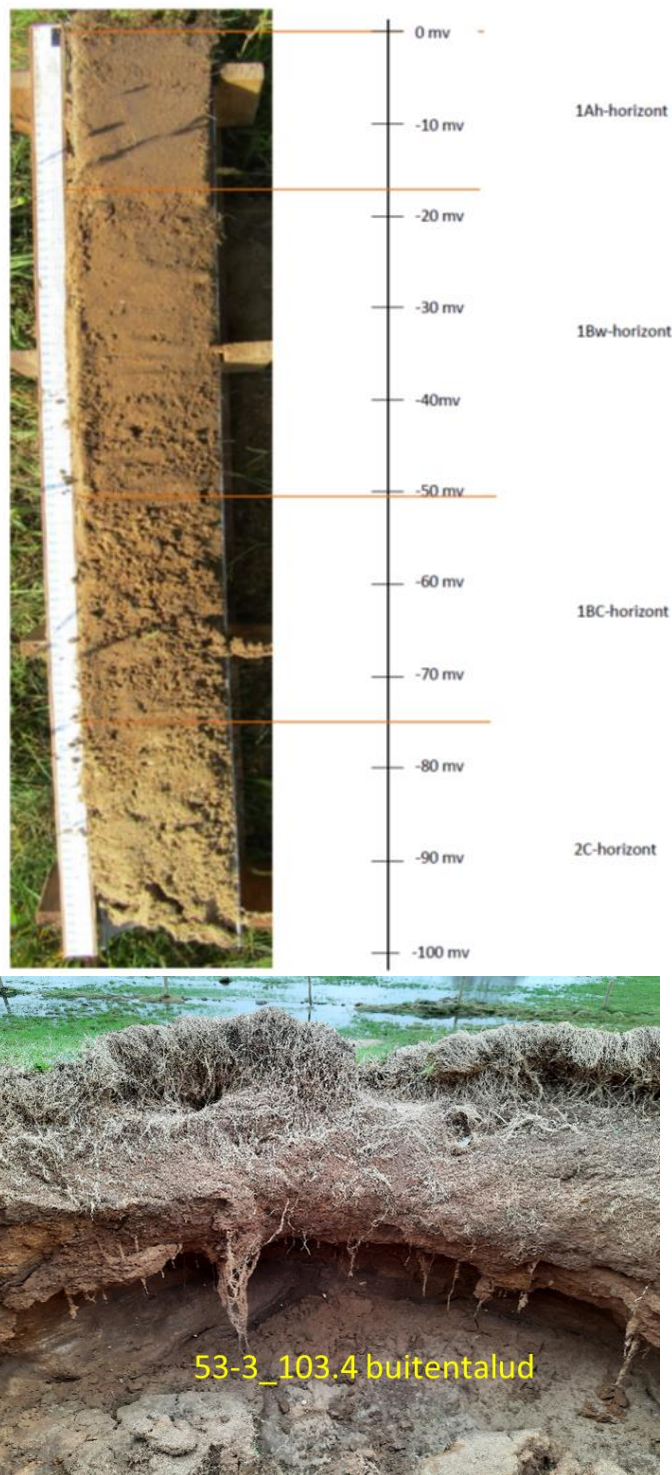
Tussen de beelden van de bodemprofielen zijn de shadebeelden als gevolg van de erosieproeven geplaatst, waarin het bodemprofiel weer is te herkennen. Het moedermateriaal C-horizont is het losse materiaal dat makkelijk wegspoelt. De A en B horizonten zijn, in elk geval onder golfoverslag- en golfklapcondities,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

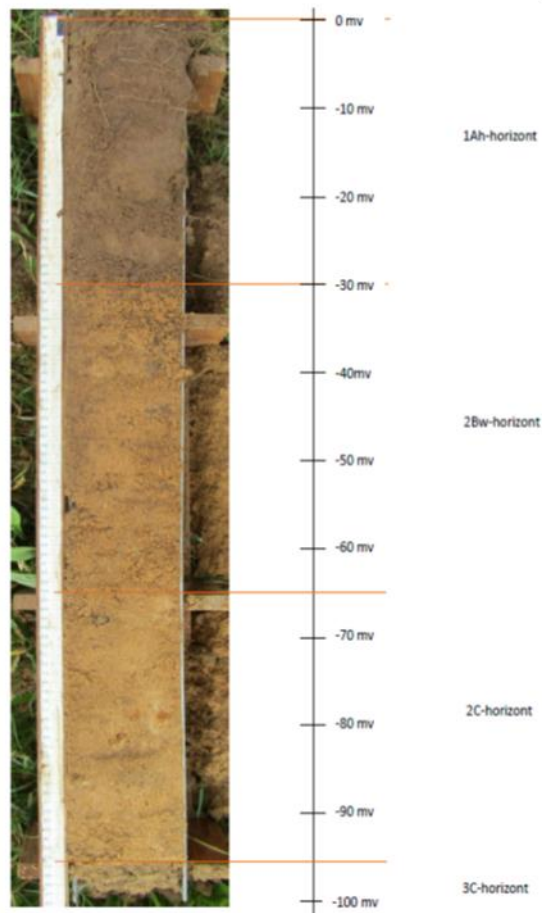
Onbekend is welke van de drie genoemde aspecten in welke mate bepalend is voor de geobserveerde erosiebestendigheid.

103.4 buiten

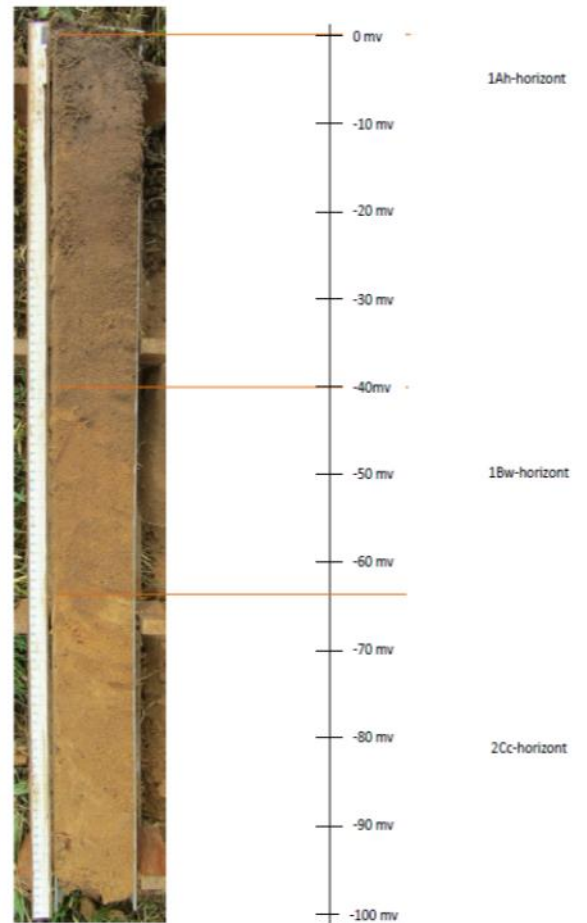


Figuur A.2 Bodemprofiel 53-3 103.4 buiten (boring gestoken voorafgaand aan de erosieproef).

14.0 binnen

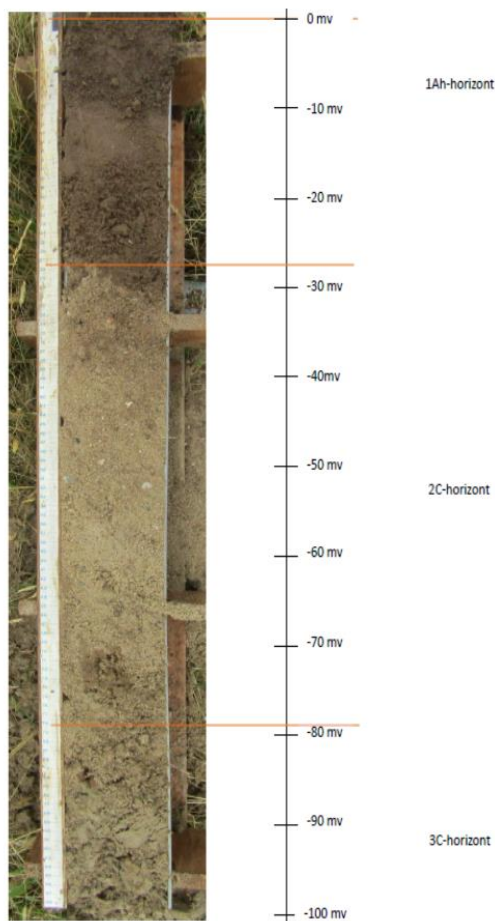


14.0 buiten

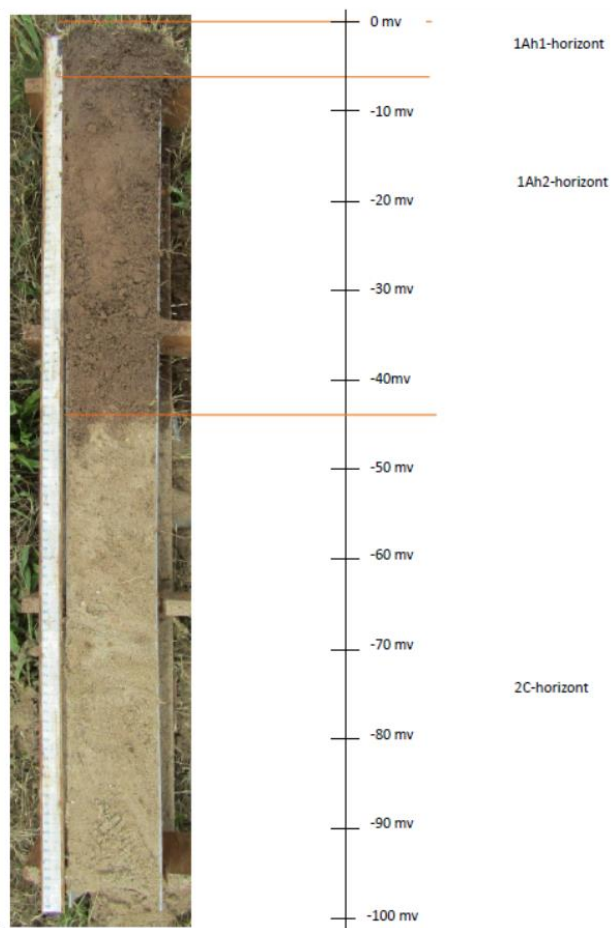


Figuur A.3 Bodemproefiel 9-1 14.0 binnentalud strook 2-2 en buitentalud strook 2-1 (boringen gestoken voorafgaand aan de erosieproef).

18.2 binnen

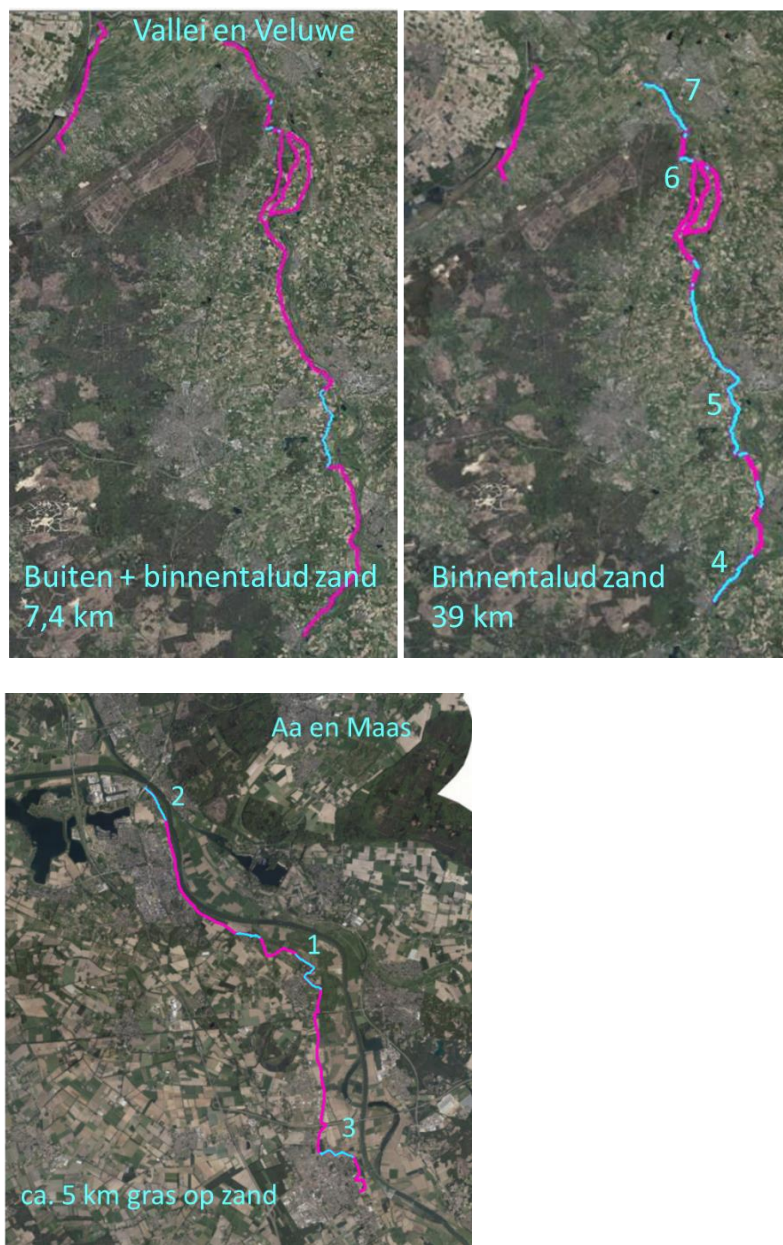


18.2 buiten



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 μm), een enkele keer komt ook matig grof (210-300 μm) en zeer fijn (105-150 μm) 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.

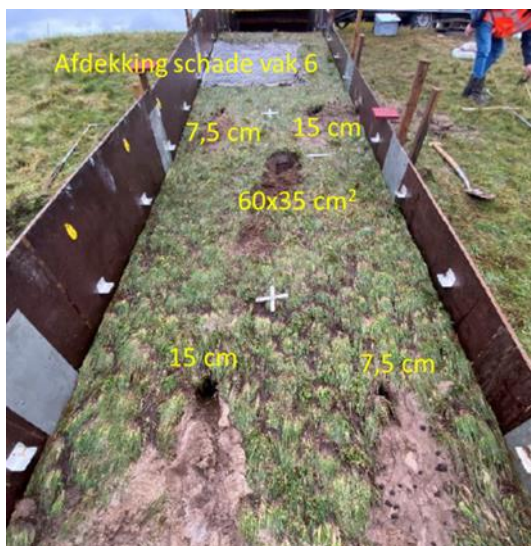
Het uitspoelen van zand door de gangen is in beperkte mate waargenomen. Water dat ergens een molgang in loopt en ergens lager op het talud uittreedt nam soms aanvankelijk wat zand mee, maar na het schoonspoelen van de gang leverde dit verder geen falen van de grasbekleding op. De erosiebestendigheid 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* . 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 toplaag.



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.

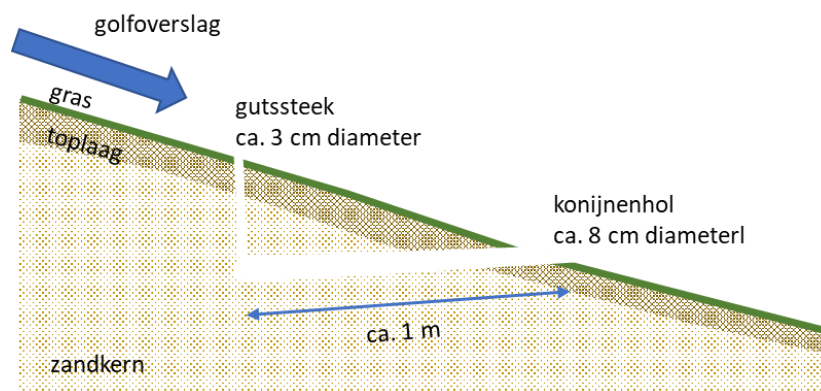
Hierop zijn in de toplaag nog twee gaten aangebracht met een afmeting van 0,15 x 0,15 m en 0,45 m diep (door de toplaag heen) en 0,3 x 0,3 m en 0,45 m diep. De schades zijn aangebracht op de kale plek die was ontstaan als gevolg van het afstropen van de zode vanaf de graafschade door de 'hond'. Hierna 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 Figuur B.3. De andere schades zijn gedurende de proef niet veranderd.



Figuur B.3 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.4).



Figuur B.4 Schematische weergave verbinding tussen konijnenhol en gutssteek.

De aangebrachte schade en de ontwikkeling hiervan tijdens de proef staat in Figuur B.5. 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.5 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 (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.

Tabel C.1 Rekenwaarden U_c gedetailleerde toets oploopberekening (gras op klei).

	Gesloten zode	Open zode
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 (Tabel C.2). Er wordt onderscheid gemaakt tussen een substraat van zand of een substraat van klei.

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

	Gesloten zode op klei	Open zode op klei	Gesloten zode op zand
a	1	0,8	0,538
b	-0,035	-0,07	-0,06
c	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 μ en de standaardafwijking σ 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 Tabel C.3.

Tabel C.3 Parameters (μ en σ) 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	
	μ (m ³ /s/m')	σ (m ³ /s/m')	μ (m ³ /s/m')	σ (m ³ /s/m')		μ (m ³ /s/m')	σ (m ³ /s/m')
0 tot 1 m	0,225	0,250	0,100	0,120	0 - 0,4 m	0,236	0,636
van 1 tot 2 m	0,100	0,120	0,070	0,080	0,4 – 0,8 m	0,012	0,009
van 2 tot 3 m	0,070	0,080	0,040	0,050	0,8 – 1,5 m	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 dijksrekkingen 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

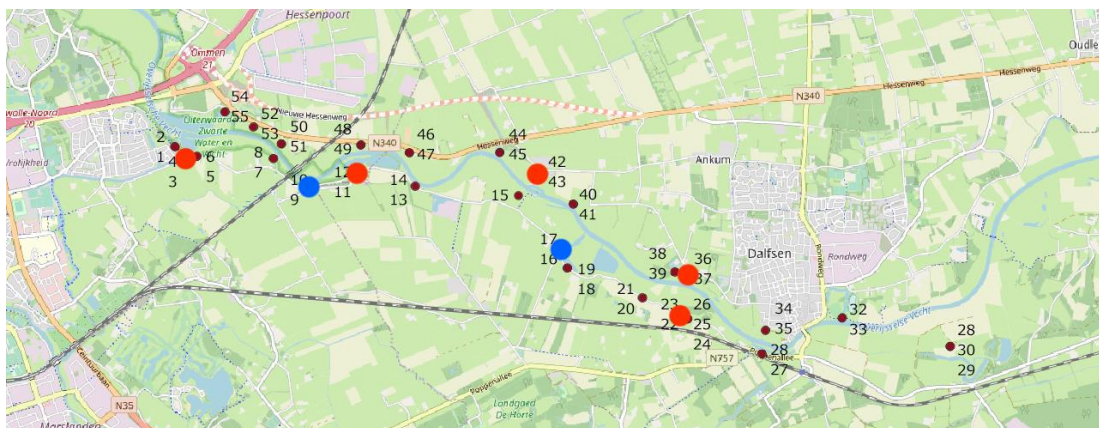
Op 55 locaties langs de Vechtdijk zijn vegetatieopnames gedaan en is bodemonderzoek uitgevoerd. Het doel hiervan was om de ruimtelijke variabiliteit in beeld te brengen en tot een keuze te komen voor 10 nader te onderzoeken locaties voor grastrekproeven en aanvullend wortelonderzoek. Uit deze 10 locaties 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 vasthoudend 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 (Figuur D.1).



Figuur D.1 Locaties van de geadviseerde proefvlakken. Voorkeur (rood) en reservevakken (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 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.

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 _c grastrekpr. (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_buta	-	-	-	-	-	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_{m0} (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 (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.

Tabel D.2 Karakterisering golfoverslagbelasting.

Significante golfhoogte (m)	Overslagdebiet (l/s per m)	Duur (uur)	Aantal overslag-volumes (-)	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 $\frac{1}{3}$ 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 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 (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 Tabel D.2) heeft de proefstrook dan al gehad.

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

Strook	Moment schade tijdens proefprogramma	Moment falen tijdens proefprogramma
53-2 103.4 1-1a Buitentalud Berkum	3 uur GO190_1,0 vak 4 en 14	Geen falen
53-2 103.4 1-2 Buitentalud Berkum	5 uur GO50_1,0 vak 5	1,5 uur GO190_1,0 vak 5
53-2 103.4 1-1b Buitentalud Berkum (WOS)	5 uur GO190_1,0 vak 16	Geen falen
9-1 14.0 2-1 Buitentalud volkstuin	5 uur GO50_1,0 vak 8	2 uur GO100_1,0 vak 8
9-1 14.0 2-2 Binnentalud volkstuin	5 uur GO100_1,0 vak 2	Geen falen
9-1 18.2 3-1 Hessenweg binnentalud	3,25 uur GO190_1,0 vak 6	Geen falen
9-1 18.2 3-2 Hessenweg buitentalud	Geen schade	Geen falen
9-1 18.2 3-3 Hessenweg binnentalud - kort gras en graverij)	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 Tabel D.4.

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).



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.

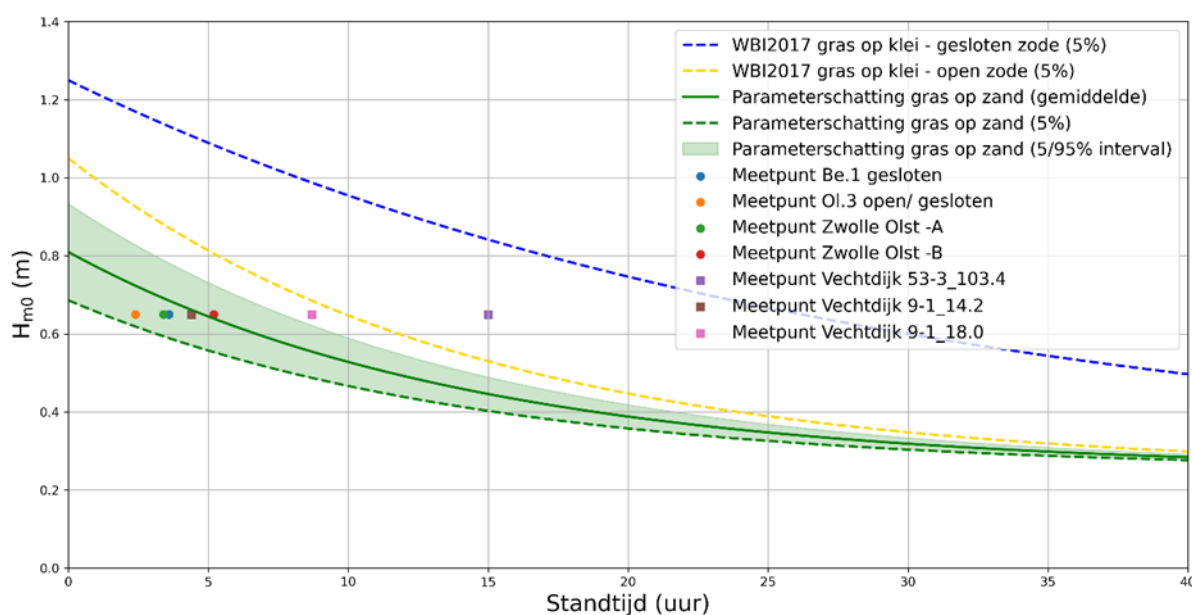
D.3 Fase 3 Analyse

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 onderschrijdingskansen kunnen worden bepaald. Voor de 5% onderschrijdingskansen en voor het gemiddelde staan de lijnen en parameters a, b en c in Figuur D.3



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 overstromingskansen 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 α_M en α_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 (Tabel D.5).

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

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

Net 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 (Tabel D.6).

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 belastingssituatie 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).

E Optimalisatie frontsnelheden

E.1 Inleiding

Bij de omrekening van de kansverdeling van $U_{c,goz}$ naar $q_{c,goz}$ is net als voor gras op klei, open en gesloten zode, gebruik gemaakt van de sterke vereenvoudiging waarbij de frontsnelheid op het talud versnelt naar 1,4 keer de frontsnelheid op de kruin ($\alpha_a=1,4$). Bij metingen van de frontsnelheid op de Vechtdijk is gezien dat kleine volumes met kleine waterlaagdiktes niet versnellen en soms zelfs vertragen. Omdat taluds met gras op zand zich enkel langs rivieren bevinden, waarbij de golfhoogte in combinatie met een hoge buitenwaterstand gering is, is gekeken in hoeverre er voor gras op zand optimalisatie mogelijk is.

Er is daarvoor gekeken naar de metingen van de frontsnelheid en naar de formules uit de EurOtop Manual [15] en die van Van Bergeijk [14]. Op basis daarvan is een overslagvolume afhankelijke versnellingsfactor gebruikt bij de omrekening van de kansverdeling van $U_{c,goz}$ naar $q_{c,goz}$. Opgemerkt wordt dat er geen rekening is gehouden met vertraging van de buitenkruinlijn over de kruin naar het binnentalud. Dit kan in de toekomst een aanvullende optimalisatie zijn, waarbij de kruinbreedte en ruwheid eveneens invoerparameters worden.

Opgemerkt wordt dat de frontsnelheden op het buitentalud momenteel worden onderzocht in het kader van het Rijkswaterstaat programma 'Kennis voor Keringen' in samenwerking met Deltares. De resultaten worden verwacht eind 2022. Deze resultaten konden niet worden meegenomen in deze studie.

E.2 Erosiemodel voor grasbekledingen

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

$$D = \sum_{i=1}^N \max\left(0; \alpha_M (\alpha_a U_i)^2 - \alpha_s U_c^2\right) \quad (0.1)$$

Waarin:

D (m^2/s^2)	Schadegetal.
N (-)	Aantal overslaande golven.
U_i (m/s)	Frontsnelheid per overslaande golf op de kruin van de dijk.
U_c (m/s)	Kritische snelheid (erosiebestendigheidsparemeter van de top laag).
α_M (-)	Correctiefactor op de belasting als gevolg van een overgang.
α_s (-)	Correctiefactor op de sterkte als gevolg van een overgang.
α_a (-)	Correctiefactor voor versnelling van de frontsnelheid op een talud.

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

$D=1000$ m^2/s^2	Eerste schade,
$D=4000$ m^2/s^2	Meerdere kale plekken,
$D=7000$ m^2/s^2	Doorbraak top laag, bezwijken grasbekleding.

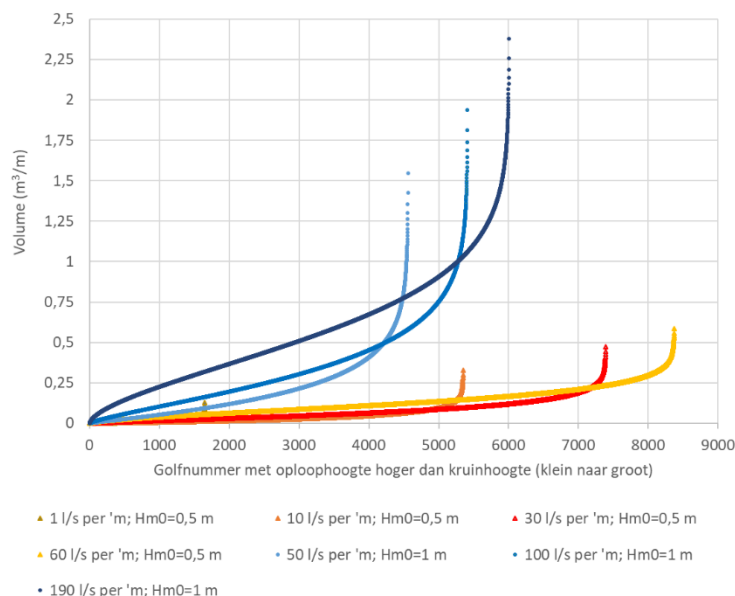
Het model is gekalibreerd uitgaande van bezwijken van de grasbekleding ($D=7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$). Hierbij geldt dat de beelden 'eerste schade' en 'meerdere kale plekken' veel minder goed te voorspellen zijn dan het bezwijken van de toplaag. Het verschil in D tussen deze schadebeelden en bezwijken was relatief variabel. Soms trad vrij snel na het ontstaan van schade ook bezwijken van de grasbekleding op en soms duurde dit juist relatief lang.

In Riskeer wordt bij het berekenen van de faalkans van de grasbekleding bij golfoverslag (nog) niet direct gebruik gemaakt van de cumulatieve overbelastingmethode, maar wordt gewerkt met een kansverdeling van het kritisch golfoverslagdebiet q_c (m^3/s per 'm'). De kansverdeling van q_c wordt afgeleid door voor verschillende invoerparameters ten aanzien van de berekening van U_i aannames te doen (stormduur, helling en ruwheid buitentalud, golfhoogte en golfsteilheid) en U_c en D als een stochast te beschouwen. Dit resulteert in een faalkans gegeven de stormcondities. De werkwijze wordt beschreven in [16] en kort herhaald specifiek voor het gras op zand onderzoek in [9].

Voor de versnellingsfactor α_a wordt tot dusver binnen dit project Gras op Zand, WBI (Wettelijk BeoordelingsInstrumentarium) en BOI (Beoordelings- en OntwerpInstrumentarium) een vaste waarde van 1,4 (-) gehanteerd, op basis van een analyse van gemeten versnellingen op het talud bij golfoverslagproeven en een rekenmodel voor versnelling dat wordt gegeven in EurOtop [15] (later vereenvoudigd door Van Bergeijk [14]). De versnellingsfactor wordt als representatief verondersteld voor taludhellingen tussen 1:2,3 en 1:4,5.

E.3 Golfoverslagvolumes en frontsnelheden op de kruin

Voor de omrekening van de cumulatieve overbelastingmethode naar de kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet wordt gebruik gemaakt van een discrete reeks golfoploop en golfoverslaggebeurtenissen gedurende een stormperiode. De verdeling van golfoploophoogtes wordt omgerekend naar een discrete reeks van frontsnelheden U_i op de buitenkruinlijn. Aangenomen wordt dat de discrete reeks van U_i ook op de kruin gelden. Daarnaast wordt ook een discrete reeks van golfoverslagvolumes per meter bepaald. Elke oploophoogte hoger dan de kruin geeft een golfoverslagvolume per meter. Alle volumes opgeteld en gedeeld door de stormperiode geeft het gemiddelde golfoverslagdebiet. Een visualisatie van de golfoverslagvolumes bij verschillende condities zoals gesimuleerd op de Vechtdijk wordt gegeven in Figuur E.1. De discrete reeksen van volumes per strekkende meter dijk worden gegeven voor een golfhoogte H_{m0} van 0,5 m en 1,0 m, voor respectievelijk een golfoverslagdebiet van 1 tot 60 l/s per m en van 50 tot 190 l/s per m'.



Figuur E.1 Visualisatie van discretisatie van golfoverslagvolumes (m^3/m) bij een stormconditie van 5 uur bij verschillende golfhoogtes H_{m0} (m) en golfoverslagdebieten (l/s per m).

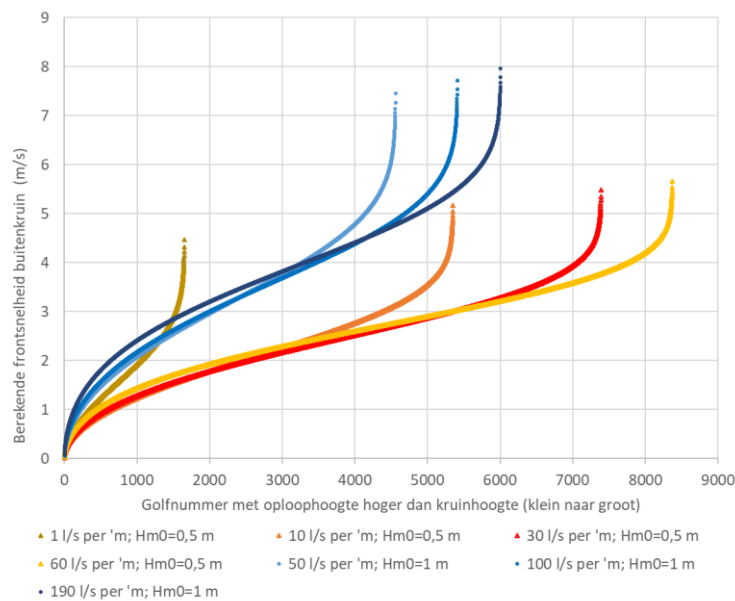
Bij een golfhoogte van 0,5 m blijven zelfs de grootste volumes beperkt tot circa 0,5 m³/m. Bij een golfhoogte van 1,0 m neemt het volume tot maximaal in de orde van 2 m³/m. Bij hogere golfoverslagdebieten dan 60 l/s per m bij een golfhoogte van 0,5 m en meer dan 190 l/s per m bij een golfhoogte van 1 m wordt een waterstand gelijk aan of hoger dan de kruin berekend. In dat geval is er sprake van overloop en geeft Riskeer rekenkundig falen aan voor het mechanisme GEKB. Grotere golfoverslagdebieten zijn daarom minder relevant binnen deze studie.

De frontsnelheden op de buitenkruinlijn en de laagdikte op de buitenkruinlijn kunnen worden berekend uit de oploophoogte R_u (m t.o.v. SWL) boven de kruinhoogte z_A (m t.o.v. SWL), zie formule (0.2). Hierin zijn $c_{v2\%}$ en $c_{h2\%}$ twee coëfficiënten, waarvoor respectievelijk 1,45 en 0,2 kan worden aangehouden, volgens de aanbeveling in de EurOtop Manual.

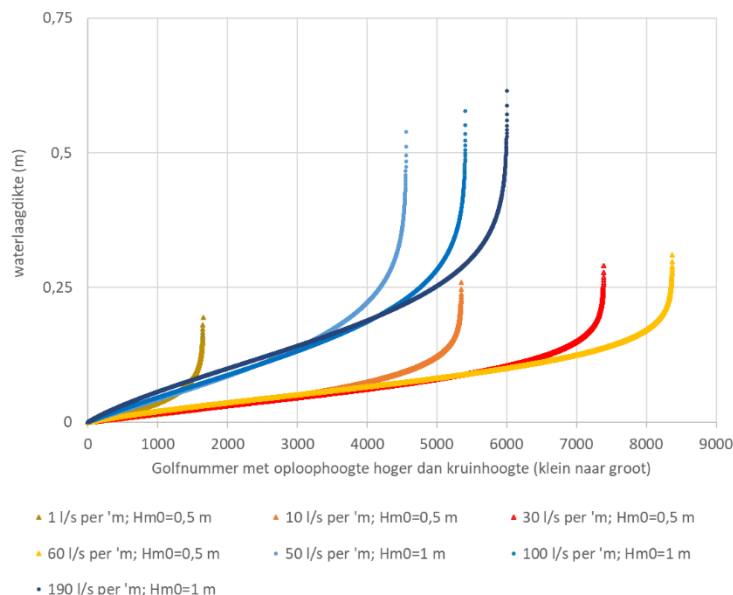
$$u_{2\%} = c_{v2\%} \left(g (R_{u2\%} - z_A) \right)^{0,5} \quad (0.2)$$

$$h_{2\%} = c_{h2\%} (R_{u2\%} - z_A)$$

Tot dusver werd enkel gebruik gemaakt van de frontsnelheid in de cumulatieve overbelastingmethode, echter voor de berekening van de ontwikkeling van de frontsnelheid op het talud, gekarakteriseerd door de versnellingsfactor, is tevens de waterlaagdikte nodig (zie paragraaf E.4). De formules leveren de onderstaande visualisatie van de discretisatie van snelheden en waterlaagdiktes ter plaatse van de buitenkruinlijn voor de op de Vechtdijk gesimuleerde golf- en golfoverslagcondities (Figuur en Figuur).



Figuur E.2 Visualisatie van discretisatie van frontsnelheden op de buitenkruinlijn (m/s) bij een stormconditie van 5 uur bij verschillende golfhoogtes H_{m0} (m) en golfoverslagdebieten (l/s per m).



Figuur E.3 Visualisatie van discretisatie van waterlaagdiktes (m) bij een stormconditie van 5 uur bij verschillende golfhoogtes H_{m0} (m) en golfoverslagdebieten (l/s per m).

Het combineren van de met formule (0.2) berekende (front)snelheid en waterlaagdikte leidt tot een groot instantaan piekdebiet. Uitgaande van een grofweg driehoekig verloop van de waterlaagdikte en de stroomsnelheid in tijd en er vanuit gaande dat de frontsnelheid een goede schatter is van de maximale stroomsnelheid, dan kan de tijdsduur van de overslaggebeurtenis worden berekend, uitgaande van het bijbehorende golfoverslagvolume. In de discrete reeks van snelheid, laagdikte en volume zijn deze drie parameters op volgorde gekoppeld. Grootste volume in combinatie met hoogste snelheid en dikste waterlaag. De op deze wijze berekende tijdsduur van de golfoverslaggebeurtenissen is extreem lang voor de kleine golfoverslagvolumes (meerdere golfperiodes voor volumes kleiner dan $0,5 \text{ m}^3/\text{m}$), maar juist heel kort voor de relatief grote volumes (minder dan 1,5 seconde voor het grootste volume van ruim $2 \text{ m}^3/\text{m}$). Het combineren van deze parameters leidt aldus tot ongeloofwaardige resultaten, waardoor is afgezien van toepassing hiervan. Voor de berekening van de waterlaagdikte is daarom niet gebruik gemaakt van formule (0.2), maar van de empirische formule gegeven door Van Bergeijk, zie ook formule (0.5) in paragraaf E.4. Dit leidt onder dezelfde aannames tot realistische tijdsduren van de golfoverslaggebeurtenissen.

E.4 Berekening versnelling op het talud

Voor de berekening van de versnelling van een overslagvolume op het binnentalud is in EurOtop een iteratieve vergelijking beschikbaar.

$$U_{\text{slope},x} = \frac{U_{\text{slope},x=0} + \frac{k_1 h_{\text{slope},x}}{f} \tanh\left(\frac{k_1 t}{2}\right)}{1 + \frac{f U_{\text{slope},x=0}}{h_{\text{slope},x} k_1} \tanh\left(\frac{k_1 t}{2}\right)} \quad \text{waarin:} \quad (0.3)$$

$$t \approx -\frac{U_{\text{slope},x=0}}{g \sin \varphi} + \sqrt{\frac{U_{\text{slope},x}^2}{g^2 \sin^2 \varphi} + \frac{2x}{g \sin \varphi}} \quad \text{en} \quad k_1 = \sqrt{\frac{2 f g \sin \varphi}{h_{\text{slope},x}}}$$

Hierin is:

$U_{\text{slope},x}$ Frontsnelheid (m/s) op een afstand x (m) van de kruin, beide in taludrichting.

$h_{\text{slope},x}$ Waterlaagdikte (m) op afstand x (m) van de kruin.

f Wrijvingsfactor (-).

φ Taludhelling (rad).
 g Zwaartekrachtsversnelling (m/s²).

Met de invoerparameters frontsnelheid en waterlaagdikte op de kruin van de dijk, de taludhelling en de wrijvingsfactor kan voor een willekeurige afstand vanaf de kruin de frontsnelheid worden berekend en daarmee de versnellingsfactor α_a . Voor de wrijvingsfactor voor een grasbekleding onder golfoverslagcondities wordt 0,01 aanbevolen op basis van een vergelijking met metingen. De berekening verloopt iteratief.

Door Van Bergeijk is een directe formule afgeleid die tot bijna hetzelfde resultaat leidt.

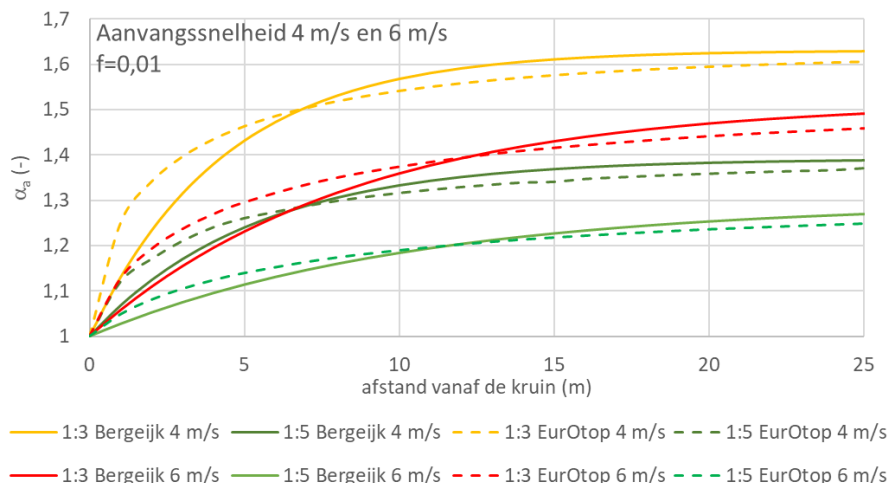
$$U_{slope,x} = \frac{\alpha}{\beta} + \mu \exp\left(\frac{-3\alpha\beta^2 x}{\cos \varphi}\right) \text{ waarin:} \quad (0.4)$$

$$\alpha = \sqrt[3]{g \sin \varphi}, \quad \beta = \sqrt[3]{\frac{f}{2U_{slope,x=0} h_{slope,x=0}}} \text{ en } \mu = U_{slope,x=0} - \frac{\alpha}{\beta}$$

Beide versnellingsberekeningen maken naast de aanvangssnelheid van het front ook gebruik van een waterlaagdikte bij het front of het debiet (aan het front). In de vorige paragraaf is voor de waterlaagdikte een berekeningswijze uit de EurOtop Manual gepresenteerd die echter leidt tot onrealistische waterlaagdikte en frontsnelheid combinaties. Als schatting van de waterlaagdikte of het debiet kan gebruik worden gemaakt van de relaties die voor de golfoverslagsimulator zijn bepaald [21]:

$$U_{slope,0} = 4,5V^{0,34}; \quad h_0 = 0,133V^{0,5} \text{ en } Q = h_0 U_{slope,0} = 0,6V^{0,84} \quad (0.5)$$

Hierin is V het door de simulator losgelaten watervolume in m³/m. Voor een aanvangssnelheid van 6 m/s volgt V=2,4 m³/m en een waterlaagdikte h₀= 0,21 m. Voor een aanvangssnelheid van 4 m/s gaat het om V=0,7 m³/m en een waterlaagdikte h₀= 0,11 m. De beide formules (EurOtop en Van Bergeijk) leiden tot een vergelijkbaar resultaat (Figuur E.4). De formules uit EurOtop voorspellen een wat hogere snelheid dicht bij de kruin en een iets lagere snelheid lager op het talud.



Figuur E.4 Berekende versnellingsfactor α_a (m) tegen afstand tot de kruin (m) voor aanvangssnelheden van 4 en 6 m/s volgens de formule uit EurOtop die van Van Bergeijk.

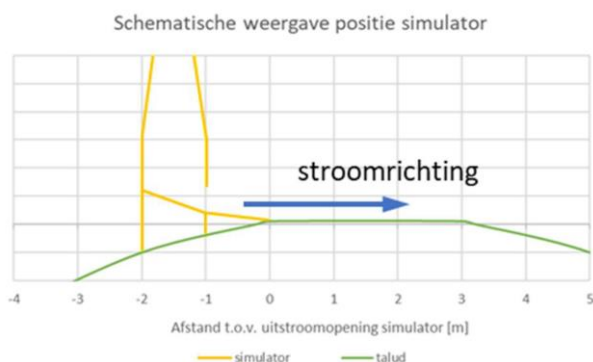
In de grafiek is de versnellingsfactor gegeven afhankelijk van de afstand tot de kruin (0-25 m). In de praktijk kan de lengte van een binnentalud variëren van enkele meters tot ruim 30 m. Volgens de formules zal de grootste versnelling echter in de eerste 10 m vanaf de

kruin plaatsvinden. De grafiek laat zien dat de formules een hogere versnelling voorspellen voor kleine volumes. Een volume van $0,7 \text{ m}^3/\text{m}$, aanvangssnelheid 4 m/s , leidt voor een talud 1:3 tot een versnelling van ruim $1,6 (-)$ terwijl een volume van $2,35 \text{ m}^3/\text{m}$, aanvangssnelheid 6 m/s leidt tot een versnellingsfactor van krap $1,5 (-)$. De ontwikkeling van de versnelling langs het talud, vanaf de binnenkruinlijn is iets sneller voor kleine volumes dan voor grote volumes.

E.5 Metingen frontsnelheid op de Vechtdijk

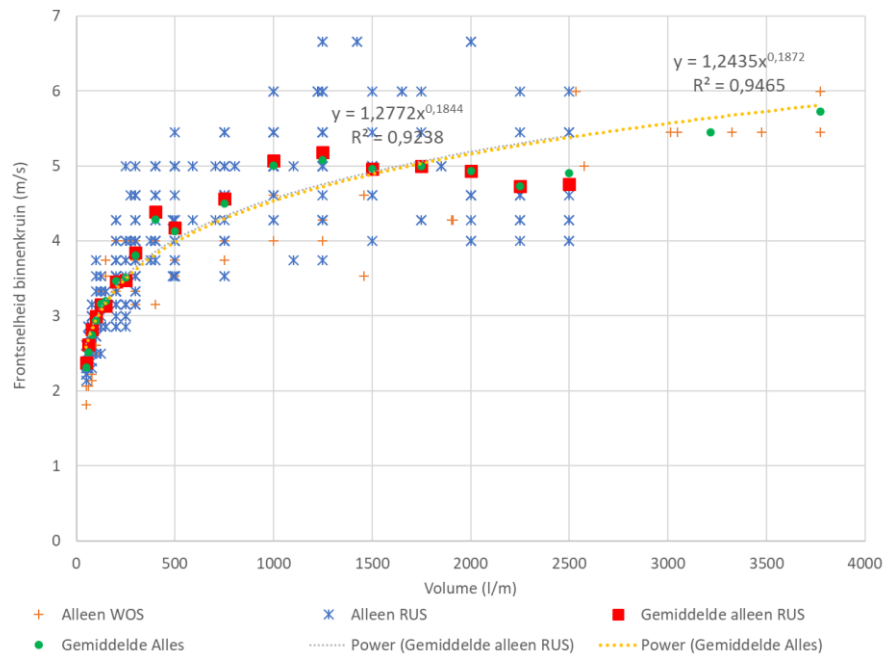
Op de Vechtdijk zijn metingen van de frontsnelheid uitgevoerd en geanalyseerd, zie [8] en [17]. Deze metingen kunnen worden gebruikt voor het narekenen van de versnellingsfactor per volume of per aanvangssnelheid. Er is gebruik gemaakt van zowel de golfoverslagsimulator (WOS) als de golfoploopsimulator (RUS), welke in dit geval werd ingezet om golfoverslag te simuleren. Eerder zijn de gemeten frontsnelheden gebruikt voor het terugrekenen van de U_c . Aanvullend hierop wordt gekeken of de standaard versnellingsfactor van $1,4 (-)$ op het talud kan worden aangescherpt. Het gaat voor gras op zand daarbij met name om de wat kleinere volumes, omdat gras op zandbekledingen enkel voorkomen langs de rivieren, waarbij de golfhoogte in combinatie met een extreme waterstand relatief beperkt is.

De uitstroomopening bevond zich op de kruin van de dijk, de kruin werd meegenomen in de proeven. De ontwikkeling van het front, vanaf de verticale val van het watervolume bij het openen van de klep, via de ombuigconstructie, naar het kruinoppervlak, gebeurt binnen $3 \text{ à } 4 \text{ m}$ van de uitstroomopening [17]. Dit is ook ongeveer de afstand van de uitstroomopening tot aan het begin van het talud Figuur .



Figuur E.5 Dwarsdoorsnede van de simulator op de kruin van de dijk [3].

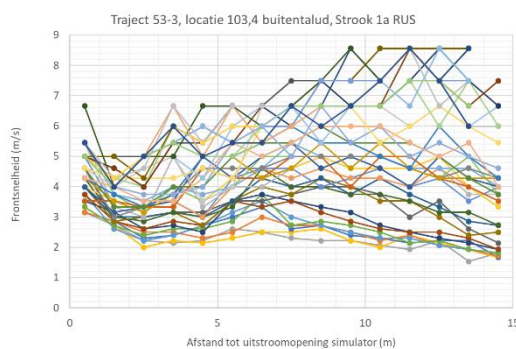
De frontsnelheid op $3 \text{ à } 4 \text{ m}$ van de uitstroomopening voor alle gemeten volumes met de RUS (7 proefstroken) en de WOS (één proefstrook) op de Vechtdijk wordt gegeven in Figuur . De figuur laat zien dat kleine volumes een relatief lage frontsnelheid geven, maar dat deze snel toeneemt met een toenemend volume. Bij een volume van ongeveer 1000 l/m en meer blijft de frontsnelheid op de kruin ongeveer gelijk, met een grote spreiding van ongeveer 4 tot 6 m/s . De grootste volumes ($>2500 \text{ l/m}$) zijn enkel losgelaten met de WOS. Deze zijn voor rivierdijken met een beperkte golfhoogte echter minder relevant.



Figuur E.6 Frontsnelheid (m/s) op 3 á 4 m van de uitstroomopening van de simulator, ongeveer gelijk aan de binnenkruinlijn, voor alle gemeten volumes, uitgesplitst naar RUS en WOS en met trend-lijnen.

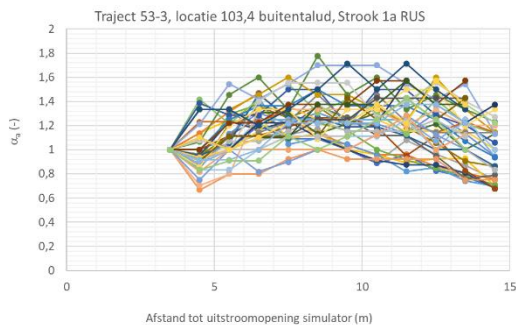
De frontsnelheid over het talud is berekend door de voortgang van het front over telkens één meter te meten. Dit is gebeurd in discrete tijdsintervallen (beeldfrequentie van de camera), waardoor de nauwkeurigheid niet heel hoog is. De metingen zijn verricht voor oplopende golfvolumes van 50 l/m tot 2500 l/m (RUS), waarbij eenzelfde volume enkele (2 à 4) keer werd losgelaten. Een voorbeeld van alle metingen op één locatie wordt gegeven in Figuur . De metingen laten een chaotisch beeld zien. Kleinere volumes geven tegen de verwachting soms een grotere versnellingsfactor, gelijke volumes geven afwijkende snelheden op het talud. De op metingen gebaseerde versnellingsfactor lijkt tot op zekere hoogte afhankelijk van toevalligheden bij het loslaten van het volume en of het talud.

De gemiddelde taludhelling bij de beproefde locaties was circa 1:4. De taluds bevatte vaak een deel bij de kruin of in het midden dat steiler was (ca. 1:3,5; steilste stukje 1:3) en werd naar de teen steeds flauwer. De taludlengte was in het algemeen circa 12 à 15 m.



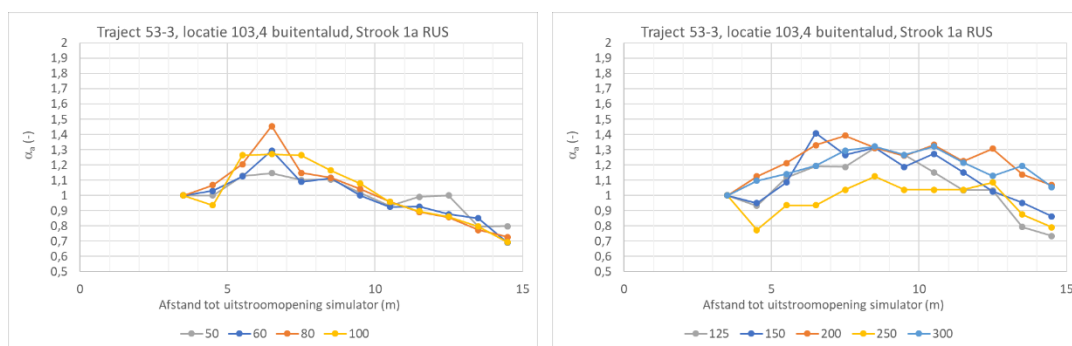
Figuur E.7 Voorbeeld metingen frontsnelheid voor alle volumes 50 tot 2500 l/m.

De gemeten frontsnelheid tussen 3 en 4 m van de uitstroomopening is gebruikt als referentiesnelheid (versnellingsfactor = 1), zie [8] en [17]. De ontwikkeling van de frontsnelheid op het talud, uitgedrukt als de versnellingsfactor ten opzichte van de frontsnelheid op de kruin op 3-4 m van de uitstroomopening, wordt gegeven in Figuur E.8.



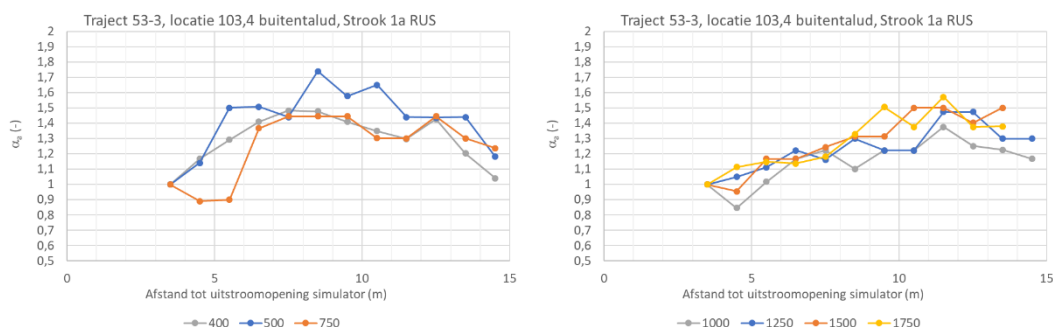
Figuur E.8 Voorbeeld versnellingsfactor α_a (-) tegen afstand vanaf de simulator met de snelheid op 3-4 m (circa binnenkruinlijn) als referentiesnelheid voor alle volumes 50 tot 2500 l/m.

De trend wordt zichtbaar bij de selectie van kleine of juist grote volumes. De taludhelling in het voorbeeld is gemiddeld 1:3,8. Gelijke volumes op één proefstrook zijn in deze grafieken samengevoegd tot een gemiddelde snelheid per locatie op het talud. In *Figuur* staan de per volume gemiddelde versnellingsfactoren voor volumes van 50 tot 100 l/m en van 125 tot 300 l/m.



Figuur E.9 Voorbeeld versnellingsfactor α_a voor volumes 50 tot 100 l/m (links) en 125 tot 300 l/m (rechts).

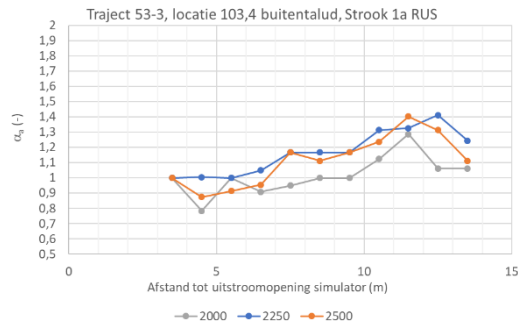
Voor de kleinste volumes (50-100 l/m) is de versnellingsfactor maximaal op 3 à 4 m vanaf de binnenkruinlijn, 6 à 8 m vanaf de uitstroomopening van de simulator, en is 1,1 à 1,45, gemiddeld 1,3. Daarna vertraagt het front richting de teen tot 0,7 à 0,8 keer de snelheid op de binnenkruinlijn. Voor de iets grotere volumes (125-300 l/m) is de versnellingsfactor 1,1 tot 1,4. De versnellingsfactor bereikt iets verder op het talud het maximum, echter het maximum houdt over een langere afstand aan. Alleen bij de teen neemt de versnellingsfactor iets af.



Figuur E.10 Voorbeeld versnellingsfactor α_a voor volumes 400 tot 750 l/m (links) en 1000 tot 1750 l/m (rechts).

Bij volumes van 400 – 750 l/m is het verloop van de versnellingsfactor ongeveer gelijk, echter de maximale waarde is met 1,45 à 1,75 hoger. De piek bij het volume van 500 l/m valt enigszins uit de toon en wordt vooral veroorzaakt door één volume van 500 l/m met een uitschieter in de snelheid. Voor volumes van 1000 tot 1750 l/m neemt de versnellingsfactor toe tot onderaan het talud tot een maximale waarde van 1,35 tot 1,6. Bij nog grotere volumes

(2000-2500 l/m) neemt de maximale waarde van de versnellingsfactor wat af tot maximaal 1,3 tot 1,4 (Figuur E.11).

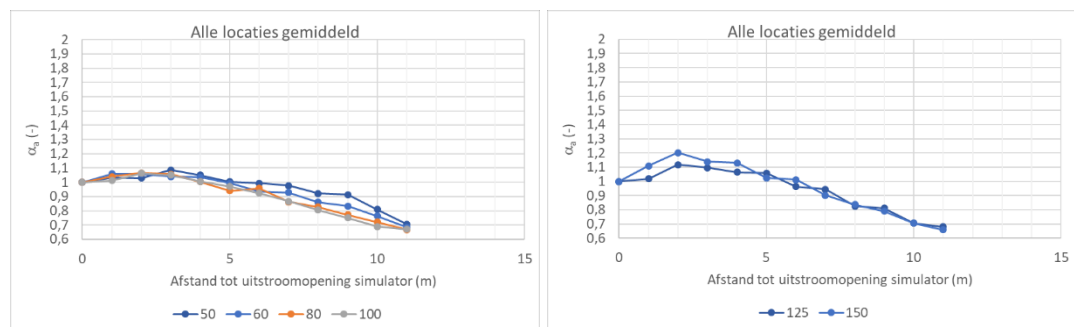


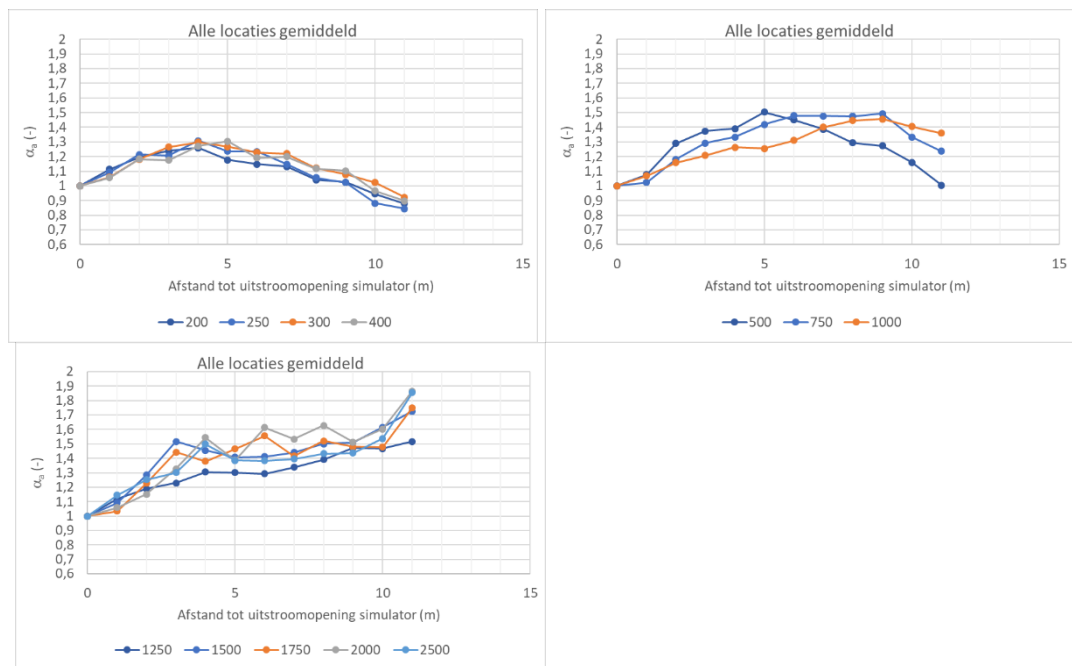
Figuur E.11 Voorbeeld versnellingsfactor α_a voor volumes 2000 tot 2500 l/m.

In totaal zijn op de Vechtdijk op acht stroken metingen van de frontsnelheid uitgevoerd. Het globale beeld van de metingen op andere locaties is vergelijkbaar met het gegeven voorbeeld (strook 1a). Kleine volumes versnellen een beetje bovenaan het talud en vertragen vervolgens. Grote volumes versnellen tot onderaan het talud. De maximale waarden van de versnellingsfactor per volume en locatie lopen uiteen, er is sprake van een flinke bandbreedte. De variabiliteit treedt op zowel per volume als per locatie op het talud. Op één plek op het talud geven meerdere maar dezelfde volumes een bandbreedte aan frontsnelheden. Daarnaast ligt het punt van de maximale versnellingsfactor voor kleine volumes dicht bij de kruin en voor grote volumes juist onderaan het talud. De maximale cumulatieve overbelasting in het erosiemodel voor gras ligt dus voor verschillende overslagvolumes op verschillende plekken op het talud. Gezien de waarnemingen bij de proeven en de kritische stroomsnelheid voor gras op zand bekledingen zijn de grotere volumes echter doorslaggevend bij erosie. Dat de locatie van de maximale versnelling voor heel kleine volumes hoger op het talud ligt wordt daarom verder niet meegenomen. Over het hele talud wordt uitgegaan van de maximale versnellingsfactor.

In het erosiemodel voor grasbekledingen wordt uitgegaan van een vermoeiingseffect. Hoge frontsnelheden van grote overslagvolumes veroorzaken schade, maar niet direct falen van de grasbekleding. De optelsom van meerdere grote volumes is nodig om tot falen te komen. Het ligt daarom voor de hand om voor de te hanteren waarde van de versnellingsfactor in het model niet uit te gaan van de maximale metingen per volume, maar om te middelen. Omdat de frontsnelheid in het kwadraat in de erosieformule staat ligt het wel voor de hand om de hanteren waarde aan de hoge kant van het gemiddelde te kiezen. Hiermee wordt iets nauwkeuriger naar de versnellingsfactor gekeken dan een standaard waarde van 1,4 (-) voor alles, echter onderkent wordt dat het nog steeds gaat om een vereenvoudiging.

Uitgaande van golfoverslagvolumes, wordt voor taluds zoals de Vechtdijk met een taludlengte tot circa 15 m en een helling van orde 1:4, met wat steilere stukjes tot 1:3, gekomen tot de gemiddelde gemeten versnellingen in Figuur E.12.





Figuur E.12 Gemiddelde versnellingsfactoren (-) tegen de afstand vanaf de kruin (m) voor verschillende golfoverslagvolumes (l/m).

Grofweg leidt dit tot de volgende versnellingsfactoren, voor de taluds van de Vechtdijk:

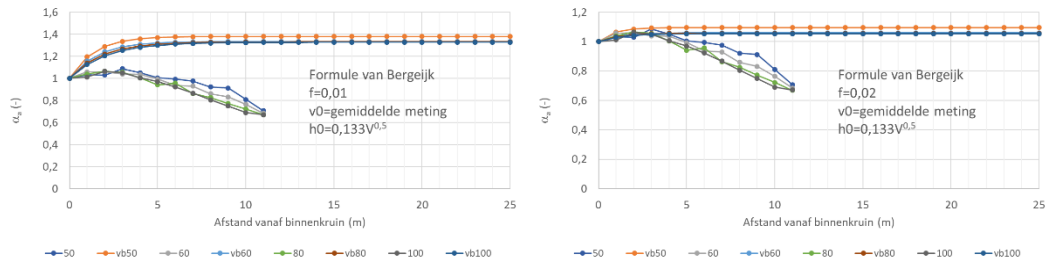
Volume ≤ 100 l/m	$\alpha_a = 1,1$
Volume >100 en ≤ 150 l/m	$\alpha_a = 1,15$
Volume >150 en ≤ 400 l/m	$\alpha_a = 1,25$
Volume >400 en ≤ 1000 l/m	$\alpha_a = 1,45$
Volume >1000 en ≤ 2500 l/m	$\alpha_a = 1,6$

Voor de grotere golfoverslagvolumes wordt dus een grotere versnellingsfactor gevonden dan de in het algemeen aangehouden waarde van 1,4. Voor de volumes tot en met 400 l/m is de versnellingsfactor echter lager.

E.6 Narekenen gemeten versnellingen

Om de versnellingsfactor breder toepasbaar te maken dan voor de Vechtdijk is getracht de metingen na te rekenen, zodat modelmatig geëxtrapoleerd kan worden naar andere situaties, met name wat steilere en wat langere taluds, zoals bijvoorbeeld kunnen voorkomen langs de IJssel. Hiervoor is gekozen voor de formule van Van Bergeijk, omdat deze vanwege de directe berekening gebruiksvriendelijker is dan de iteratieve formule uit de EurOtop Manual, terwijl de resultaten vergelijkbaar zijn. De analyse is in eerste instantie uitgevoerd met de frontsnelheidsmetingen die zijn uitgevoerd op de Vechtdijk. Daarna is het resultaat van de analyse toegepast op de frontsnelheidsmetingen die zijn uitgevoerd bij de golfoverslagproeven bij Harculo in het kader van dijkverbetering Zwolle Olst.

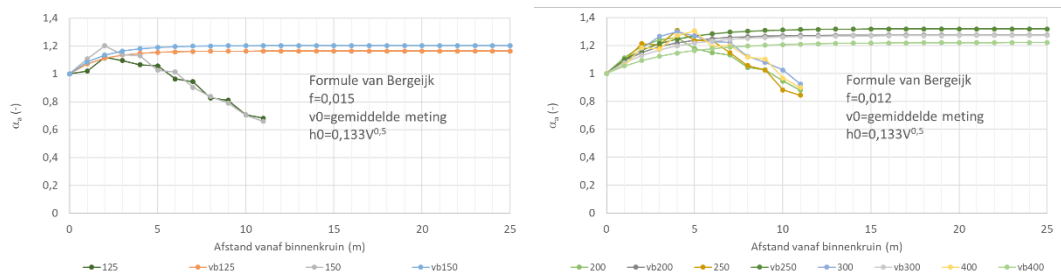
Bij de berekeningen is gebruik gemaakt van de gemeten frontsnelheid op de kruin, gegeven een bepaald losgelaten volume. De niet gemeten waterlaagdikte is berekend met formule (0.5). De wrijvingsfactor f is aangepast zodanig dat de versnellingsfactor lijkt op de gemeten versnellingsfactor bij de proeven op de Vechtdijk. Voor een volume van 50 tot en met 100 l/m staat het resultaat in Figuur E.13.



Figuur E.13 Versnellingsfactor (-) afhankelijk van afstand vanaf de kruin (m) en overslagvolume (l/m) voor $f=0,01$ (links) en $f=0,02$ (rechts).

Voor kleine volumes en dunne waterlaagjes blijkt de standaard aanbevolen waarde van $f=0,01$ te laag, met een waarde van $f=0,02$ presteert de formule beter. Overigens is het logisch dat de wrijvingsfactor afhankelijk is van de relatieve ruwheid van het talud en daarmee van de waterlaagdikte. Te zien is dat de berekende versnelling ongeveer gelijk met de metingen toeneemt tot een maximale waarde en daarna constant blijft, terwijl de metingen een vertraging laten zien. Uitgangspunt in de formule is een continue stroming, terwijl een golfoverslagvolume zorgt voor een tijdsafhankelijk en eindig debiet op de kruin. Bij een oneindig lang talud zou het volume zich uiteindelijk 'uitsmeren' en tot een heel dun laagje water reduceren, dat daarop met een steeds kleinere snelheid naar beneden loopt.

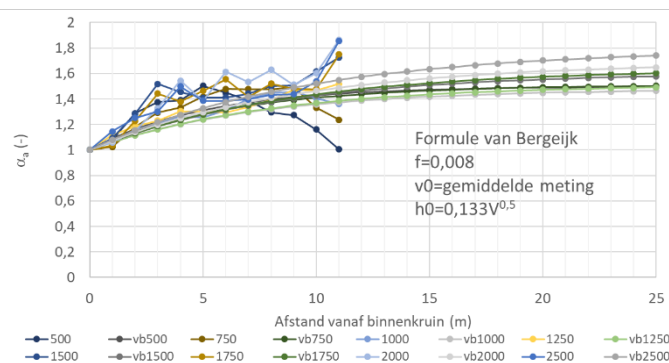
Voor volumes van 125 tot en met 400 l/m staan de resultaten in Figuur E.14.



Figuur E.14 Versnellingsfactor (-) afhankelijk van afstand vanaf de kruin (m) en overslagvolumes van 125 tot en met 400 (l/m).

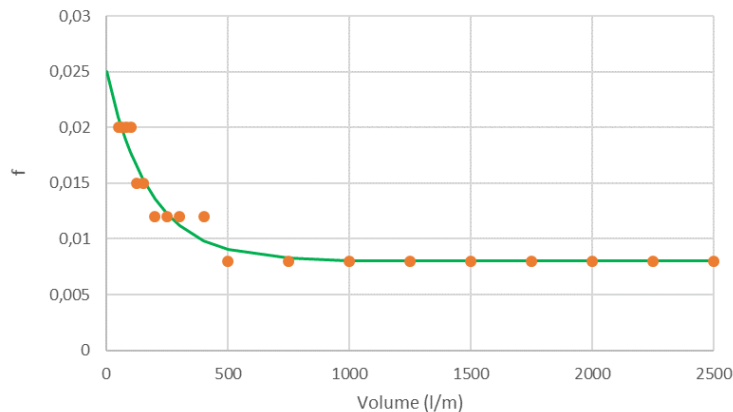
Een redelijke schatting van de maximale versnelling wordt gevonden met $f=0,015$ voor volumes van 125-150 l/m en met $f=0,012$ voor volumes van 200 – 400 l/m. Voor deze kleine volumes geldt dat voor het einde van het talud op de Vechtdijk er een afname van de versnellingsfactor optreedt.

Voor de grotere volumes van 500 tot en met 2500 l/m wordt een redelijke schatting van de maximale versnellingsfactor gevonden bij $f=0,008$; zoals aanbevolen in de EurOtop Manual (Figuur E.15). Hierbij wordt opgemerkt dat de maximale versnellingsfactor in de berekening wat verder van de kruin wordt bereikt.



Figuur E.15 Versnellingsfactor (-) afhankelijk van afstand vanaf de kruin (m) en overslagvolumes van 500 tot en met 2500 (l/m).

Geconcludeerd kan worden dat de in de EurOtop Manual aanbevolen waarde van $f=0,01$ geschikt is voor het voorspellen van de versnelling voor grotere golfoverslagvolumes, echter voor kleinere volumes leidt $f=0,01$ tot een overschatting. Door een exponentiële functie door de bovenstaande resultaten te fitten ontstaat een relatie tussen f en het golfoverslagvolume Figuur E.16.

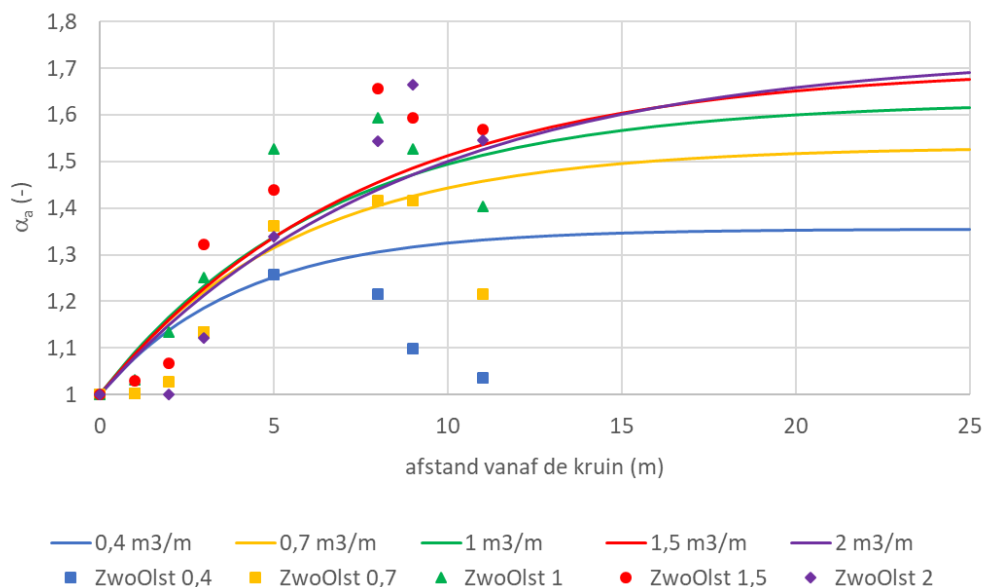


Figuur E.16 Fitfunctie van wrijvingsfactor f als functie van golfoverslagvolume (l/m).

De fit-formule is als volgt: $f(V) = 0,017e^{-\frac{V}{180}} + 0,008$ (0.6)

Er is gekeken of dit verband vergelijkbaar is met de formule van Manning. Uitgaande van de relatie tussen het golfoverslagvolume V (m^3/m) en de waterlaagdikte volgens formule 1.5 dan volgt een redelijke overeenkomst met het resultaat van formule 1.6 als de Manning coëfficiënt ongeveer $0,016$ ($s/m^{1/3}$) is. De afhankelijkheid tussen wrijving en volume is dan min of meer gelijkvormig. Dit is overigens ook logisch, omdat een dun waterlaagje relatief meer weerstand zal voelen van het gras dan een dikke waterlaag. De waarde van $0,016$ is echter aanmerkelijk lager dan voor gras in de literatuur wordt gevonden (ca. $0,03$). De toepasbaarheid van deze literatuurwaarde van de coëfficiënt van Manning (stationaire stroming, dikkere waterlagen) is waarschijnlijk beperkt voor het meer dynamische karakter van golfoverslag met hoge snelheden en dunne waterlagen.

In het kader van de dijkverbetering Zwolle Olst zijn golfoverslagproeven uitgevoerd, waarbij frontsnelheden zijn gemeten. De frontsnelheden zijn nagerekend met de formule van Van Bergeijk en de wrijvingsfactor volgens formule (0.6). De voor de metingen losgelaten volumes zijn $0,4$; $0,7$; 1 ; $1,5$ en 2 m^3/m . Elk volume is meerdere keren losgelaten, voor de aanvangssnelheid is gebruik gemaakt van het gemiddelde. De golfoverslagsimulator stond op de kruin van de dijk, met de uitstroomopening op circa 3 m van de binnenkruinlijn. Vanwege het inconsistente beeld van de metingen bij de uitstroomopening is voor de aanvangssnelheid het gemiddelde genomen over een afstand van 2 , 3 en 4 m vanaf de uitstroomopening. De waterlaagdikte is niet gemeten, maar berekend met formule (0.5). De taludhelling was gemiddeld $1:3,5$, echter bovenaan het talud steiler (ca. $1:3$ de eerste 7 m) en onderaan het talud $1:4$ (van 7 tot 14 m) en flauwer aflopend naar het achterland. Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van de gemiddelde taludhelling van $1:3,5$. De metingen en berekeningen van de frontsnelheid zijn omgerekend naar de versnellingsfactor en weergegeven in Figuur E.17.



Figuur E.17 Versnellingsfactor α_a (-) afhankelijk van de afstand vanaf de binnenkruinlijn voor diverse volumes (m^3/m), berekend (getrokken lijnen) en gemeten (markers).

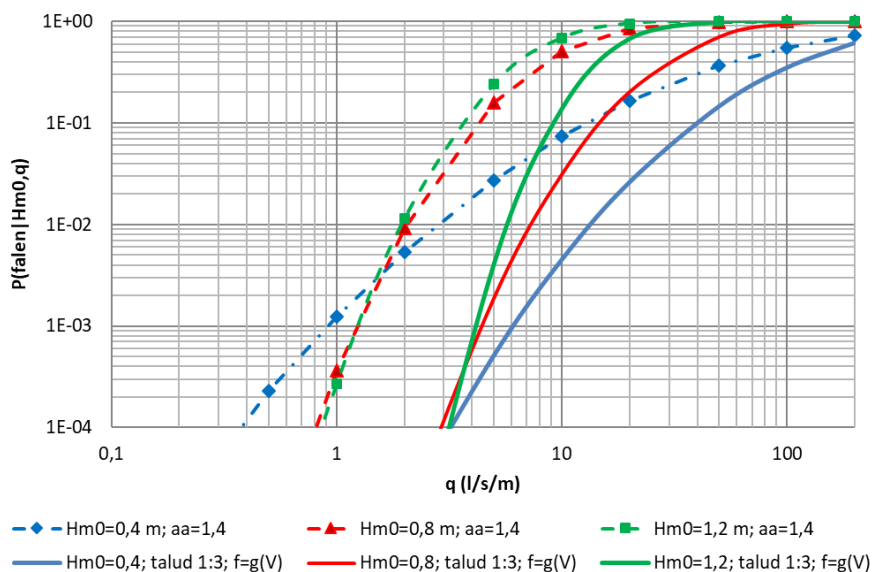
Voor het kleinste volumes van 0,4 en 0,7 m^3/m wordt de maximale versnelling overschat. Hierbij wordt opgemerkt dat de overschatting verder van de binnenkruinlijn wordt berekend. Mogelijk heeft dit te maken met het relatief steile bovendee van het talud. Voor de grotere volumes wordt de versnelling onderschat op het talud. Indien wordt uitgegaan van een lang talud van 20 m dan komen de maximale gemeten versnellingen en de maximale berekende versnellingen goed overeen.

E.7 Aangepaste kansverdelingen van q_c

De afleiding van kansverdelingen van q_c is op dezelfde manier uitgevoerd als eerder in het kader van product 9 van het project gras op zand [9], met uitzondering van de versnellingsfactor α_a . In plaats van de waarde van 1,4 is de frontsnellheid op het talud per overslagvolume berekend met behulp van formule (0.4). Hierbij zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- De voor de berekening van de frontsnellheid op de kruin is evenals in [9] en [16] gebruik gemaakt van formule (0.2).
- De waterlaagdikte op de kruin is berekend met formule (0.5), op basis van het golfoverslagvolume. Dit is gedaan omdat de combinatie van frontsnellheid en waterlaagdikte uit formule (0.2) leidt tot onrealistische maximale debieten en hieruit geschatte tijden van een golfoverslaggebeurtenis ten opzichte van de golfperiode.
- Voor de berekening van de snelheid op het binnentalud is uitgegaan van een taludhelling van 1:3. Dit is een gangbare taludhelling. De verwachting is dat gras op zanddijken vooral wat flauwer zijn, zoals de Vechtdijk, maar niet (veel) steiler dan 1:3. Bij steilere zanddijken zonder kleibekleding in combinatie met golfoverslag wordt geotechnische instabiliteit (afschuiven en of uitspoelen) waarschijnlijk.
- Er is uitgegaan van de versnelling op een afstand van 20 m van de kruin. Voor de relevante volumes en snelheden is de maximale versnelling ongeveer bereikt. Verhogen naar 25 m of verlagen naar 15 m maakt nauwelijks uit op het eindresultaat. Voor korte taluds leidt dit tot conservatisme. Overigens zal ook sprake zijn van conservatisme indien sprake is van dijken met een brede kruin, hierbij zal namelijk de frontsnellheid vertragen tussen de buitenkruinlijn en de binnenkruinlijn.
- De wrijvingsfactor f is op basis van teruggerekende metingen van de frontsnellheid op de Vechtdijk afhankelijk gemaakt van de golfoverslagvolumes volgens formule (0.6). De door EurOtop aanbevolen waarde van 0,01 presteert goed voor grotere volumes, echter geeft een overschatting voor kleine volumes die juist voor gras op zanddijken relevant zijn.

Deze aannames en de methode zoals beschreven in [9] en [16] leidt tot de kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet zoals gegeven in Figuur E.18. De getalswaarden van de verdeling staan in Tabel E.2.



Figuur E.18 Kansverdelingen q_c (l/s per 'm) voor golfhoogetes H_{m0} (m) van 0,4; 0,8 en 1,2 m bij een constante versnellingsfactor $\alpha_a=1,4$ (stippellijn) en een golfoverslagvolume afhankelijke versnelling (getrokken lijn).

Tabel E.2 Getalswaarden μ en σ van de lognormale verdeling van q_c (l/s per m).

H_{m0} (m)	μ (l/s per m)	σ (l/s per m)
0,4	255	352
0,8	44	33
1,2	18	8,4

De stippellijnen in de grafiek zijn de kansverdelingen uitgaande van een vaste waarde van de versnellingsfactor. Te zien is dat het op de beschreven wijze in rekening brengen van een volumeafhankelijke versnelling leidt tot een optimalisatie. De faalkansen gegeven het golfoverslagdebiet en de golfhoogete zijn aanzienlijk lager.

F Effect hoge buitenwaterstand en uittredend grondwater op erosie van de grasbekleding door golfoverslag

F.1 Inleiding

De uitgevoerde golfoverslagproeven zijn gericht op het mechanisme erosie van de grasbekleding onder golfoverslagcondities. De dijk wordt bij deze proeven langdurig overspoeld met water, echter er is tijdens de golfoverslagproeven geen sprake van een hoge buitenwaterstand. De combinatie van een hoge buitenwaterstand en golfoverslag levert een hogere freatische lijn in de dijk dan de golfoverslagproeven over een beperkte breedte. De hoeveelheid uittredend grondwater en de hoogte waarover dit gebeurt zal bij een hoge buitenwaterstand groter zijn, dan bij de golfoverslagproeven. De vraag is in hoeverre uittredend grondwater van invloed is op het erosieproces van de grasbekleding. Dit is met name relevant voor zanddijken in het rivierengebied, omdat deze dijken relatief doorlatend zijn en de duur van een hoogwater lang.

Het uittredende grondwater levert een buitenwaarts gerichte gradiënt, die mogelijk meehelpt in het erosieproces.

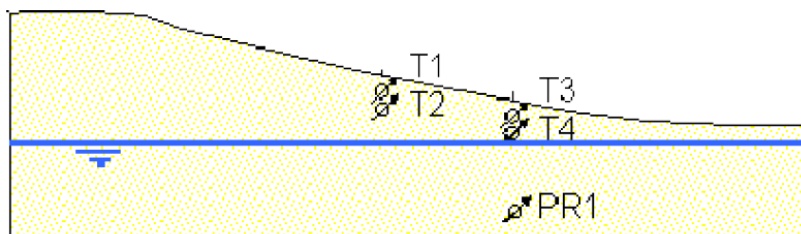
Er wordt niet gekeken naar de geotechnische stabiliteit van het talud, afschuiven, opdrukken en uitspoelen van de bekleding en/ of een deel van de dijk kern. Deze aspecten volgen een apart beoordelings- en ontwerp spoor. In het kader van het project gras op zand is hier grofstoffelijk naar gekeken voor de Vechtdijken, en bleek dit voor de aanwezige flauwe taluds in een steekproef van dwarsprofielen geen probleem [2].

Er is in het kader van deze studie gekeken naar ervaringen en metingen bij golfoverslagproeven op zanddijken langs de Vecht, er zijn berekeningen gemaakt naar het uittredend verhang bij een combinatie van hoogwater en golfoverslag. Dit uittredende verhang is vergeleken met te verwachten verhangen over de graszode bij overslaande golfvolumes, bij sterk wisselende drukken op het taludoppervlak door turbulentie.

F.2 Waterspanning bij golfoverslagproeven

In het kader van het project gras op zand zijn op drie locaties op binnen en op buitentaluds golfoverslagproeven uitgevoerd (9 proefstroken). Hierbij is in elk geval bij locatie km 103.4 van traject 53-3 uittredend grondwater bij de teen waargenomen. Dit gebeurde zowel op het beproefde buitentalud, als ook op het tegenovergelegen, niet beproefde, binnentalud. Het voorland bij het buitentalud stond tijdens de proeven continu onder water. Het is zeer aannemelijk dat de golfoverslagproeven hier lokaal hebben geleid tot een freatisch vlak hoger dan de teen met als gevolg daarvan een sijpeloppervlak. Het is niet ondenkbaar dat dit op andere locaties ook is opgetreden, echter dit is niet met zekerheid bekend. Er is ten tijde van de proeven niet actief gelet op uittredend grondwater.

Bij eerdere golfoverslagproeven op de Vechtdijk in 2010 zijn op het binnentalud een waterspanningsmeter, tensiometers en thetaprobes geplaatst [18]. De tensiometers meten zowel positieve als negatieve (zuig) waterspanning. De thetaprobes geven een indicatie van de verzadigingsgraad. De opnemers zijn vanaf de zijkant van de proefstroken schuin onder de proefstroken geplaatst. Een schematische weergave van de plaatsing staat in Figuur F.1.



Figuur F.1 Schematische dwarsdoorsnede met plaatsing van de opnemers (T=tensiometer; PR=waterspanningsmeter).

De tensiometers T1 en T2 zijn geplaatst ongeveer halverwege het talud, T3, en T4 op een kwart van het talud. De golfoverslagproeven vanaf een golfoverslagdebiet van 30 l/s per m gedurende 6 uur leidde tot volledige verzadiging van de dijk ter plaatse van alle tensiometers. De grondwaterstroming bij T1 en T2 was echter nog het talud in gericht. De druk in deze tensiometers bleef lager dan behorend bij een hydrostatisch drukverloop of behorend bij een grondwaterstroming parallel aan het talud. Dit betekent dat de door het water op de korrels uitgeoefende spanning nog een component loodrecht op het talud, de dijk in, heeft. Tensiometers T3 en T4 gaven een druk die overeen kwam met een grondwaterstroming parallel aan het talud en zelfs iets hoger, duidend op uittredend grondwater vanaf een hoogte van $\frac{1}{4}$ van het talud. Hier oefent het water een spanning op de korrels uit, die een component het talud uit heeft en mogelijk een bijdrage heeft aan de erosieve werking van golfoverslag.

Zowel waarnemingen in het veld als metingen bij de proef in 2010 laten zien dat bij golfoverslagproeven uittredend grondwater bij te teen is opgetreden. Het ligt op basis van metingen en berekeningen voor de hand dat er tijdens golfoverslagproeven verzadiging optreedt van de grondlaag tot een diepte van minimaal een halve meter. Hoger op het talud zal echter wel verzadiging zijn, maar is de gradiënt in stijghoogte binnenwaarts gericht. Laag op het talud zal deze echter, ook bij golfoverslagproeven, parallel aan het talud zijn, of een buitenwaartse component hebben.

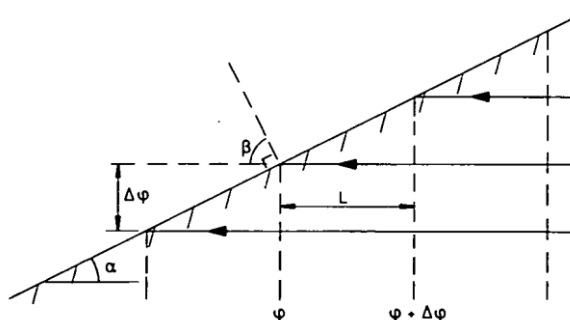
F.3 Waterspanning in de dijk bij hoogwater en golfoverslag

Voor de schatting van waterspanningen in de dijk bij hoogwater wordt uitgegaan van berekeningen. Voor horizontaal uittredend grondwater dat optreedt bij een talud boven water kan de buitenwaarts gerichte gradiënt i (m/m) worden berekend volgens de formules uit de Leidraad voor het ontwerp van rivierdijken [19], Figuur F.2.

$$i = \frac{\Delta\phi}{L} = \tan \alpha$$

$$i_{\parallel} = i \cos \alpha$$

$$i_{\perp} = i \sin \alpha$$



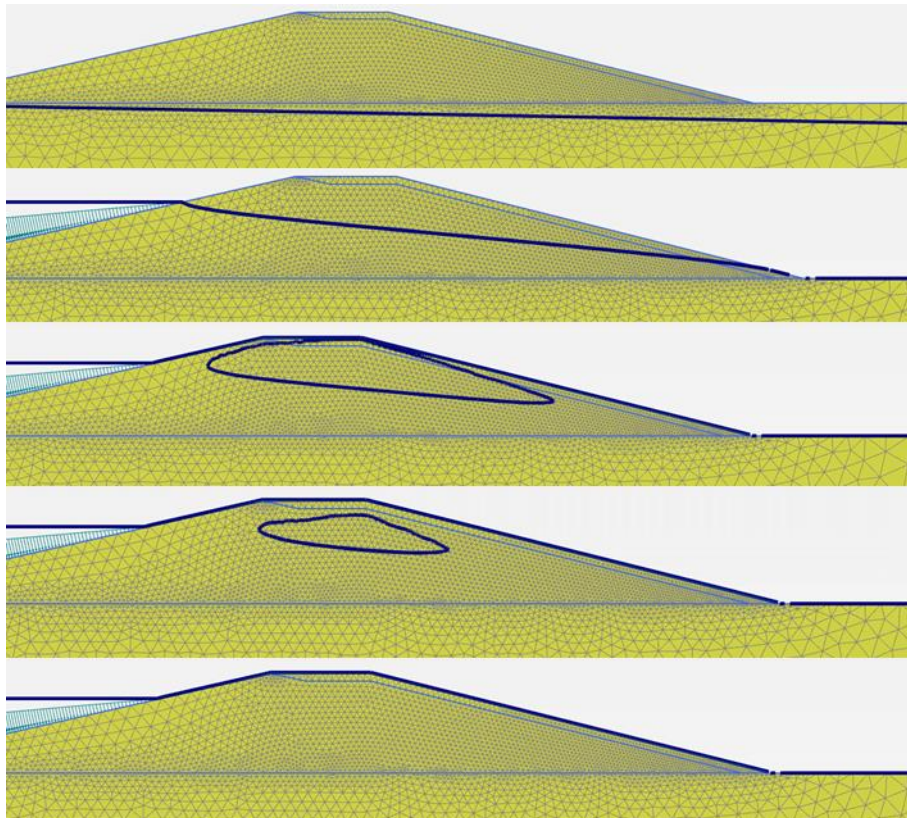
Figuur F.2 Gradiënt bij horizontaal uittredend grondwater (overgenomen uit [19]).

De gradiënt is enkel afhankelijk van de taludhelling α (rad). De naar buiten gerichte component, loodrecht op het talud is gelijk aan $\tan \alpha \cdot \sin \alpha$. Voor een taludhelling van bijvoorbeeld 1:3 is $i_{\perp}$ gelijk aan 0,1 (m/m). Het drukverschil in meter waterkolom over bijvoorbeeld een zodelaag van 0,1 m is gelijk aan 0,01 m (0,1 kPa). Hoe flauwer het talud, hoe kleiner het verhang.

Met behulp van enkele PLAXIS berekeningen is gekeken in hoeverre het theoretische geval van zuiver horizontaal uittredend grondwater wordt bereikt bij een hoogwater in combinatie met golfoverslag bij zanddijken langs de rivieren. Bij de berekeningen zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

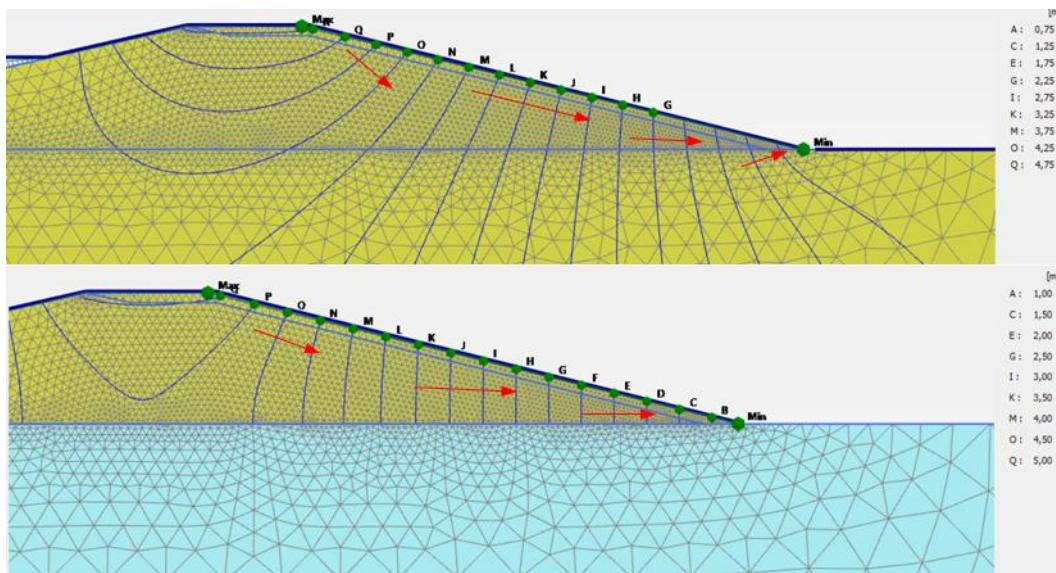
- Vier scenario's: zanddijk op zandondergrond; zanddijk op kleiondergrond, binnentalud helling 1:3 en 1:4. Buitentaludhelling 1:4. Dijkhoogte 5 m tov voor-/ achterland.
- Doorlatendheid zand 1×10^{-4} m/s. Standaard model voor onverzadigde grondwaterstroming, grondtype 'grof'. Doorlatendheid kleiondergrond: ondoorlatend.
- Hoogwater stationair tot 1 m onder kruinniveau. Binnendijk nat maaiveld.
- Gedurende 6 uur natte oploophoeft, kruin en binnentalud als modellering van golfoploop en golfoverslag.

Deze aannames leiden voor alle scenario's tot een volledig verzadigde dijk aan het einde van de periode met golfoverslag. De uitvoer van de freatische lijn, initieel, bij een stationair hoog waterpeil en de fasen met golfoverslag tot en met 6 uur golfoverslag staan in *Figuur F.3*.

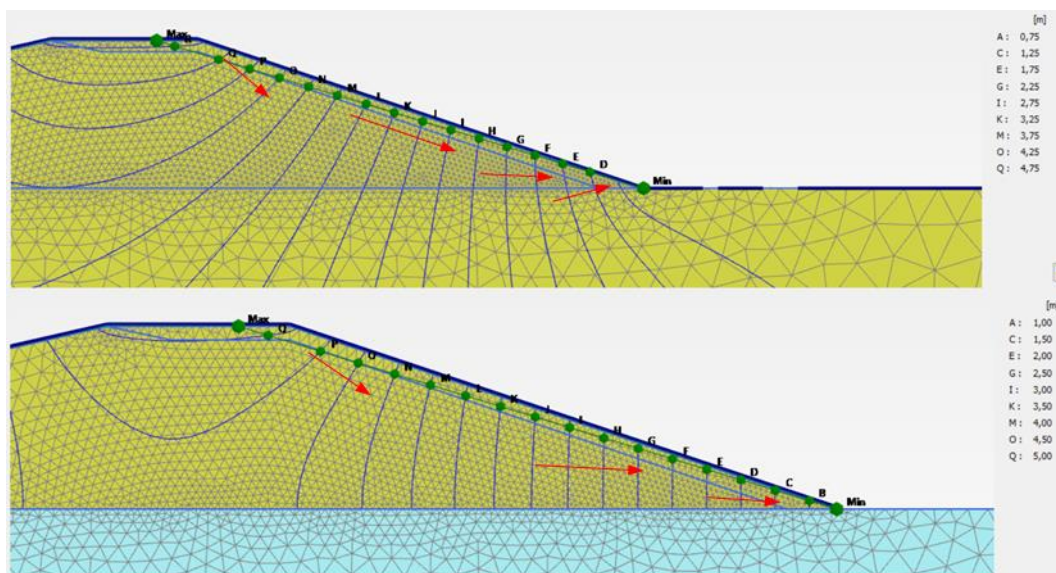


Figuur F.3 Ontwikkeling van het freatische vlak, initieel, stationair hoogwater, drie fasen golfoverslag tot aan een volledig verzadigde dijk.

Voor de vier scenario's staat de uitvoer in lijnen van gelijke stijghoogte in *Figuur F.4* en *Figuur F.5*. De stroming vindt plaats in de richting loodrecht op de lijnen van gelijke stijghoogte. De visuele uitvoer van de stromingsrichting in Plaxis is helaas onduidelijk. In de figuren is met enkele rode pijlen de globale richting van de stroming aangegeven.



Figuur F.4 Binnentalud helling 1:4; zanddijk op zandondergrond (boven) en zanddijk op kleiondergrond (onder), lijnen met gelijke stijghoogte (m tov referentie).



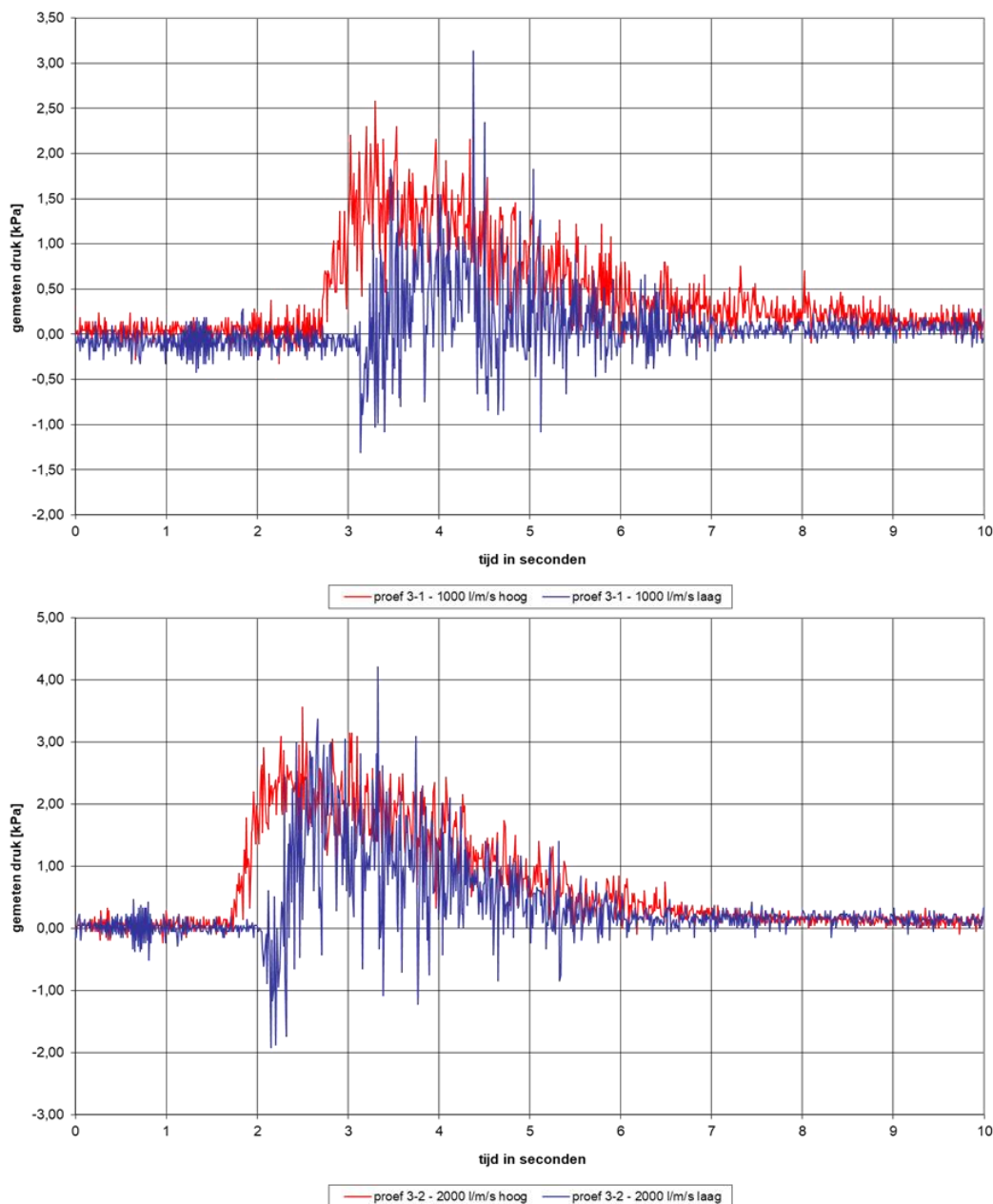
Figuur F.5 Binnentalud helling 1:3; zanddijk op zandondergrond (boven) en zanddijk op kleiondergrond (onder), lijnen met gelijke stijghoogte (m tov referentie).

Bij de scenario's met een ondoorlatende basis van bijvoorbeeld klei of veen wordt horizontaal uittredend grondwater berekend. Dit beeld is hetzelfde als aangenomen in Figuur F.2, horizontaal uitstromend grondwater. Het hierbij horende uittredende verhang kan goed worden benaderd met de formule zoals gegeven in dezelfde figuur.

Voor de gevallen van een zanddijk op een zandondergrond wordt de grondwaterstroming nabij de teen, dicht bij de overgang van talud naar horizontaal, meer buitenwaarts gericht. De buitenwaarts gerichte component van de gradiënt loodrecht op het onderste stukje van het talud wordt groter bij de zanddijk op een zandondergrond dan bij een zanddijk op een klei of veen ondergrond. In beide gevallen, talud 1:3 en talud 1:4, wordt $i_{\perp}$ gelijk aan 0,17 (-), in plaats van 0,1 bij een ondoorlatende basis bij een talud 1:3 en 0,06 bij een talud 1:4. Over de dikte van de zodelaag van ongeveer 0,1 m is dat een druk van 0,017 m waterkolom (0,17 kPa).

F.4 Waterspanningen op en net onder het talud door golfoverslag

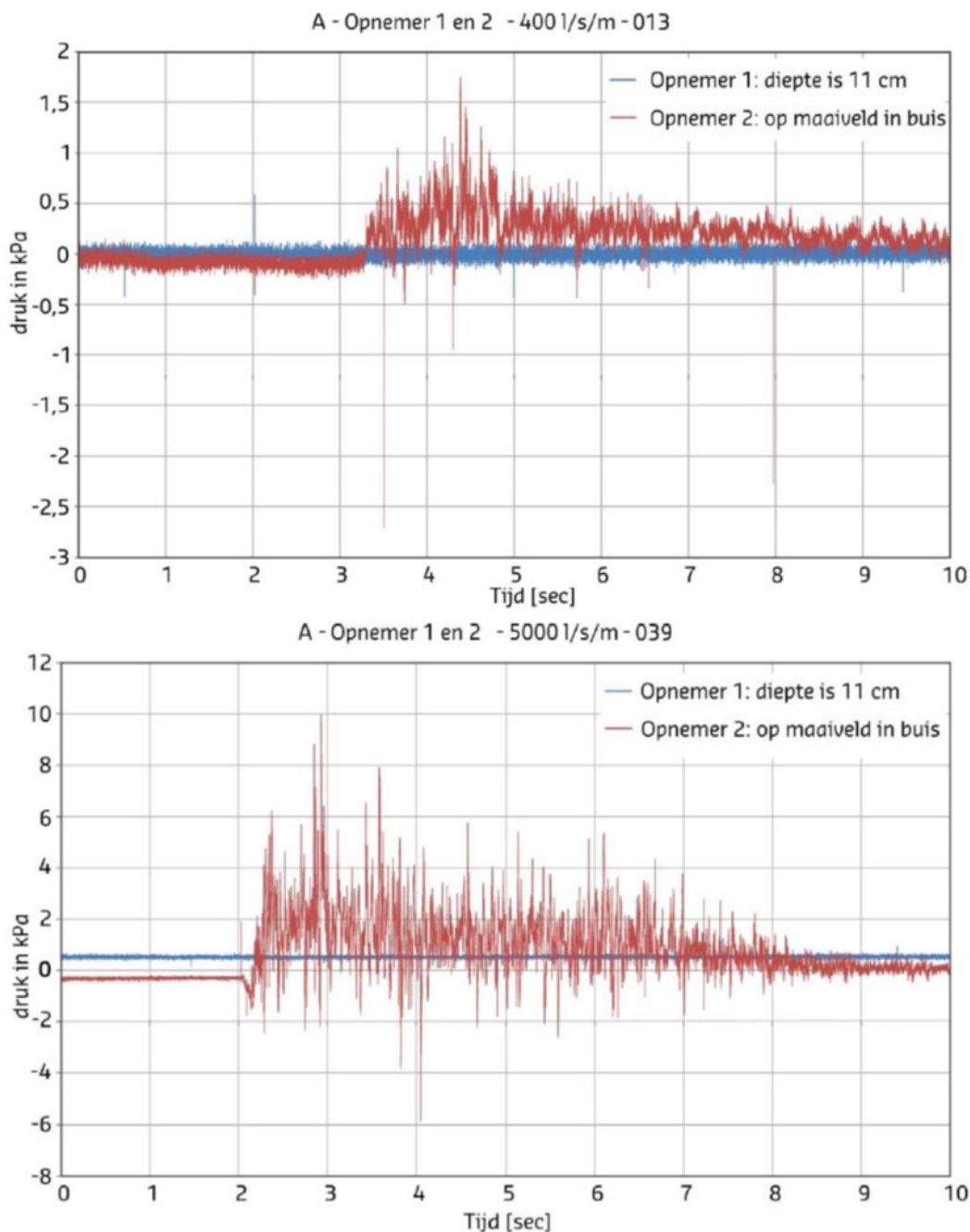
Bij golfoverslagproeven op onder andere de Vechtdijk in 2010 en de dijk bij Millingen zijn drukmetingen uitgevoerd op het talud. Bij de Vechtdijk zijn de drukmetingen enkel op het taludoppervlak uitgevoerd, bij de proeven in Millingen zowel op het taludoppervlak als 0,11 m onder het oppervlak. Enkele van de drukmetingen op de Vechtdijk bij een overslagvolume van 1000 en 2000 l/m worden gegeven in *Figuur F.6*. De rode lijn geeft de meting op 2 m van de binnenkruinlijn, de blauwe meting is uitgevoerd op een afstand van 4 m van de binnenkruinlijn (2 m stroomafwaarts). Voor details met betrekking tot deze metingen wordt verwezen naar [18].



Figuur F.6 Drukmeting (kPa) tegen tijd (s) op de Vechtdijk 2010 op het taludoppervlak op 2 en 4 m van de kruin (resp. 'hoog' en 'laag') voor een golfoverslagvolume van 1000 l/m en 2000 l/m.

Globaal gezien stijgt de druk snel tot een maximale waarde en neemt dan relatief langzaam af. Dit komt overeen met de waarneming van het golfvolume, waarvan eerst het front langskomt, waarna de staart van het volume langzaam afneemt. Bovenop dit globale driehoekige verloop is een snel wisselende drukmeting te zien, waarvan verondersteld wordt dat deze door turbulentie wordt veroorzaakt.

Een voorbeeld van drukmetingen bij golfoverslagproeven te Millingen is gegeven in *Figuur F.7*. In dit geval zijn de metingen halverwege het talud uitgevoerd, op het taludoppervlak (rode lijn) en 11 cm onder het taludoppervlak (blauwe lijn). Verdere metingen en details staan in [20].



Figuur F.7 Drukmeting (kPa) tegen tijd (s) op de dijk bij Millingen, halverwege het talud op het oppervlak en 11 cm onder het oppervlak voor een golfoverslagvolume van 400 l/m en 5000 l/m.

Op het taludoppervlak wordt net als op de Vechtdijk de sterk wisselende druk gemeten, waarschijnlijk veroorzaakt door turbulentie. De drukfluctuaties ten gevolge hiervan zijn aanzienlijk groter dan de druk door de gemiddelde waterlaagdikte op het talud. De druk kan ondanks de aanwezigheid van de waterlaag ook negatief worden. Op een diepte van 11 cm wordt in dit voorbeeld nagenoeg geen drukfluctuatie gemeten.

F.5 Analyse bijdrage uittredend grondwater aan erosie

Verondersteld wordt dat erosie van de grasbekleding gebeurt door het uit de bekleding worden getrokken van een stuk zode, op een plek waar deze toevallig een hoge belasting krijgt in combinatie met een toevallige zwakke plek. Bij grootschalige golfoverslagproeven is waargenomen dat er veelal eerst wat slijtage optreedt, van zowel bovengrondse plantdelen als ook grond aan het oppervlak tussen de plantjes. Fijne losse deeltjes worden weggespoeld. De snelheid van dit proces neemt af tot de meest losse delen weg zijn. De resterende stoppels, wortels en grond zit beter verankerd. Op een gegeven moment neemt een grote golf echter een stuk uit de deels afgesleten zode of top laag.

De belasting bestaat uit een naar buiten gerichte kracht op een (deel van) de zode en treedt op door een buitenwaarts gerichte stijghoogtegradiënt over de zode. De sterkte van de grasbekleding wordt ontleend aan het samenstel van grond, in dit geval zand, en wortels. Dit samenstel biedt weerstand tegen uittrekken door de treksterkte van de wortels en door het gewicht van met name de grond die door de wortels wordt vastgehouden. Zuigspanningen in het zand worden zowel tijdens hoogwater (al dan niet in combinatie met golfoverslag) en tijdens golfoverslagproeven zonder hoogwater) niet verwacht gezien de metingen en waarnemingen (paragraaf F.2).

Een buitenwaarts gerichte gradiënt kan optreden als gevolg van een hoge buitenwaterstand, al dan niet in combinatie met golfoverslag. Zonder de dynamiek van individuele golfoverslagvolumes mee te nemen leidt dat tot gradiënten zoals gepresenteerd in paragraaf F.3. Het gaat hierbij om een grondwaterstroming in de dijk en de bekleding. De tijdschaal van de aanwezigheid van deze buitenwaarts gerichte stromingsdruk is in de orde van uren tot een dag. De ruimtelijke schaal van de aanwezige stromingsdruk door uittredend grondwater is in de orde van enkele meters. De buitenwaarts gerichte gradiënt ter plaatse van de binnenteen is in de orde van 0,05 (zanddijk op slecht doorlatende ondergrond; 1:4 talud) tot 0,2 (zanddijk op zandondergrond, 1:3 taludhelling). De spanning waarmee de zodelaag van bijvoorbeeld 10 cm naar buiten wordt gedrukt is in de orde van 0,005 tot 0,02 meter waterkolom, ofwel 0,05 à 0,2 kPa.

Bij golfoverslagvolumes treedt een sterk wisselende druk op het taludoppervlak op (paragraaf F.4). Net onder het taludoppervlak zijn de drukfluctuaties gedempt en vertraagd, op een diepte van orde één of enkele decimeters zijn de sterke drukfluctuaties niet of nauwelijks gemeten. Door het gedempt en vertraagd indringen van de drukfluctuaties kunnen over het bovenste deel van de zode gradiënten optreden die aan de zode, grond en wortels, trekken en duwen. De drukfluctuaties zijn in de orde van 2 tot 10 kPa, afhankelijk van het losgelaten volume. De druk op het talud kan volgens de metingen ook in absolute zin negatief zijn. Een buitenwaartse gradiënt over de bovenzijde van de zode kan echter ook ontstaan door fluctuaties die in absolute zin enkel positief zijn. Bij het wegvallen van een piekdruk in de zode en het vertraagt reageren van de druk in de zode, kan dit leiden tot een buitenwaartse gradiënt, ondanks dat de druk altijd positief was. De tijdschaal van deze drukwissels is in de orde van 0,05 à 0,1 s. De ruimtelijke schaal op het taludoppervlak is in de orde van de waterlaagdikte (0,1 à 0,3 m). Het trekken en duwen aan de zode door turbulentie gebeurt hoogfrequent en op relatief beperkte lengteschaal. Deze beperkte lengteschaal komt overeen met waarneming van eerste schades door erosie bij grootschalige golfoverslagproeven.

Op de Vechtdijk zijn in het kader van het project Gras op Zand grastrekproeven uitgevoerd [5]. Hieruit volgt dat het gewicht van een stuk uitgetrokken zode nauwelijks bijdraagt aan de benodigde uittrekkkracht (orde 5%). De meeste kracht is nodig om de wortels los te trekken. Gemiddeld is de benodigde maximale uittrekspanning gelijk aan 6,5 kPa met een standaardafwijking van 1,4 kPa. De 2,5% ondergrenswaarde die als representatief wordt verondersteld voor de erosiebestendigheid is gelijk aan 3,6 kPa. Dit is van gelijke orde van grootte als de drukfluctuaties bij de grootste golfoverslagvolumes. De constante waterdruk door uittredend grondwater is een orde of meer kleiner.

F.6 Conclusie

De constante stromingsdruk door een hoge grondwaterstand in de dijk is relatief gering ten opzichte van de drukfluctuaties op het talud door turbulentie in golfoverslagvolumes en ten opzichte van de benodigde uittrekspanning bepaald met de grastrekproef. Vanwege de amplitude en vanwege de vele wisselingen bij golfoverslag wordt verwacht dat dit laatste dominant is in het erosiemechanisme ten opzichte van de constante stromingsdruk door een hoge grondwaterstand. Uittredend grondwater helpt waarschijnlijk maar in beperkte mate mee met het erosieproces van de toplaag door golfoverslag.

G Variatiestudie

G.1 Inleiding

Het onderzoek naar de erosiebestendigheid heeft zich gericht op de Overijsselse Vechtdijken. De impactstudie van de onderzoeksresultaten heeft zich eveneens gericht op deze Vechtdijken. In deze Bijlage G wordt gekeken naar gras op zanddijken, behorende tot de primaire waterkeringen, in andere dijktrajecten, bij andere hydraulische condities en mogelijk ook tot een iets afwijkende sterktekarakterisering wordt gekomen dan voor de Vechtdijken. In totaal heeft circa 70 km van de primaire waterkeringen in Nederland een gras op zand bekleding, krap de helft hiervan ligt langs de Overijsselse Vecht, de andere helft ligt langs de IJssel en de Maas (inventarisatie door Waterschap Drents Overijsselse Delta).

Er is gekeken naar faalkansen van de gras op zand bekleding op het buitentalud (golfklap) en de kruin en het binnentalud (golfoverslag). Dit is gedaan voor een steekproef van acht locaties verspreid over gras op zanddijken bij de waterschappen Aa en Maas en Vallei en Veluwe. De berekeningen naar faalkansen van de bekleding zijn indicatief. Het is niet de bedoeling van de steekproefberekeningen om een oordeel te vellen in het kader van het WBI. Dit laatste gebeurt door de waterschappen zelf. Er is gevarieerd met de rekenwaarden van de parameters ten opzichte van de aanbevolen rekenwaarden. Dit geeft een beeld van de invloed van enigszins afwijkende parameters op de faalkans en/ of de benodigde kruinhoogte.

Naar verwachting liggen er ook gras op zandbekledingen op secundaire en regionale waterkeringen, echter deze worden hier buiten beschouwing gelaten.

G.2 Areaal gras op zand dijken

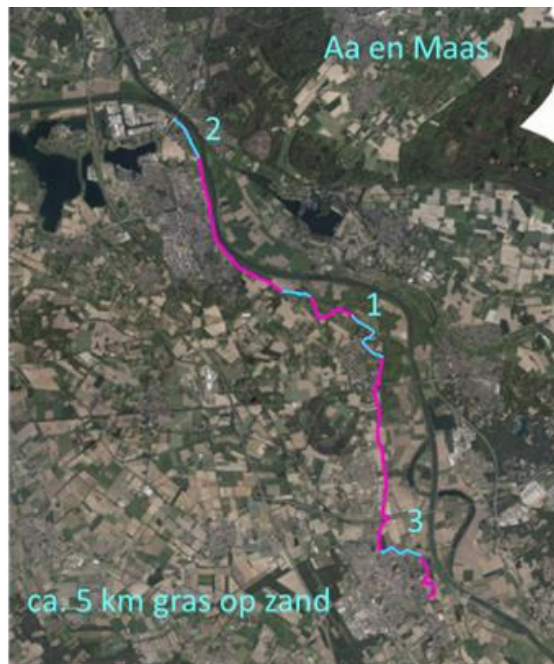
Het gras op zand onderzoek heeft zich gericht op de Overijsselse Vechtdijken. Proeflocaties die in het kader van dit project zijn uitgevoerd zijn aangegeven met blauwe pijlen in Figuur G.1. De gele pijlen markeren de proeflocaties van eerdere andere onderzoeken naar gras op zandbekledingen. De proeflocaties liggen allen in het beheergebied van Waterschap Drents Overijsselse Delta.



Figuur G.1 Proeflocaties erosieproeven gras op zandbekledingen, oostelijk en zuidelijk van Zwolle op dijken langs de Overijsselse Vecht en de IJssel.

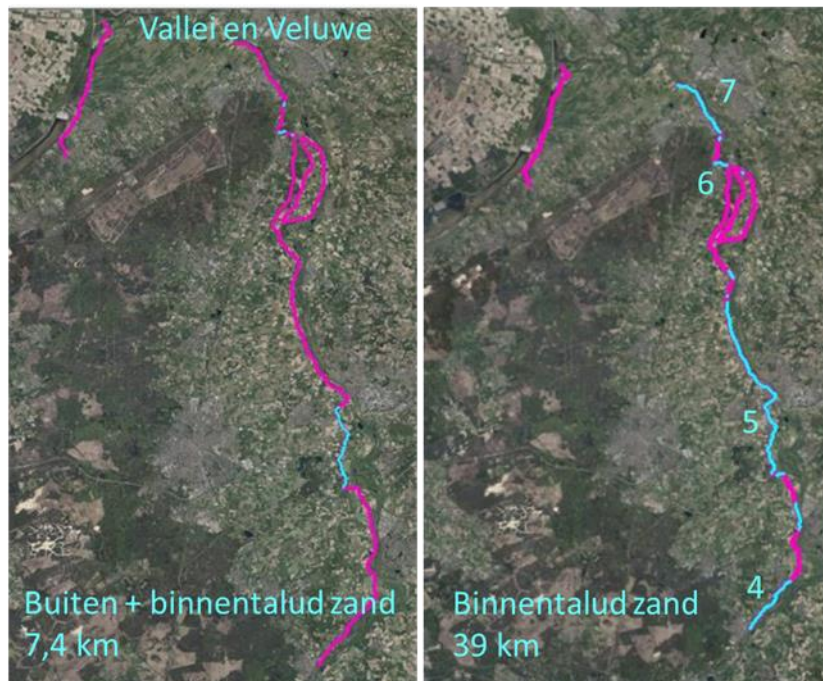
Gras op zand bekledingen op primaire waterkeringen komen ook voor op dijken zuidelijker langs de IJssel bij Waterschap Vallei en Veluwe en langs de Maas bij Waterschap Aa en Maas.

Bij Waterschap Aa en Maas zijn gras op zand bekledingen aanwezig aan de westkant van de Maas, traject 36-1 (Figuur G.2; lichtblauw). Het betreft circa 5 km. De nummering bij de dijkvakken betreft (globale) locaties waar Riskeerberekeningen zijn gemaakt voor het spoor GEKB en de hydraulische belasting is bepaald voor GEBU- Golfklap.



Figuur G.2 Gras op zand bekledingen bij Waterschap Aa en Maas langs de Maas (dijktraject 36-1).

Bij Waterschap Vallei en Veluwe liggen diverse strekkingen met een buiten- en of binnentalud met een gras op zand bekleding. Op het buitentalud gaat het om ongeveer 7,4 km, voor het binnentalud om 39 km (Figuur G.3).

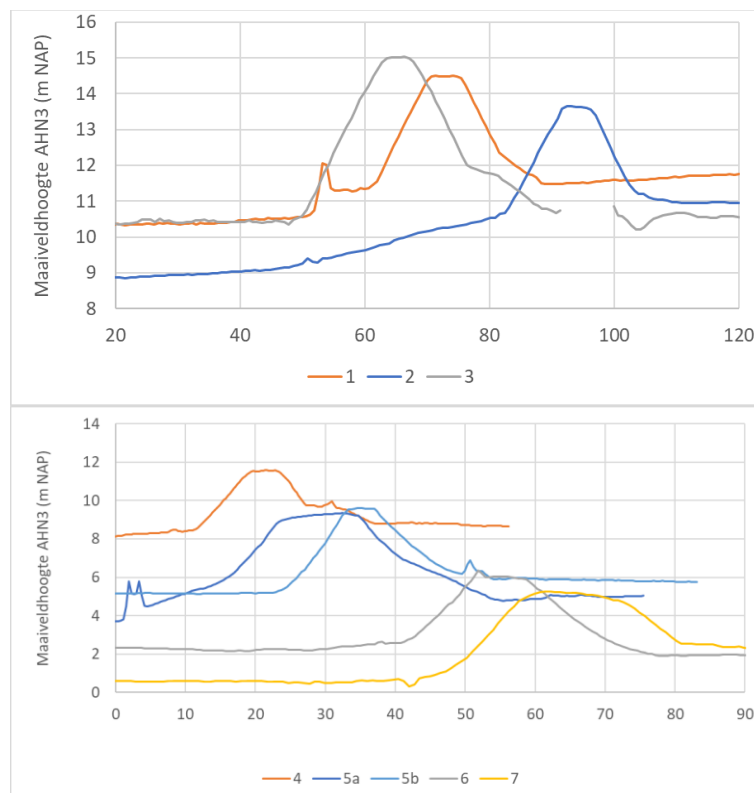


Figuur G.3 Gras op zandbekledingen bij waterschap Vallei en Veluwe (dijktrajecten 11-1, 52-1; 52-2 en 52-4).

Op de plekken waar het buitentalud een gras op zandbekleding heeft, is dat ook het geval op het binnentalud. De gras op zand bekledingen bevinden zich in de trajecten 11-1, 52-1, 52-2

en 52-4. De nummers in de beide figuren (1 – 7) markeren de locaties waar een Riskeerberekening is gemaakt. Bij locatie 5 zijn twee berekeningen gemaakt (5a en 5b).

De dwarsprofielen zijn ontleend aan het AHN (Actueel Hoogtebestand Nederland; <https://www.ahn.nl/ahn-viewer>), zie *Figuur G.4*.



Figuur G.4 Maaiveldlijnen op een steekproef van 8 locaties. Nr 1, 2 en 3 langs de Maas en 4, 5a, 5b, 6 en 7 langs de IJssel.

G.3 Berekeningen gras op zandbekleding

G.3.1 Golfoverslag

Voor de acht steekproeflocaties zijn berekeningen gemaakt met Riskeer naar de kans op erosie door golfoverslag. Hierbij is in eerste instantie gebruik gemaakt van de aanbevolen kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet (zie eerste drie kolommen in Tabel G.1).

Achter deze kansverdelingen zitten aannames over de geometrie en ruwheid van het buitentalud en over de belastingduur. Voor specifieke gevallen kunnen deze parameters afwijken van de standaard aangenomen parameters. In deze paragraaf zijn enkele van de uitgangspunten gevarieerd, om het effect hiervan inzichtelijk te maken voor locaties waar gras op zand dijken voorkomen.

Riskeer berekent de faalkans van de grasbekleding door golfoverslag. Deze faalkans wordt vergeleken met de faalkanseis, uitgaande van de standaard faalkansbegroting voor dit initiërende mechanisme, waarbij geen rekening wordt gehouden met de kans op vervolgmecanismen en eventuele noodmaatregelen, die een overstrooming nog kunnen voorkomen. De faalkanseis is afhankelijk van het traject, de hiervoor vastgestelde norm en hiervoor geldende lengte-effectfactor. De resultaten van de berekeningen staan in *Tabel G.1* (oranje faalkans > faalkanseis en groen faalkans < faalkanseis). Tevens is een kolom toegevoegd met de aanwezige kruinhoogte in het steekproefprofiel en het hydraulische belastingniveau, waarbij de kruinhoogte juist voldoet aan de faalkanseis, in dit geval de signaleringswaarde op doorsnedeniveau. Dit laatste geeft een indruk van het hoogtetekort, of eventueel de overhoogte van de kruin.

Tabel G.1 Faalkanseisen en faalkansen berekend met Riskeer ($j r^{-1}$), de aanwezig kruinhoogte (m NAP) en het hydraulische belastingniveau HB (m NAP).

Traject-locatie	Faalkanseis GEKB	Faalkans (afgerond)	Overslag dominant	Kruinhoogte m NAP	HB m NAP
36-1 – 1	1/41.667	1/30.000	nee	14,51	14,59
36-1 – 2	1/41.667	1/23.000	nee	13,66	13,86
36-1 – 3	1/41.667	1/10.000	nee	15,03	15,43
52-1 – 4	1/12.500	<1/10.000.000	nee	15,03	10,49
52-2 - 5a	1/12.500	1/3.200.000	nee	9,35	8,15
52-2 - 5b	1/12.500	1/4.400.000	nee	9,60	8,50
52-4 – 6	1/12.500	1/2.600.000	nee	6,37	5,25
11-1 – 7	1/25.000	1/430.000	nee	5,28	4,85

Voor de drie steekproeflocaties langs de Maas leidt de faalkansberekening met de aanbevolen kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet niet tot een faalkans lager dan de eis. De kruinhoogte zou tussen 0,1 en 0,4 m hoger moeten zijn om wel te voldoen aan de eis. Voor de andere steekproeflocaties wordt (ruim) voldaan aan de faalkanseis. In alle gevallen blijkt niet golfoverslag dominant voor de faalkans, maar overloop.

In het kader van deze studie zijn een aantal varianten van de kansverdeling van het golfoverslagdebiet afgeleid. Het betreft:

- Optimalisatie versnellingsfactor op het binnentalud, afhankelijk van golfoverslagvolume in plaats van $\alpha_a=1,4$ ongeacht het golfoverslagvolume (Bijlage E).
- Buitentalud 1:4 in plaats van 1:3. Langs de Vecht zijn de taluds relatief flauw hetgeen invloed heeft op de oploophoogte en de frontsnelheden op de kruin en het binnentalud. Hierbij wordt opgemerkt dat voor de 8 steekproeflocaties die in deze bijlage worden beschouwd de helling van het buitentalud 1:3 was en in een enkel geval 1:2,5.
- Belastingduur 12 uur in plaats van 5 uur. Golfoverslag wordt veroorzaakt door een waterstand lager dan de kruin in combinatie met golven door storm of harde wind. Bij rivierdijken is de waterstand langdurig hoog en de hoge waterstand is niet gecorreleerd met storm. De golven kunnen mogelijk worden veroorzaakt door een kleine storm of langdurige harde wind. De standaard aangehouden 5 uur is gebaseerd op een stormverloop. Mogelijk dat voor specifieke gevallen een langdurige harde wind (12 uur) gepaster is.

De kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet voor de diverse varianten worden gegeven in Tabel G.2.

Tabel G.2 De μ en σ (l/s/m) van de lognormale kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet voor diverse scenario's.

Golfhoogteklasse	Standaard buitentalud 1:3 $\alpha_a=1,4$ (-) 5 uur		Buitentalud 1:3 $\alpha_a=f(\text{volume})$ 5 uur		Buitentalud 1:3 $\alpha_a=1,4$ (-) 12 uur		Buitentalud 1:4 $\alpha_a=1,4$ (-) 5 uur	
	μ (l/s/m)	σ (l/s/m)	μ (l/s/m)	σ (l/s/m)	μ (l/s/m)	σ (l/s/m)	μ (l/s/m)	σ (l/s/m)
0-0,4 m	236	636	255	352	223	1000	1460	5900
0,4-0,8 m	12	9	44	33	8,6	10	58	79
0,8-1,2 m	9	6	18	8,4	3,8	2,6	17	13

De met Riskeer berekende resultaten in termen van het hydraulisch belastingniveau (signaleringswaarde op doorsnedeniveau) staan in Tabel G.3.

Tabel G.3 Aanwezige kruinhoogtes (m NAP) en het hydraulische belastingniveau HB (m NAP) voor verschillende variaties van verdelingen van q_c .

Traject- locatie	Kruin- hoogte (m NAP)	HB Standaard buitentalud 1:3 $\alpha_a=1,4$ (-) 5 uur (m NAP)	HB buitentalud 1:3 $\alpha_a=f(\text{volume})$ 5 uur (m NAP)	HB buitentalud 1:3 $\alpha_a=1,4$ (-) 12 uur (m NAP)	HB buitentalud 1:4 $\alpha_a=1,4$ (-) 5 uur (m NAP)
36-1 – 1	14,51	14,59	14,50	14,63	14,45
36-1 – 2	13,66	13,86	13,79	13,87	13,67
36-1 – 3	15,03	15,43	15,34	15,51	15,29
52-1 – 4	15,03	10,49	10,40	10,59	10,37
52-2 - 5a	9,35	8,15	8,08	8,22	8,00
52-2 - 5b	9,60	8,50	8,39	8,56	8,33
52-4 – 6	6,37	5,25	5,17	5,28	5,08
11-1 – 7	5,28	4,85	4,74	4,87	4,72

De optimalisatie van de frontsnelheden op het binnentalud, zoals beschreven in Bijlage E) leidt tot een lager hydraulische belastingniveau van circa 0,1 m voor de steekproeflocaties. Een toename van de belastingduur van 5 uur naar 12 uur geeft een hoger hydraulisch belastingniveau van circa 0,15 m (circa 0,1 à 0,2 m). Een flauwer buitentalud leidt tot de grootste verlaging van het hydraulische belastingniveau van gemiddeld 0,2m (circa 0,15 tot 0,25 m). De verschillen blijven in de orde van één tot enkele decimeters.

G.3.2 Golfklappen

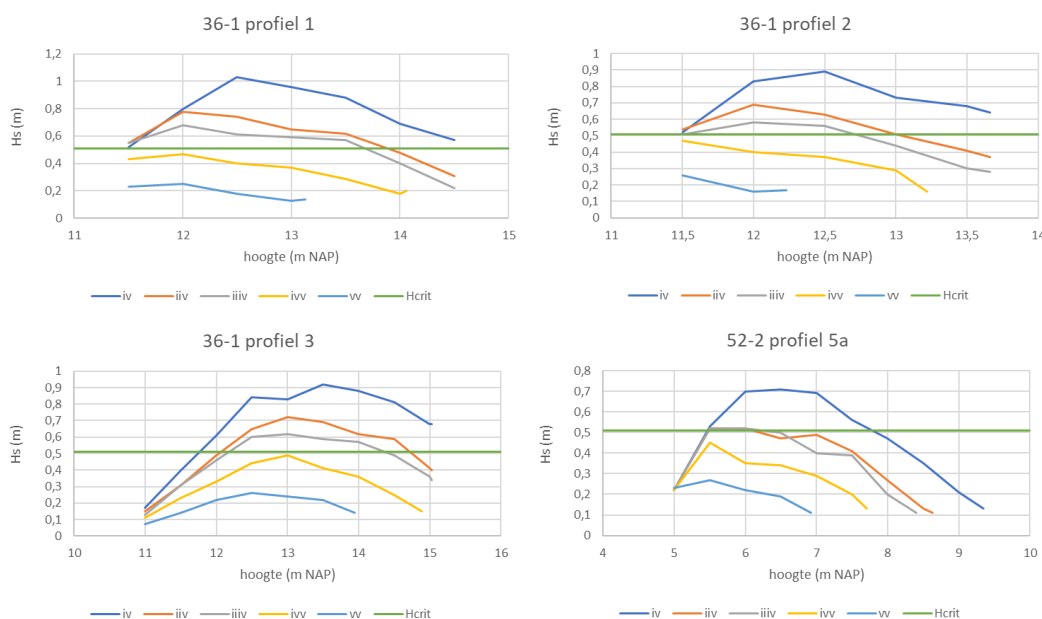
Voor verschillende categoriegrenzen (iv – vv) zijn significante golfhoogtes H_s (m) berekend met Riskeer. De categoriegrenzen zijn afhankelijk van het dijktraject, de norm en de lengte-effectfactor. Een overzicht voor de steekproeflocaties staat in Tabel G.4. Voor de belastingduur, de duur dat de golfbelasting op een bepaalde hoogte op het talud aanhoudt wordt uitgegaan van 12 uur. Aan de sterktekant wordt gerekend met een 'rekenwaarde', in dit geval zijnde de verwachte 5% ondergrenswaarde van de standtijd van de grasbekleding. De standtijd is de tijd dat een grasbekleding stand houdt bij een bepaalde golfhoogte.

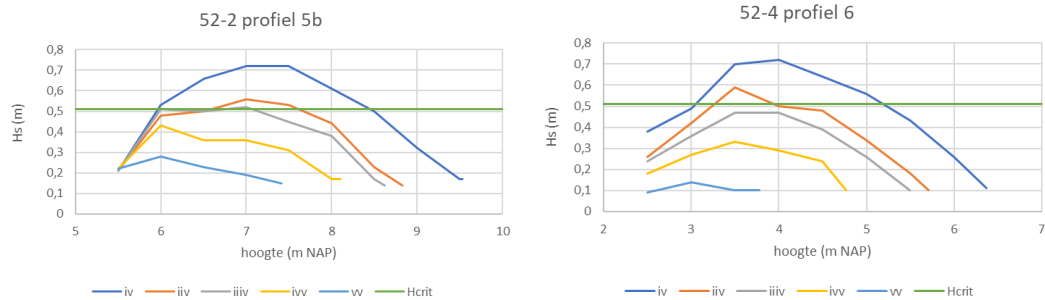
Tabel G.4 Overzicht categorieën en overschrijdingskansen.

Categorie	Kans Traject 36-1	Kans Traject 52-1 Traject 52-2 Traject 52-4	Kans Traject 11-1
iv	1/6.000.000	1/1.800.000	1/3.600.000
iiv (signaleringswaarde, doorsnede)	1/200.000	1/60.000	1/120.000
iiiv (ondergrenswaarde, doorsnede)	1/60.000	1/20.000	1/40.000
ivv (ondergrens, traject)	1/3.000	1/1.000	1/1.000
vv	1/100	1/33	1/33

Locatie 6 en 7, traject 52-4 en 11-1 liggen in de IJsseldelta. De bedreiging wordt gevormd door een combinatie van een hoge afvoer op de IJssel en een hoog meerpeil door windopzet. De overige locaties vallen onder het bovenrivierengebied, waarbij de dreiging wordt gevormd door een hoge rivierafvoer. In alle gevallen is uitgegaan van een langdurig hoogwater gedomineerd door een afvoergolf in combinatie met een storm. Dit leidt tot de schematisering van een stagnant peil dat op elk niveau van de dijk kan optreden en een storm die gedurende 12 uur golfaanval geeft.

Gegeven de belastingduur van 12 uur geldt voor de aanbevolen standtijdlijn voor een gras op zandbekleding een kritische waarde van de golfhoogte van 0,51 m. Deze rekenwaarde van de golfhoogte is als een groene lijn opgenomen in Figuur G.4 en Figuur G.5. De golfhoogtes zijn berekend voor verschillende niveaus op het talud (horizontale als *Figuur G.5*). Locaties 4 en 7 zijn achterwege gelaten omdat hier enkel op het binnentalud sprake is van een gras op zandbekleding en niet op het buitentalud in de golfklapzone.





Figuur G.5 Berekende golfhoogtes H_s (m) tegen hoogte op het buitentalud (m +NAP) voor 6 locaties bij verschillende categoriegrenzen (iv – vv).

Voor de ondergrens- en signaleringswaarde op doorsnedeniveau van de bekleding worden golfhoogtes berekend tussen 0,45 en 0,95 m. Voor alle locaties met uitzondering van locatie 6 wordt niet voldaan aan de ondergrenswaarde (cat. iiiv). Uitgaande van de standaard faalkansbegroting en het bij het niet meenemen van vervolgmecanismen worden deze bekledingen afgekeurd. Het beeld dat ontstaat is dat een gras op zandbekleding op het buitentalud niet voldoet aan de signaleringswaarde op doorsnedeniveau en zelden voldoet aan de ondergrenswaarde op doorsnedeniveau. Dit betekent dat uitgaande van de standaard faalkansbegroting en bij gebrek aan reststerkte en noodmaatregelen de kans op falen van de gras op zandbekleding te groot is.

In het rapport met betrekking tot de bepaling van rekenwaarden voor de standtijdlijn voor gras op zand bekledingen zijn enkele varianten van standtijdlijnen gepresenteerd [9]. Daarbij is gekeken naar het weglaten van een uitbijter in de dataverzameling (één uitzonderlijk gunstige meting), wat leidde tot een marginaal gunstiger kansverdeling. Ook is gekeken naar het variëren van parameter b (1/uur) in de karakterisering van de standtijdlijn. De verschillen in de resulterende standtijdlijn bij een belastingduur van 12 uur bleken echter marginaal. Voor de resultaten wordt verwezen naar Bijlage F in [9]. De varianten leiden niet of nauwelijks tot een verschuiving van de categorie-indelingen voor de steekproeflocaties.

In Tabel G.5 is voor de zes steekproeflocaties de categorie aangegeven aan welke categoriegrenzen wordt voldaan. Ter vergelijking is aangegeven aan welke categorie wordt voldaan indien een grasbekleding op klei aanwezig is (open en gesloten zode). Voor de kleurschakering is gebruik gemaakt van **groen** voor categorie iv en iiv (voldoet aan de signaleringswaarde op doorsnedeniveau), **geel** voor cat. iiiv (voldoet niet aan de signaleringswaarde, maar wel aan de ondergrenswaarde op doorsnedeniveau) en **rood** indien niet wordt voldaan aan de ondergrenswaarde op doorsnedeniveau (cat. ivv). Alle locaties voldoen aan cat. vv.

Tabel G.5 Invloed sterkte (standtijdlijn) en belastingduur op categorie.

Traject - locatie	Gras op zand 12 uur $H_{s_crit} = 0,51$ m	Gesloten zode klei 12 uur $H_{s_crit} = 0,91$ m	Open zode klei 12 uur $H_{s_crit} = 0,60$ m
36-1 - 1	ivv	iiv	ivv
36-1 - 2	ivv	iv	iiiv
36-1 - 3	ivv	iiv	ivv
52-2 - 5a	ivv	iv	iiv
52-2 - 5b	ivv	iv	iiv
52-4 - 6	iiiv	iv	iiv

Voor de steekproeflocaties waar gras op zandbekledingen op het buitentalud aanwezig zijn, lijkt een gesloten graszode op klei een oplossing te zijn. Voor een gesloten zode op klei voldoen alle locaties minimaal aan de signaleringwaarde op doorsnedeniveau.

Ook in de IJsseldelta (en Vechtdelta) zijn gras op zandbekledingen aanwezig. De bedreiging komt in die gevallen mede voort uit een stormopzet op het IJsselmeer en Zwarte Water. Indien wordt gerekend met een stagnant waterpeil en een trapezoïde verloop van de golfhoogte met een basis van 35 uur en een piek van 4 uur, dan pakt dit ongunstiger uit dan een piek golfhoogte van 12 uur zonder de flanken. Deze analyses kunnen eenvoudig worden gemaakt met de BM- Gras buitentalud.

G.4 Samenvatting en conclusie

Voor het areaal van gras op zanddijken naast de Overijsselse Vechtdijk is een korte variatiestudie uitgevoerd. Er zijn op 8 locaties, egaal verspreid over de voorkomende gras op zand bekledingen, faalkansberekeningen uitgevoerd met Riskeer, waarbij enkele varianten in sterkte karakterisering zijn gehanteerd.

In de golfklapzone voldoen gras op zandbekledingen vrijwel nooit aan de signaleringswaarde op doorsnedeniveau en zelden aan de ondergrenswaarde op doorsnedeniveau. Dit geldt voor de variatie van standtijdlijnen voor gras op zandbekledingen zoals gerapporteerd in [9]. Voor de hydraulische belastingen die voorkomen bij gras op zandbekledingen zal een gesloten zode op een substraat van klei vaak voldoende weerstand bieden.

Op de kruin en het binnentalud is het beeld wisselend. Enkele steekproeflocaties komen wat hoogte tekort, enkele hebben een flinke overhoogte. Variatie in de belastingduur, buitentalud en het in rekening brengen van de versnellingsfactor afhankelijk van het golfoverslagvolume levert een variatie van één a twee decimeter in het hydraulisch belastingniveau. Het is aan de beheerder om de meest geschikte kansverdeling voor een specifieke situatie te kiezen. Indien een grote impact wordt verwacht dan verdient het de overweging om de directe cumulatieve overbelasting toe te passen, in plaats van de tussenstap met de kansverdeling van het kritisch golfoverslagdebiet. Het gereedschap hiervoor is beschikbaar via het Adviesteam Dijkontwerp (<https://adviesteamdijkontwerp.nl/>).

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